

การปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้ง  
มันสำปะหลังด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส

MODIFICATION OF THERMOPLASTIC CASSAVA STARCH  
COMPOSITES REINFORCED BY  
HYDROXYPROPYL METHYLCELLULOSE



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงปีการศึกษา 2561 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF THERMOPLASTIC CASSAVA STARCH  
COMPOSITES REINFORCED BY  
HYDROXYPROPYL METHYLCELLULOSE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

**หัวข้อโครงการพิเศษ**      การปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้ง  
 มันสำปะหลังด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพริโพรพิลเมทิลเซลลูโลส  
 Modification of thermoplastic cassava starch composites  
 reinforced by Hydroxypropyl methylcellulose

**ชื่อนักศึกษา**            นางสาวกัญชรัตน์ สวัสดิ์                      รหัสนักศึกษา 58050437  
    นางสาวตฤชณา แจ่มจำรัส                      รหัสนักศึกษา 58050476

**ปริญญา**                      วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

**ภาควิชา**                      เคมี



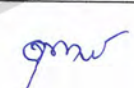
**คณะ**                          วิทยาศาสตร์

**มหาวิทยาลัย**                สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ปีการศึกษา**                 2561

**อาจารย์ที่ปรึกษา**           รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติ  
 ให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
 (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ กรรมการ	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญชรัตน์ สวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 58050437
	นางสาวตฤณญา แจ่มจำรัส	รหัสนักศึกษา 58050476
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) โดยศึกษาขนาดที่ต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าการสั่นแบบ O-H stretching มีตำแหน่งของเลขคลื่นเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างแป้งและไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส สำหรับการศึกษาพื้นฐานวิทยาพบว่าไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสมีการกระจายตัวที่ดี และสามารถเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ผลของอนุภาคไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ลดลง โดยคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง และคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้ด้วยการฝังดิน แต่อย่างไรก็ตามการเติมไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากงานวิจัยนี้ สูตรที่ดีที่สุด คือ คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความยาวห้ามการแก้ไข ซึ่งถือว่ามีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ความเคารพ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตา์ช แป้งมันสำปะหลัง ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Modification of thermoplastic cassava starch composites reinforced by Hydroxypropyl methylcellulose		
Students	Miss Kancharut Sawasdee	Student ID	58050437
	Miss Trisana Jamjumras	Student ID	58050476
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn		

### Abstract

This research focused on properties of thermoplastic cassava starch (TPCS) composites reinforced by hydroxypropyl methylcellulose (HPMC). The effects of different sizes i.e. the average aspect ratio (L/D) of 3.61 and 6.04 and different contents of 10 %wt, 20%wt and 30%wt were examined. TPCS samples were mixed with glycerol as a plasticizer by internal mixer and shaped by compression molding technique. It was found from FTIR that O-H stretching peak shifted to lower wave number indicating that hydrogen bond occurred between the starch and HPMC. For morphology, HPMC exhibited good compatibility and well distribution in the TPCS matrix. Furthermore, the percentage of moisture uptake decreased with the increase of HPMC content. The lowest moisture uptake was found for TPCS modified by HPMC at the L/D of 6.04. In addition, when the HPMC contents were increased, stress at maximum load and Young's modulus of TPCS samples clearly increased, but the strain at maximum load reduced. All TPCS samples reinforced with HPMC showed biodegradability by soil burial test. However, the addition of HPMC did not affect the thermal property of TPCS composites. The best overall sample was obtained from TPCS reinforced by 30%wt HPMC at the L/D of 6.04 observed by the highest strength and the lowest moisture uptake.

**Keywords :** Thermoplastic starch, Cassava starch, Hydroxypropyl methylcellulose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้บรรลุผลสำเร็จได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ และคำปรึกษาจากทุกๆ ท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลือในการทำงานโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ ที่กรุณาเป็นกรรมการ ตลอดจนให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไข เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด ที่ได้ให้ความรู้ และข้อแนะนำดีๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กัญชรัตน์ สวัสดิ์  
ตฤชญา แจ่มจรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 พลาสติก.....	4
2.1.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic).....	4
2.1.2 เทอร์โมเซต (Thermoset).....	4
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic).....	4
2.2.1 กลไกกระบวนการย่อยสลายของพลาสติก.....	5
2.3 วัสดุคอมพอสิต.....	8
2.3.1 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement).....	8
2.3.2 เมทริกซ์ (Matrix).....	8
2.4 แป้ง.....	9
2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	9
2.4.1.1 อะมิโลส.....	10
2.4.1.2 อะมิโลเพกทิน.....	11
2.4.1.3 สารตัวกลาง.....	13
2.4.2 สมบัติของแป้ง.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.1 การดูดซับน้ำ การละลาย และการพองตัว .....	13
2.4.2.2 ความหนืด .....	14
2.4.2.3 การเกิดรีโทรเกรดชัน .....	14
2.4.3 แป้งมันสำปะหลัง .....	14
2.5 ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส .....	16
2.6 พลาสติกไซเซอร์ .....	17
2.6.1 กลีเซอรอล .....	18
2.7 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช .....	18
2.7.1 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช .....	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>24</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	25
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	26
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง .....	27
3.3.2 การเตรียมไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส .....	27
3.3.3 การเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส .....	27
3.3.4 การขึ้นรูปคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง .....	28
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ .....	28
3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) .....	28
3.4.2 การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture uptake) .....	28
3.4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology) .....	28
3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) .....	29
3.4.5 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties) ....	30
3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA) .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดำเนินงานของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	31
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR).....	32
4.2 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	34
4.3 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake).....	38
4.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	40
4.5 การย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties).....	42
4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA).....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	62
ภาคผนวก ง.....	64
ภาคผนวก จ.....	65
ภาคผนวก ฉ.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน .....	10
2.2 สมบัติของอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิด .....	11
2.3 สมบัติของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด .....	12
2.4 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด .....	13
2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังแห้ง .....	15
3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง .....	24
3.2 สมบัติของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส .....	25
3.3 อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง กลิเซอรอล และไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ที่ใช้ในการเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช .....	27
3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เตรียมได้ .....	29
4.1 อักษรย่อของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ .....	32
4.2 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส .....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การย่อยสลายของพลาสติกทางชีวภาพ.....	6
2.2 โครงสร้างอะมิโลส.....	10
2.3 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน.....	11
2.4 โครงสร้างของไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส.....	17
2.5 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	18
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย.....	26
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งมันสำปะหลัง สูตรต่างๆ.....	32
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งมันสำปะหลัง สูตรต่างๆ.....	33
4.3 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า.....	34
4.4 สัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 300 เท่า.....	35
4.5 สัณฐานวิทยาของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง สมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วน ระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า.....	36
4.6 สัณฐานวิทยาของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง สมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาว ต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของแป้ง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า.....	37
4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจาก แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส ที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	
เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก	
แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่	
อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง ( L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20	
และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง.....	
	39
4.9	
สมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง	
สมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่	
อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ	
ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง.....	
	40
4.10	
สมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง	
สมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาว	
ต่อความกว้าง ( L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ของแป้ง.....	
	41
4.11	
สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้ง	
มันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส	
ที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio)	
3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง	
(ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึง	
สูงสุด.....	
	43
4.12	
สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ	
จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส	
ที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง ( L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20	
และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	
(ข) มอดุลัส (ค) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	
	44
4.13	
(ก) TGA และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก	
แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลส	
ที่ขนาดต่างกันอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio)	
3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง.....	
	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 (ก) TGA และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง ( L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง.....	47



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติก เป็นวัสดุที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ด้วยคุณสมบัติที่ทนทาน แข็งแรง น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ เหมาะกับทุกสภาพการใช้งาน และประกอบกับการผลิตแต่ละครั้งสามารถผลิตได้ในปริมาณมากและรวดเร็ว ทำให้ช่วยประหยัดต้นทุนและเพิ่มความได้เปรียบในเรื่องราคามากกว่าวัสดุอื่นๆ พลาสติกจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการใช้ประโยชน์แทนไม้ โลหะ และวัสดุธรรมชาติอื่นๆ แต่ปัญหาคือพลาสติกผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไป และต้องใช้ระยะเวลายาวนานในการย่อยสลายพลาสติก ทำให้มีขยะที่เกิดจากการใช้งานพลาสติกสะสมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น มนุษย์จึงได้คิดค้นและพัฒนาพลาสติกที่มาจากชีวภาพ เป็นพลาสติกที่มาจากสิ่งมีชีวิต เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้โดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี [1]

พลาสติกชีวฐาน (Bio-based plastic) เป็นพลาสติกที่ถูกผลิตขึ้นมาจากวัสดุธรรมชาติและสิ่งมีชีวิต เช่น พืช และสัตว์ บางครั้งอาจเรียกว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถหาใหม่ทดแทนได้ ตัวอย่างของพลาสติกชีวภาพ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) และพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นต้น พลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติและภายในระยะเวลาอันสั้น ไม่มีเศษขยะตกค้างจากการใช้งานพลาสติก ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพได้เป็นที่นิยมกันอย่างมาก เพราะเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างใหม่ได้ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเพื่อใช้ทดแทนวัสดุสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกในรูปของการใช้งานทั่วไป [2]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีความอุดมสมบูรณ์ในเรื่องของผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง และถั่วต่างๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เพราะมีปริมาณมาก หาง่าย และราคาถูก การผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ (เช่น น้ำ กาลีเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น) ในสภาวะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือนอย่างเหมาะสม จะได้วัสดุที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการหลอมหรือการใช้ความร้อนเข้าช่วย อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของควมว่องไวต่อความชื้น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่นหรือความอ่อนตัว และการทนต่อความร้อน งานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวมา [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน และลื่น แป้งมันสำปะหลังมีสมบัติที่พิเศษ คือ มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส กล่าวได้ ขาวใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี มันสำปะหลังเหมาะสมกับสภาพทางการเกษตรของพื้นที่การผลิตในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนทานต่อสภาพอากาศแห้งแล้งที่ยอดเยียม ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก แป้งมันสำปะหลัง จึงถือได้ว่าเป็นแป้งไทยที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกที่สุด เหมาะสำหรับการเป็นทางเลือกในการผลิตพลาสติกทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม [3]

การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอาจทำได้โดยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Chemical modification) หรือทางกายภาพ (Physical modification) ตัวอย่างการดัดแปลงทางกายภาพ เช่น การเติมสารเสริมแรง จำพวกเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เป็นต้น ช่วยในเรื่องของการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์ดังกล่าว นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ เหล่านี้ จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชขึ้น แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการเติมไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสแทน ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับเส้นใยธรรมชาติ อยู่ในรูปผงละเอียดสีขาว [2]

ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) พอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ที่เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส โดยมีอีเทอร์และเมทิลเป็นองค์ประกอบ สามารถผลิตได้จากเซลลูโลส ไม้ หรือเนื้อเยื่อของพืช จัดเป็นสารเพิ่มความหนืดตามความยาวสายโซ่ของโมเลกุล ยิ่งมีความยาวสายโซ่โมเลกุลมาก จะยิ่งหนืดมาก จึงเป็นที่นิยมอย่างมากในการผลิตเจลและสารเคมีในอุตสาหกรรมยา อาหาร สี เซรามิก ผงซักฟอก กาว เครื่องสำอางค์ และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [4]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการใช้ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสกับแป้งถั่วลันเตา ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้การใช้เส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์เป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น 305 และ 546 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [6] นอกจากนี้การปรับปรุงฟิล์มจากแป้งข้าวโพดด้วยไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าปริมาณของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความมันวาวลดลง มอดูลัสและความแข็งแรงดึงมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่มาจากแป้งข้าวโพดเพียงอย่างเดียว [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำงานวิจัยดังกล่าวมาเป็นแนวทางในปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยการปรับปรุงด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาว โดยใช้ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน

เอกสารนี้ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง และตรวจวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) การดูดซับความชื้น สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน ซึ่งคาดว่า การใช้ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส จะทำให้คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาarch มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและการดูดซับน้ำลดลง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาarch โดยใช้ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส
- 1.2.3 เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสในเรื่องของขนาดอนุภาคและปริมาณที่ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาarch มีสมบัติดีขึ้น
- 1.3.3 ทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ ดังนี้ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การดูดซับความชื้น สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังให้ดีขึ้นได้
- 1.4.2 คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายได้โดยใช้ระยะเวลาอันสั้นกว่าพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
- 1.4.3 ลดปัญหาจากขยะพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์กลุ่มใหญ่ และอาจมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน เม็ดพลาสติกเกิดจากการนำน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการกลั่นและพอลิเมอร์ไรเซชันออกมาเป็นเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีน เป็นต้น โดยกระบวนการหลังจากได้เม็ดพลาสติกคือการขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์และเครื่องใช้อื่นๆ ในปัจจุบันถือได้ว่าพลาสติกเป็นที่นิยมนำมาใช้แพร่หลาย แต่พลาสติกก็ถือว่าเป็นปัญหาสำหรับสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายยาก ใช้เวลานาน ทำให้ดินเสื่อมสภาพ เผาทำลายทำให้เกิดมลพิษในอากาศ [8]

พลาสติกจำแนกออกเป็น 2 ประเภท โดยแบ่งตามสมบัติทางด้านความร้อน

#### 2.1.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ประเภทนี้ จะเกิดการหลอมเหลวและอ่อนตัวจนสามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ตามต้องการ เมื่อทำให้เย็นลง จะให้สมบัติแข็ง เหนียว และคงรูปตามแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ พอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้โดยที่สมบัติไม่เปลี่ยนแปลง หากให้ความร้อนในการหลอมไม่เกินอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเมอร์ โครงสร้างของพลาสติกชนิดนี้จะเรียงตัวเป็นเส้นตรงหรือเป็นกิ่งสั้นๆ

#### 2.1.2 เทอร์โมเซต (Thermoset)

พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีรูปทรงที่ถาวร เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยให้ความร้อนและความดันเข้าไป เกิดการหลอมและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinked) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติยึดกันอย่างแข็งแรง เมื่อให้ความร้อนจะเกิดการเสียสภาพและมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก [9]

### 2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic)

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) คือพลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดทั้งจากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (Bio-based materials/renewable) หรือจากปิโตรเคมี (Petro-based materials/non-renewable) ที่เมื่อผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการหมักทางชีวภาพ หลังการใช้งานจะสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) โดยเอมไซม์ จากสิ่งมีชีวิตทั้งในสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ มวลชีวภาพ สารประกอบอินทรีย์ รวมถึงแร่ธาตุ และต้องไม่ทิ้งสิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า สิ่งแปลกปลอม หรือ สารพิษไว้ตามที่ระบุไว้ตามมาตรฐานการทดสอบ ดังนี้ สหภาพยุโรป ใช้ EN 13432, สหรัฐอเมริกา ใช้ ASTM D-6400, ไทย ใช้ มอก. 17088 และระดับนานาชาติ ISO ใช้ 17088: 2008 โดย กระบวนการย่อยสลายนี้ไม่จำเป็นต้องมีการกำจัดขยะ ไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ไม่มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งสิ่งที่ได้จากกระบวนการย่อยสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชได้อีกด้วย ตัวอย่างของพลาสติกชีวภาพที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ เช่น พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ พื้นฐาน (Starch based plastics) พอลิแลกติกแอซิด เป็นต้น [10]

### 2.2.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติก

1. การย่อยสลายโดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงเกิดจาก สารเติมแต่งที่ใส่ลงไปพลาสติกมีความไวต่อแสงหรือเกิดจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้มีหมู่ ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง ซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำ สามารถแตกตัวได้ง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เมื่อพอลิเมอร์ที่ไวต่อแสงสัมผัสกับรังสียูวีโดยตรงเท่านั้น จะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็น อนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่ง คาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ เกิดการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง

2. การย่อยสลายโดยแรงเชิงกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำ แก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น เป็นวิธีการย่อยสลายทั่วไป

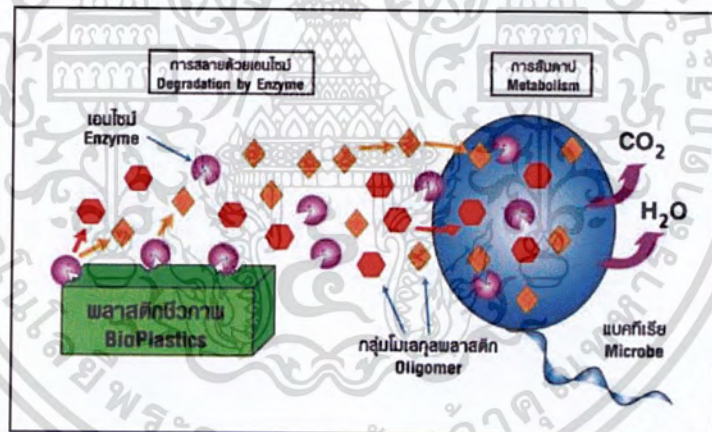
3. การย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) การย่อย สลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของ พอลิเมอร์ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวี เป็นปัจจัยหลัก จากนั้นจึงเกิดเป็นสารประกอบ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัว กลายเป็นอนุมูลอิสระ ( $RO \cdot$  และ  $\cdot OH$ ) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่ง คาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทันที ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว ในพลาสติกที่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) จะยับยั้งหรือ ชะลอการแตกตัวของ ROOH

4. การย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อย สลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น อาจจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วย แบ่งเป็นภายในและภายนอกโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของ ไมวาร์กมิได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลเช่น เอนไซม์ต่างๆ จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดจากเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และเอนไซม์อีกชนิดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วย จากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ [11]



รูปที่ 2.1 การย่อยสลายของพลาสติกทางชีวภาพ [10]

การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ [12] สามารถหาได้หลายวิธี ดังนี้

(1) การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ จะได้คาร์บอนออกมา 3 แบบ คือ คาร์บอนในรูปที่ละลายได้ (Soluble) คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ พอลิเมอร์ที่ถูกย่อยสลายสามารถคำนวณได้จากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนในสภาวะที่กล่าวมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลาย ( $C_d$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสถานะก๊าซ

$C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายของพอลิเมอร์ (%f) คำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนย่อยสลาย

#### (2) การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายของพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือการเปลี่ยนไปเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จึงสามารถหาได้จากน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ โดยการชั่งน้ำหนักก่อนถูกย่อยสลายเทียบกับน้ำหนักหลังจากถูกย่อยสลาย

#### (3) การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์

เป็นการวิเคราะห์ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์จากกล้องจุลทรรศน์ 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะเห็นเส้นใยของเชือกที่เจริญเติบโตบนพอลิเมอร์ รวมถึงรูเล็กๆที่แสดงถึงการถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก จะพบว่าพอลิเมอร์มีสีและขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกำลังขยายที่สูงจึงทำให้สามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย

#### (4) การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์จากการดูดซับรังสีอินฟราเรด ทำให้เกิดแถบสเปกตรัมเฉพาะตัว ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมป์ที่หายไป รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากการถูกจุลินทรีย์ย่อยสลาย สามารถถูกตรวจวัดได้

#### (5) การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

การวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็นการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก เนื่องจากสัณฐานของผลึกจะลดลงจากการย่อยของจุลินทรีย์ และ Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณแอมป์ก่อนและหลังการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### (6) การทดสอบโดยการฝังดิน

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 ตารางมิลลิเมตร หลากๆตัวอย่าง ฝังดินลึก 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดเวลา ให้ทำการเก็บตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง แล้วทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุตามระยะเวลาต่างๆ

### 2.3 วัสดุคอมพอลิท์

ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมพอลิท์ (Composites) ในปริมาณที่มากถึง 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้งานที่เพิ่มขึ้นทุกปี วัสดุคอมพอลิท์ถือว่าเป็นวัสดุโครงสร้างที่สามารถรับแรงได้มาก มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ โดยนิยามแล้ว วัสดุคอมพอลิท์ (Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหรือมากกว่า 2 ส่วนขึ้นไปที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งส่วนของวัสดุเสริมแรงจะกระจายตัวอยู่ในวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก วัสดุเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงวัสดุเนื้อหลัก เมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกันจะทำให้เกิดสมบัติของวัสดุคอมพอลิท์ที่ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น หรือเกิดการเสริมแรงกัน [13]

องค์ประกอบ 2 ส่วนของคอมพอลิท์ ได้แก่

#### 2.3.1 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement หรือ Reinforcement compound)

คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมพอลิท์ เป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง ส่วนของวัสดุเสริมแรงจะกระจายตัวอยู่ในวัสดุที่เป็นเนื้อหลักเพื่อรองรับแรงที่มากกระทำ วัสดุเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุ ตัวอย่างของส่วนเสริมแรง ได้แก่ เส้นใย(Fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นต้น

โดยส่วนเสริมแรง แบ่งเป็น 3 ลักษณะด้วยกัน คือ ลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) อาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง มีความแข็งแรงสูงในแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใย ลักษณะเป็นโครงสร้าง โดยส่วนเสริมแรงจะมีการยึดเกาะกันกับวัสดุเนื้อหลัก ได้ออกมาเป็นแผ่นๆ แล้วนำมาประกบกัน เกิดเป็นคอมพอลิท์ที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ และลักษณะเป็นอนุภาค ส่วนเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด ผง หรือแผ่นที่มีขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก

#### 2.3.2 เมทริกซ์ (Matrix) หรือวัสดุเนื้อหลัก

ซึ่งส่วนนี้จะป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนดโดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ โลหะ เป็นต้น [14]

## 2.4 แป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในพืช พบได้ในส่วนของแหล่งสะสมอาหาร แป้งที่มีการใช้ทั่วไป คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลี และแป้งมันสำปะหลัง โดยแป้งจัดเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากสมบัติของแป้ง ได้มีการนำแป้งมาใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรม แป้งดัดแปร เป็นต้น

แป้ง มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนมาก มีสิ่งเจือปนจำพวก โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่เล็กน้อย

ฟลาวัวร์ (Flour) คือ แป้งที่ยังมีส่วนเจือปน

แป้งสตาร์ช (Starch) คือ แป้งที่ถูกสกัดสิ่งเจือปนออกไป เหลือแต่แป้งบริสุทธิ์

- แป้งดิบ (Raw starch) คือ แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ถูกนำไปแปรรูป
- แป้งดัดแปร (Modified starch) คือ แป้งสตาร์ชที่ถูกนำไปแปรรูปแล้ว [12]

โดยในประเทศไทย อุตสาหกรรมแป้งที่ผลิตมากที่สุด คือ แป้งมันสำปะหลัง

### 2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ซึ่งแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดมาเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) พอลิเมอร์กลูโคสสองชนิด ได้แก่ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิง กิ่ง (อะมิโลเพกทิน) โดยแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสกับอะมิโลเพกทินที่ต่างกัน ส่งผลให้มีสมบัติต่างกัน สมบัติของอะมิโลสเทียบกับอะมิโลเพกทินแสดงดังตารางที่ 2.1

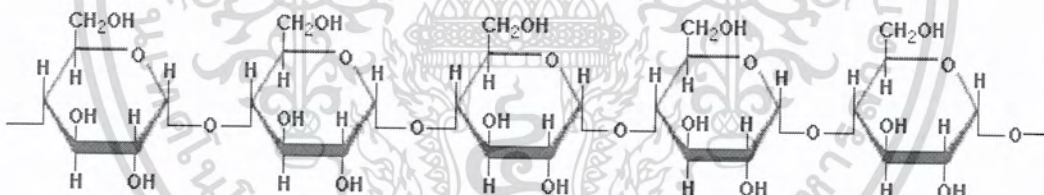
แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก มีโครงสร้างเป็นแบบ กึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะกระจายอยู่ทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous หรือ Gel phase) [12]

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [12]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	กลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่ง
พันธะที่จับ	$\alpha$ -1, 4 glycosidic bond	$\alpha$ -1, 4 และ $\alpha$ -1, 6 glycosidic bond
ขนาด	200 – 2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 1000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนและตั้งทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.4.1.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) ชนิดแอลฟา-1, 4 ( $\alpha$ -1, 4) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะมิโลส [15]

โดยส่วนมากแป้งที่ได้จากธัญพืชจะมีปริมาณอะมิโลสอยู่สูงประมาณ 28% แต่แป้งที่ได้จากรากและหัวมีปริมาณอะมิโลสอยู่เพียงแค่ 20% ในขณะที่แป้งข้าวเหนียวกลับไม่มีอะมิโลสอยู่เลย อะมิโลสมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน ซึ่งแป้งที่ต่างชนิดกันจะมีน้ำหนักโมเลกุลและระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสที่ต่างกัน สมบัติของอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

อะมิโลสสามารถรวมตัวกับไอโอดีนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ ซึ่งจะได้สีน้ำเงินเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกว่าแป้งมีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิด [12]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลส (%)	ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ย	จำนวนสาย เฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย เฉลี่ย (LC)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-
แป้งมันสำปะหลัง	17	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	4,900	9.5	240	-

หมายเหตุ : DP = Degree of Polymerization

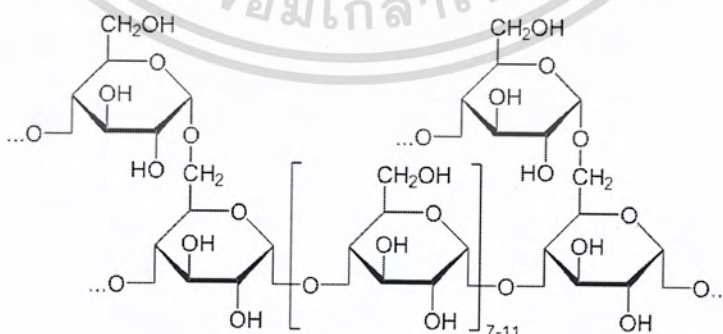
NC = Average number of chain

CL = Average chain length

อะมิโลสมีโครงสร้างอยู่ 3 รูปแบบ คือ ลักษณะเกลียวม้วน (Helix) เกลียว  
 คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนัก  
 โมเลกุลของอะมิโลส [12]

2.4.1.2 อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกัน  
 ด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด  
 $\alpha$ -1, 6 ซึ่งมีอยู่แค่ประมาณ 5% ของปริมาณอะมิโลเพกทินทั้งหมด อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุล  
 ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตันและมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นกิ่ง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง อะมิโลเพกทิน ประมาณ 80–90% จะเป็นสายเดี่ยวๆ อีก 10–20% จะเป็นสายที่เชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม โดยในกลุ่ม จะมีประมาณ 22–25 สาย เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (Double helix) โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวัลเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อ ซึ่งทำให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเบส สมบัติของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด [12]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ	ขนาดโมเลกุล	ความยาวสาย	จำนวนสาย
	อะมิโลเพกทิน (%)	(DP) เฉลี่ย	เฉลี่ย (CL)	เฉลี่ย (NC)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370
แป้งข้าวเจ้า	83	-	-	-
ข้าวเหนียว	-	18,500	18	1,000
แป้งมันฝรั่ง	79	9,800	24	410
แป้งมันสำปะหลัง	83	-	-	-

หมายเหตุ : DP = Degree of polymerization

NC = Average number of chain

CL = Average chain length

โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเกลียวคู่ ดังนั้นความสำคัญของอะมิโลเพกทินจึงมีมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่และการนำใช้ แม้มีเพียงอะมิโลเพกทินอย่างเดียวก็สามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้ ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด [12]

	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง
อะมิโลส (%น้ำหนักแห้ง)	21	28	28	17
อะมิโลเพกทิน (%น้ำหนักแห้ง)	79	72	72	83
ขนาดโมเลกุล (DP) อะมิโลส (หน่วยน้ำตาลกลูโคส)	3000	800	800	3000
ขนาดโมเลกุล (DP) อะมิโลเพกทิน (หน่วยน้ำตาลกลูโคส)	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$
จำนวนโมเลกุลอะมิโลส ( $\times 10^{20}$ ) ในแป้ง 1 กรัม	30	130	130	20
จำนวนโมเลกุลอะมิโลเพกทิน ( $\times 10^{17}$ ) ในแป้ง 1 กรัม	150	130	130	150
สัดส่วนจำนวนโมเลกุลของอะมิโลส ต่ออะมิโลเพกทิน	200	1,000	1,000	150
ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ยของโมเลกุล แป้ง (ในหน่วยน้ำตาลกลูโคส)	14,000	3,000	3,000	18,000

### 2.4.1.3 สารตัวกลาง

ในองค์ประกอบของแป้งสามารถแยกตามน้ำหนักโมเลกุลได้ 3 ส่วน คือ อะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลาง โดยสารตัวกลางจัดเป็นส่วนน้อยในแป้ง มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทิน แต่มากกว่าอะมิโลส นอกจากนี้ยังพบว่าสารตัวกลางมีโครงสร้างเป็นกิ่งคล้ายกับอะมิโลเพกทินอีกด้วย สัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเมล็ดแป้งจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูกและระยะเวลาในการปลูก [12]

## 2.4.2 สมบัติของแป้ง

### 2.4.2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมภายในเมล็ดแป้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ น้ำหรือของเหลวสามารถแพร่เข้าสู่ไมเซลล์ (Micelles) ของเมล็ดแป้งได้อย่างอิสระ น้ำที่อยู่ในเมล็ดแป้งมี 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water)

โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย ทำให้น้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว การละลาย ความหนืด และความใสของเม็ดแป้งจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สิ่งเจือปนในเม็ดแป้ง (เช่น หมู่ฟอสเฟต) การตัดแปรทางเคมีให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง ก็สามารถทำให้เกิดการพองตัวที่เพิ่มขึ้นได้ แต่การทำครอสลิง (Crosslinking) จะทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น การพองตัวและการละลายจึงลดลง [13]

#### 2.4.2.2 ความหนืด

ความหนืดสามารถดูได้จากการพองตัว เมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมาก ก็จะทำให้มีความหนืดมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนแป้งจะดูดซึมน้ำ ทำให้เกิดการพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆลดน้อยลงทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จนเมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งที่มีค่าความหนืดสูงสุด เรียกว่า (Peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและรบกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งแตกออก ความหนืดจะลดลง

ปรากฏการณ์ที่ความหนืดเพิ่มขึ้นจนเม็ดแป้งเคลื่อนที่ยากขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization) ส่วนอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาทีไนซ์ ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด [12]

#### 2.4.2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เกิดจากการเจลลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อเนื่อง จนโครงสร้างแตกออกและความหนืดลดลง ความหนืดที่ลดลงเกิดจากโมเลกุลของอะมิโลสกระจายออกมา และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลที่กระจายตัวของอะมิโลสจะกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเป็นโครงร่างสามมิติ ซึ่งสามารถอุ้มน้ำและไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก มีความหนืดมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่ออุณหภูมิลดลงไปเรื่อยๆจะทำให้การจัดเรียงตัวโครงร่างสามมิติแน่นมากขึ้น โมเลกุลน้ำที่ถูกอุ้มอยู่ภายในจะถูกบีบออกมาด้านนอก ทำให้เจลมีลักษณะขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น [12]

ดังนั้นขนาดและปริมาณของอะมิโลสจึงมีผลต่อการคืนตัวของแป้งมากกว่าอะมิโลเพกทิน โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีการคืนตัวมากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง

#### 2.4.3 แป้งมันสำปะหลัง

ถิ่นกำเนิดของมันสำปะหลังอยู่ในอเมริกาใต้ บราซิล/เม็กซิโก มีชื่อเรียกตามรากศัพท์

ต่างๆ เช่น Cassava, Mandioca, Yucca, Tapioca และ Manioc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงศ์ (Class)	Magnoliopsida
ชั้นย่อย (Subclass)	Rosidae
อันดับ (Order)	Euphorbiales
ตระกูล (Family)	Euphorbiaceae
ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Manihot esculenta</i> Crantz [3]

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ความหนาแน่นต่ำ ฟุ้งกระจายได้ง่าย ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลังคือ มีความบริสุทธิ์สูง โดยมีสตาร์ชอยู่มากกว่าร้อยละ 95 สิ่งปนเปื้อนต่ำ เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์เม็ดแป้งจะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ อาจมีรอยยุบตรงด้านปลายของเม็ด เม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 3-40 ไมครอน มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำ และมีขนาดที่แตกต่างกัน

การผลิตแป้งมันสำปะหลังนั้นจะนำหัวมันสดมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปโม้หัวมันสำปะหลัง ได้ของเหลวข้น นำมาสกัดแป้งโดยแยกกากหยาบกับกากอ่อนออกจากน้ำแป้งก่อน ต่อด้วยแยกคอลลอยด์แป้งออกจากน้ำแป้ง ได้เป็นน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูง แล้วจึงนำไปสไลด์แห้ง โดยการเหี่ยยน้ำออก ได้เป็นแป้งหยาบ สุดท้ายแล้วจึงนำไปอบแห้งได้เป็นผงแป้งมันสำปะหลังตามที่ต้องการ ซึ่งคุณภาพของแป้งมันสำปะหลังจะขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตและองค์ประกอบทางเคมีของหัวมันจากแหล่งที่มา [3] แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังแห้ง [3]

ส่วนประกอบ	หัวมันสด	หัวมันแห้ง
ความชื้น (%)	63.25	10.63
คาร์โบไฮเดรต (%)	29.73	70.63
- อะมิโลส (%)	-	17.00
- อะมิโลเพกทิน (%)	-	83.00
โปรตีน (%)	1.18	2.63
ไขมัน (%)	0.08	0.51
เถ้า (%)	0.85	2.20
เส้นใย (%)	0.99	1.73
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	0.26	0.43
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	0.04	0.08
กรดไฮโดรไซยานิก (หนึ่งในล้านส่วน)	173	100

ปัจจัยที่มีผลต่อแป้งมันสำปะหลัง [3]

(1) วัตถุดิบ

คุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัดแป้ง ส่งผลต่อคุณภาพด้วย ยกตัวอย่างคุณภาพของวัตถุดิบเช่น สายพันธุ์มันสำปะหลัง อายุของหัวมันที่เก็บเกี่ยว สภาวะแวดล้อมในการปลูก การปนเปื้อนของจุลินทรีย์หลังเก็บเกี่ยว

(2) กระบวนการผลิตแป้ง

กระบวนการผลิตที่ต่างกันก็ส่งผลให้คุณภาพของแป้งมันสำปะหลังต่างกัน เช่น วิธีการผลิต น้ำที่ใช้สกัดแป้ง การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำกำมะถันเพื่อควบคุมเชื้อจุลินทรีย์และช่วยฟอกสี รวมถึงการอบแห้ง เป็นต้น

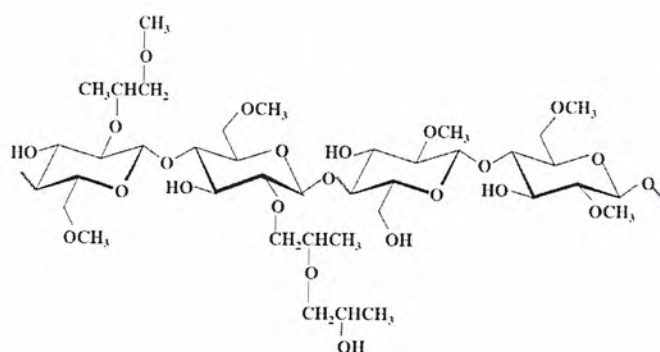
(3) การเก็บรักษา

อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลาในการเก็บรักษา เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้ง โดยแป้งที่เก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูง จะทำให้แป้งมีการดูดซึมน้ำไว้มาก เมื่อระยะเวลาที่เก็บนานขึ้นก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีจากจุลินทรีย์ได้

## 2.5 ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส

ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose) คือ สารเคมีที่ได้จากเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุล คือ  $[C_6H_7O_2(OH)(OCH_3)(CH_2CHOHCH_3)]_n$  เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) กิ่งสังเคราะห์ ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์เชิงเส้นของพอลิแซคคาไรด์ ที่มีการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ด้วยหมู่เมทิล (Methyl group) และหมู่ไฮดรอกซีพรอพิล (Hydroxypropyl group) ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นสูตรทางเคมีทั่วไปจึงซับซ้อนมาก เนื่องจากมีการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลได้หลายแบบ หากมีจำนวนการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลน้อย จะทำให้ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสเป็นสารชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากยังคงมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ แต่ถ้ามีจำนวนการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลมาก จะทำให้เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส [16]

ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส เป็นผงสีขาวบริสุทธิ์ ไม่เป็นพิษ ไม่เป็นสารก่อภูมิแพ้ จัดเป็นพอลิเมอร์กลุ่มสารให้ความหนืด (Viscosity-enhancing agent) ไม่มีประจุในโครงสร้าง (Nonionic) ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส จะละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เช่น สารละลายเอสเทอร์ (Ester) กรดไขมัน (Fatty acid) หรือพรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) โดยไม่ต้องใช้ความร้อน เนื่องจากละลายได้ดีในน้ำเย็น การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนืดของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิหนึ่งจะกลายเป็นเจล ปรากฏการณ์นี้จะผันกลับได้เมื่ออุณหภูมิลดลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มสมบัติของเทอร์โมพลาสติกและสารเคลือบอีกด้วย เช่น การลดการตกผลึกเพื่อลดความเปราะ เพิ่มความยืดหยุ่นในฟิล์ม เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เป็นตัวควบคุมการละลายของสารเคลือบ และหากเป็นโมเลกุลสั้นๆ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่น เพื่อช่วยลดการเสียดสีในขั้นตอนการขึ้นรูปได้อีกด้วย [16]

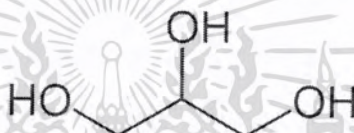
## 2.6 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปพลาสติกหรือยาง เพื่อช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการงอ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก โดยพลาสติไซเซอร์เป็นตัวทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น อ่อนตัว ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) โดยกลไกการทำงาน คือ พลาสติไซเซอร์จะไปเพิ่มช่องว่างหรือปริมาตรอิสระ (Free volume) ระหว่างสายโซ่ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เป็นการลดความหนืดของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ขึ้นรูปง่ายขึ้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล คือ สารเติมแต่งที่ใช้มากที่สุดในด้านของอาหารและยา เป็นเพราะ กลีเซอรอลมีรสชาติดหวาน เป็นพิษน้อยมาก และมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี และก็ยังใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในวัสดุที่มีแข็งเป็นพื้นฐาน กลีเซอรอล (Glycerol) อาจเรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) เป็นสารประกอบพอลิโออล (Polyol compound) เป็นสารที่เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะคล้ายน้ำเชื่อม ในโครงสร้างโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) 3 หมู่ ดังรูปที่ 2.5 ชอบน้ำสูง จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี [18]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกลีเซอรอล [19]

## 2.7 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) เป็นพลาสติกชีวฐาน จัดอยู่ในกลุ่มที่มาจากธรรมชาติโดยตรง ไม่เป็นพิษ เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย พบมากในธรรมชาติ และมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ย่อยสลายได้โดยการฝังดินและโดยการกระทำของจุลินทรีย์และหาใหม่ทดแทนได้ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และถั่วต่างๆ พืชเหล่านี้มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยทั่วไปแล้วแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพลาสติกทั่วไปเนื่องจากเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการเดียวกับพลาสติกทั่วไป [20]

### 2.7.1 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

โดยธรรมชาติแล้วแป้งไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แทนที่จะหลอมเหลวแต่จะเกิดการเผาไหม้และสลายตัว แต่สามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น กลีเซอรอล น้ำ เอทานอลามีน ฟอร์มาไมด์ และซอร์บิทอล ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการ

เอกสารนี้... หลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินเป็นอิสระมากยิ่งขึ้น และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอที่จะสามารถทำให้แป้งหลอมและไหลแล้ว จึงจะสามารถนำแป้งมาทำการขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยง่าย จึงทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สารที่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ได้แก่ กลีเซอรอล พลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีข้อจำกัดที่สำคัญ 2 ประการ คือ มีสมบัติเชิงกลไม่ดีและไม่ทนน้ำ จึงทำให้นักวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้ง 2 ด้านของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่ การดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมีและการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ [21]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 *Oguz. et al. (2017)* ศึกษาการพัฒนาเส้นใยนาโนจากแป้งถั่วลิสงเตาและไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning) โดยมีความเข้มข้นของแป้งถั่วลิสงเตาต่างกัน 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร และความเข้มข้นของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสต่างกัน 0.25, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ก่อนนำไปปั่นเป็นเส้นใยพบว่าสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสเป็นสารเสริมการทำงานร่วมกัน (Synergistic) ระหว่างความหนืดและความเหนียว เมื่อนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ไม่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสาเหตุความเป็นอิสระของค่าการนำไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจาก ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ จึงไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นนำมาปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิตย์ในสภาวะความเป็นเบส (pH เท่ากับ 10) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสและแป้งถั่วลิสงเตาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วย จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นของแป้งถั่วลิสงเตา 1 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส 0.25 หรือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ pH เท่ากับ 10 เป็นตัวเลือกที่ดีที่สามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ [5]

2.8.2 *Jiménez. et al. (2012)* ศึกษาฟิล์มที่สามารถบริโภคนได้จากแป้งข้าวโพดผสมไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ในอัตราส่วน 100 : 0 , 75 : 25 , 50 : 50 และ 0 : 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 1 : 0.25 เปอร์เซ็นต์

โดยน้ำหนัก ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการใช้เครื่องโรเตอร์สเตเตอร์ ฮอโมจีไนซ์ (Rotor-stator) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ของงานวิจัยนี้ถือว่าผิดกฎหมาย ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ซ้ำได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

homogenizer) ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปฟิล์มโดยการเทหล่อ (Casting) จัดเก็บฟิล์มไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 53 เปอร์เซ็นต์ แบ่งการวิเคราะห์ฟิล์มเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกเมื่อระยะเวลาครบ 1 สัปดาห์และครั้งที่สองเมื่อระยะเวลาครบ 5 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์พบว่า การเติมไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้ความมันวาวลดลง มอดุลัสและความแข็งแรงดิ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่มาจากแป้งข้าวโพดเพียงอย่างเดียว ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเท่ากัน แต่ความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนสูงมากกว่า การเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อการยับยั้งการตกผลึกใหม่ของแป้งข้าวโพดในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ฟิล์มที่มีการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 สัปดาห์ มีความแข็งแรงลดลง [7]

**2.8.3 Toro. et al. (2014)** ศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดซिटริกลงในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวโพดซึ่งผสมกับไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC) ในอัตราส่วนที่ต่างกักัน ศึกษาถึงโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพและผลจากระยะเวลาในการเก็บรักษาของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ การทำเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ใช้ไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0.1 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นเติมกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดซิทริก ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) และสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) ในงานวิจัยแบ่งเป็นเติมกรดซิทริกในปริมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง และไม่เติมกรดซิทริก ขึ้นรูปโดยกระบวนการกดอัด จัดเก็บฟิล์มไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 53 เปอร์เซ็นต์ แบ่งการวิเคราะห์ฟิล์มเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกเมื่อระยะเวลาครบ 1 สัปดาห์และครั้งที่สองเมื่อระยะเวลาครบ 5 สัปดาห์ จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มส่วนของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส และกรดซิทริก ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าลดลง ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แต่ความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กรดซิทริกทำให้เกิดความแข็งตัวเล็กน้อยในฟิล์มและยังทำให้ความสามารถในการดิ่งยืด (Extensibility) ลดลง เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงแบบอ่อนๆ ซึ่งความสามารถในการดิ่งยืดมีค่าลดลงเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานานขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส มาก พบว่าความสามารถในการดิ่งมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน การตกผลึกของแป้งในระหว่างการเก็บรักษาถูกยับยั้งโดยทั้งกรดซิทริกและไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส [22]

**2.8.4 สุภารัตน์ และคณะ** ศึกษาผลของชนิด ปริมาณและขนาดของเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วน 65:35 ของแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอล เส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ได้แก่ เส้นใยปอ และเส้นใยปุ่น โดยใช้ในอัตราส่วน 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งและ

กลีเซอรอล โดยเริ่มจากเตรียมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลผสมเส้นใยต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด  
ปิด แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกดรูป จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่  
ไม่วารณณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ลัทธิฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติการย่อยสลาย พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นจากการเติมเส้นใยลงไป ลักษณะลัทธิฐานวิทยา เทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์ที่ผสมเส้นใย พบว่าเส้นใยเข้ากับเมทริกซ์ของแป้งได้ อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์จากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณเส้นใยลงไป แต่อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเส้นใยลงไป การดูดซับน้ำพบว่าเมื่อผสมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์มีค่าการดูดซับน้ำลดลง และการย่อยสลาย โดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์ที่ผสมเส้นใยมีแนวโน้มต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์ที่ไม่ได้เติมเส้นใย [23]

2.8.5 Dasaiah. *et al.* (2016) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานของฟิล์มไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC) ที่สามารถรับประทานได้ร่วมกับพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ต่างกัน 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล (GLY) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ซึ่งขึ้นรูปฟิล์มโดยการหล่อแบบตัวทำละลาย โดยมีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ต่างกันดังนี้ 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณ GLY และ PEG เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสลดลง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุดของฟิล์มไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุดลดลงเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นถึง 0.04 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ฟิล์ม HPMC/PEG มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าฟิล์ม HPMC/GLY เนื่องจากความยาวของสายโซ่ ความเป็นขั้ว และจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน โดยที่ PEG มีจำนวนออกซิเจนอะตอมที่น้อยกว่า และมีระยะห่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่น้อยกว่า GLY จึงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้น้อย ส่งผลให้ฟิล์ม HPMC/PEG มีความแข็งแรงต่ำกว่าฟิล์ม HPMC/GLY ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำ ฟิล์ม HPMC ที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์มีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสบริสุทธิ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพลาสติกไซเซอร์ ฟิล์ม HPMC/GLY มีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลงตามปริมาณ GLY ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟิล์ม HPMC/PEG มีอัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PEG ที่เพิ่มขึ้นและการใส่พลาสติกไซเซอร์สามารถเพิ่มอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน โดยมีการทดสอบการซึมผ่านออกซิเจนพบว่าฟิล์มไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสบริสุทธิ์ มีการซึมผ่านออกซิเจนที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นฟิล์มไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสจึงเหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร [24]

2.8.6 คทา วุฑ และคณะ (2555) งานวิจัยนี้ผู้วิจัยสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิล เพื่อใช้เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและการต้านทานความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรกซ์ ไปโอคอมพอสิตถูกเตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลต่อแป้งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสปริมาณ 0 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $6.69 \pm 0.29$  MPa) และค่ามอดุลัสสูงสุด ( $137.40 \pm 3.84$  MPa) เพิ่มขึ้น 305 และ 546 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีเสริมแรง ความเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการย่อยสลายทางความร้อนของไบโอคอมพอสิตเพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงการยึดติดกันอย่างดีระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเซลลูโลส [6]

2.8.7 ญัฐธา และคณะ (2561) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยการใช้และไม่ใช้กรดแลคติก และเสริมแรงด้วยกลบในปริมาณที่ต่างกัน 0, 5, 10, 15 และ 20 phr ตามลำดับ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และแมกนีเซียม สเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น เมื่อนำไปทดสอบความเป็นผลึก การดูดความชื้น และสมบัติเชิงกล พบว่ากรดแลคติกทำให้มีพื้นผิวเรียบและดูดซับความชื้นมากขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่ความหนืดและความเป็นผลึกลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงไปด้วย ในขณะที่ปริมาณกลบเพิ่มขึ้นทำให้ดูดความชื้นน้อยลง แต่ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ปรับปรุงด้วยกรดแลคติกและเสริมแรงด้วยกลบ 20 phr มีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด [25]

2.8.8 Ghanbari. et al. (2018) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS) จากแป้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติมเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNFs) เพื่อเสริมแรงต่อสมบัติของฟิล์ม TPS นาโนคอมพอสิตที่มี 0.5, 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเนื้อ CNFs ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของ TPS ด้วยการเติม CNFs เนื่องจากมีการกระจายตัวและมีการยึดเกาะที่ดี ระหว่าง CNF กับเมทริกซ์ TPS ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต TPS/CNF นอกจากนี้ทดสอบด้วยเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลซิสและดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณสาร CNF ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต สำหรับการกระจายตัวของ CNFs ภายในเมทริกซ์ TPS มีความสม่ำเสมอและพื้นผิวของฟิล์ม TPS/CNF มีความเรียบ ส่วนการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิต TPS/CNF มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย [26]

2.8.9 Edhirej. et al. (2015) งานวิจัยนี้ศึกษารายละเอียดของการนำส่วนประกอบต่างๆ ในมันสำปะหลังมาพัฒนาเป็นพลาสติกชีวภาพเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมยา และบรรจุภัณฑ์ จากการทดลองพบว่าส่วนของรากนิยมนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ้ทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมากที่สุด เนื่องจากได้ปริมาณแป้งมาก กรองแยกออกมาเป็น  
 ้ไม่วาร์ณี้ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยที่สามารถเสริมแรงได้ มีโปรตีนน้อย ในส่วนของใบมีโปรตีนมากและมีสารประกอบที่สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้จึงมักจะถูกนำไปทำเป็นยา และส่วนของเปลือกสามารถนำไปหมักเป็นแก๊สชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มาจากรสส่วนรากผสมกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซอรอลในปริมาณที่ต่างกัน ดังนี้ 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ พบว่า ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกลีเซอรอล จนถึงที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำจึงลดลง สำหรับความสามารถในการละลายน้ำและความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาทดสอบเชิงกลพบว่า ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น [27]

2.8.10 Fazeli. *et al.* (2019) งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมและพิสูจน์ลักษณะของคอมพอสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ชีวภาพโดยมีเส้นใยเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรงภายในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกันระหว่างแป้งข้าวโพดและกลีเซอรอล โดยผสมแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 75 : 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงเติมเส้นใยเซลลูโลสลงไปปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง วัสดุคอมโพสิต TPS/CF ขึ้นรูปโดยกระบวนการกดอัด พบว่าพอลิเมอร์จากแป้งมีข้อจำกัด เนื่องจากสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามมีการปรับปรุงโดยการขึ้นรูปแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS) เป็นเมทริกซ์และเส้นใยเซลลูโลส (CF) เป็นส่วนเสริมแรง พื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสได้รับการปรับปรุงโดยใช้กระบวนการพลาสมาพ่นด้วยอากาศ (Air plasma treatment) เพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของเมทริกซ์และเส้นใย ผลของการทดสอบแรงดึงและภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและเมทริกซ์ TPS จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก พบการสลายตัวของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อุณหภูมิประมาณ 250-350 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลึกของคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ TPS ที่ไม่มีส่วนเสริมแรง [28]

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ตรา ปลาไทย 5 ดาว ผลิตจาก บริษัท อี. ที. ซี. เอียบตงจัน จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.27±0.13
โปรตีน	0.11±0.01
ไขมัน	0.07±0.02
เส้นใย	0.12±0.03
เถ้า	0.25±0.03
แป้ง	
- อะมิโลส	15.90-22.40
- อะมิโลเพกทิน	61.59-83.00

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.2 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดทางการค้า จากบริษัท Lab System

3.1.3 น้ำมันซิลิโคน จากบริษัท Dow Corning Corporation

3.1.4 ไฮดรอกซีพროพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose) จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส

Test	Unit	Lower Limit	Upper Limit	Value
Methoxyl	%	27.0	30.0	29.1
Hydroxypropoxyl	%	4.0	7.5	6.0
Sodium Chloride	%	---	1.5	0.2
Moisture	%	---	5.0	3.7
Viscosity at 20degC	cP	3500	5600	4911
Particle Size (40 mesh)	%	99.0	---	100.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

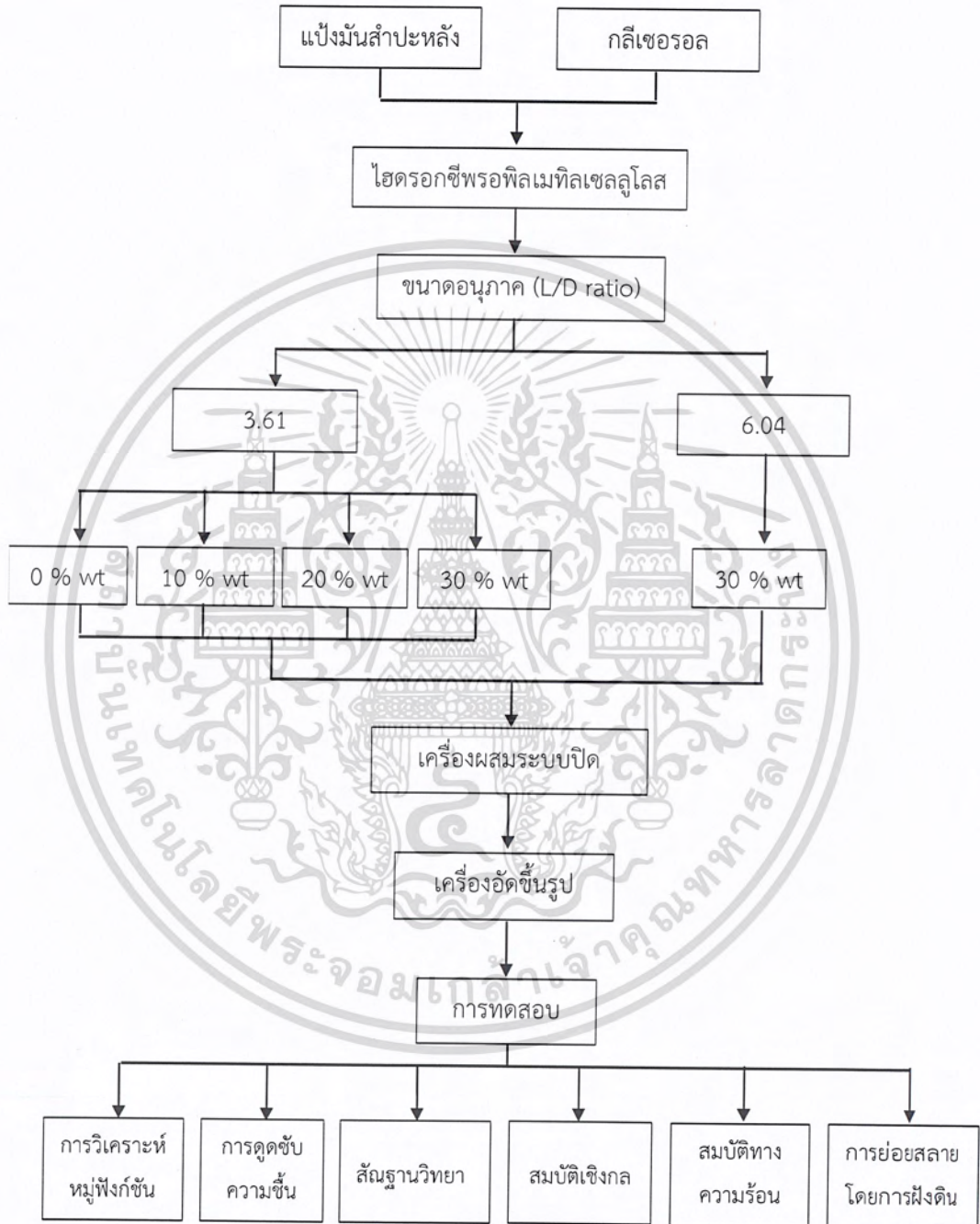
### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : BRABENDER รุ่น PL 2000/PL 2001
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) : บริษัท แมช กรุป (1992) จำกัด รุ่น MGLP-20AT
- 3.2.3 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : บริษัท LLOYD INSTRUMENT จำกัด รุ่น LR 5K
- 3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : FEI รุ่น QUANTA 250
- 3.2.5 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
- 3.2.7 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ : CEAST รุ่น 6052
- 3.2.8 เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (g) : Precisa Instrument
- 3.2.9 แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมหนา 2 มิลลิเมตร
- 3.2.10 ฤงมือกันความร้อน
- 3.2.11 เกรียง
- 3.2.12 แผ่นฟิล์มใสถ่ายเอกสาร
- 3.2.13 ฤงชิปล็อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

แผนภาพแสดงงานวิจัยในโครงการพิเศษนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง

1. ผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 65 : 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. หมักแป้งและกลีเซอรอลให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ชั่งน้ำหนักแป้งผสมกับกลีเซอรอลที่หมักไว้มา 50 กรัม และนำมาใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาในการผสมเป็นเวลา 5 นาที

### 3.3.2 การเตรียมไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลส

1. ไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 เตรียมจากการนำไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลสมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35–75 mesh
2. ไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 เตรียมจากการนำไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลสมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 100 mesh
3. เมื่อร่อนเสร็จแล้ว จึงนำไปเก็บแยกแต่ละขนาดใส่ในถุงซิปล็อค

### 3.3.3 การเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลส

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลส ที่ใช้ในการเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิล

แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/d ratio) ไฮดรอกซีพอพิลเมทิลเซลลูโลส (กรัม)	
		3.61	6.04
65.0	35.0	0	0
58.5	31.5	10	0
52.0	28.0	20	0
45.5	24.5	30	0
45.5	24.5	0	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งน้ำหนักแบ่งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลที่หมักไว้และไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลส ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน ตารางที่ 3.3 จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที

### 3.3.4 การขึ้นรูปคอมพอลิเมอร์โพลลาสติกสตาร์ชจากแบ่งมันสำปะหลัง

1. ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมพอลิเมอร์ที่ได้จากเครื่องผสมระบบปิดด้วยเครื่อง กดอัด โดยใช้แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อน แล้วจึงทา น้ำมันซิลิโคนลงบนแม่พิมพ์ในด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมพอลิเมอร์ แล้วประกบ ด้วยแผ่นฟิล์มใสแยกสาร

2. วางคอมพอลิเมอร์โพลลาสติกสตาร์ชลงบนแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปขึ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดัน เฉลี่ย 1700 psi จากนั้นจึงทำการหล่อเย็นอีกเป็นเวลา 5 นาที

3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ เพื่อใช้ในการทดสอบ สมบัติเชิงกลต่อไป

## 3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ เกี่ยวกับโมเลกุลของสารหรือหาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ใน ชิ้นงานตัวอย่าง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด wave number อยู่ใน ช่วง 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียม คือ อบไล่ความชื้นก่อนที่อุณหภูมิ 105 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานมา 2-3 มิลลิกรัม และนำมาบดให้เข้ากันกับ โพลเทสซีเอ็มโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ในโกร่งบดสารและบดให้ละเอียดโดยทำให้มี การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงใส่ชิ้นงานที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่อง อัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ  $10^{-4} \text{ kg/cm}^2$  ที่ไว้ 5 นาที จากนั้นถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ชิ้นงานจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส ชิ้นงานตัวอย่างจะกระจายอยู่บนโพลเทสซีเอ็ม โบรไมด์ นำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR

### 3.4.2 การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E104 โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปจำนวน 3 ชิ้น ต่อ 1 สูตร เริ่มจากการนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึกไว้ จากนั้นนำไปวางไว้ในห้องที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ  $99 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยต้องนำชิ้นงานมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน เป็นเวลา 7 วัน

เปอร์เซ็นต์ปริมาณการดูดซับความชื้นคำนวณได้จาก

$$M_t = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น

$W_w$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ

$W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

### 3.4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และหักทันที หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานตัวอย่างไปเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาถึงภาคตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่างๆ เพื่อดูการกระจายตัวของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเมทิลเซลลูโลสในคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลัง และรอยแยกระหว่างวัฏภาคในชิ้นงานตัวอย่าง

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดูลัส (Young 's modulus)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Percentage of Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์  $60 \pm 2$  เปอร์เซ็นต์ ทดสอบดังสภาวะ ดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 100 N

ความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดุลัส} = \frac{F}{A} \times \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง

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

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

#### 3.4.5 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

โดยตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ชิ้น ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 และ 5 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

#### 3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

ศึกษาสมบัติทางความร้อน อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% Weight) ของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังในช่วงอุณหภูมิ 235-295 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer หรือ TGA โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 10-12 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ที่อุณหภูมิในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อได้ TGA เทอร์โม

เอกสารถึงแกรมแล้ว จึงนำมาทำเป็นอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram, DTG) โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมกันในอัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 65 : 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของขนาดและปริมาณของสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่าง ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) และนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน อักษรย่อของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ให้ผลการทดลอง ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

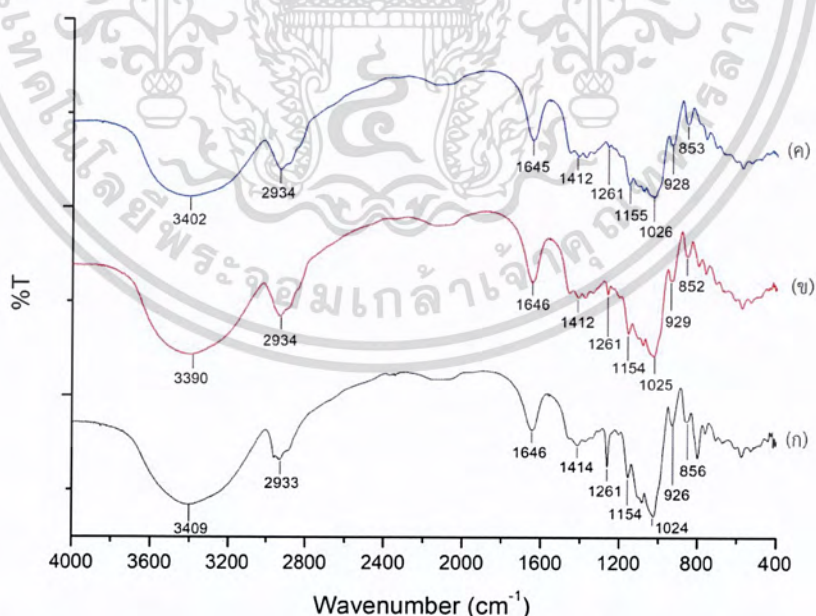
ลำดับ	สูตร/อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	TPCS	เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ยังไม่ได้ปรับปรุง
2	TPCS/10HPMC3.61	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง
3	TPCS/20HPMC3.61	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	สูตร/อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
4	TPCS/30HPMC3.61	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง
5	TPCS/30HPMC6.04	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

#### 4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

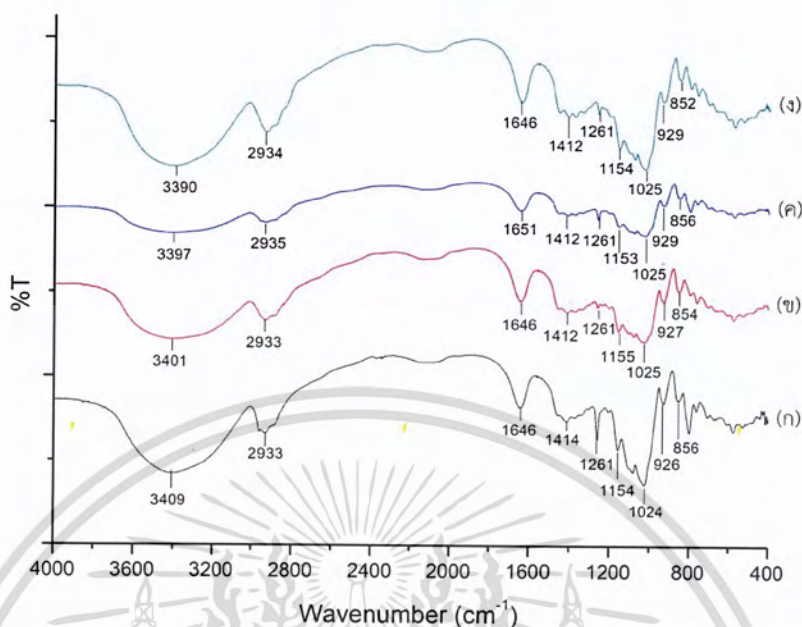
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณต่างกัน โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังสูตร

ต่างๆ (ก) TPCS (ข) TPCS/30HPMC3.61 และ (ค) TPCS/30HPMC6.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง สูตรต่างๆ (ก) TPCS (ข) TPCS/10HPMC3.61 (ค) TPCS/20HPMC3.61 และ (ง) TPCS/30HPMC3.61

จากรูปที่ 4.1 (ก) และ 4.2 (ก) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง พบพีกความยาวคลื่นที่  $3409\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พีกความยาวคลื่นที่  $2933\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พีกความยาวคลื่น  $1646\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงลักษณะการสั่นของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในโครงสร้างแป้ง พีกความยาวคลื่นที่  $1414\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending พีกความยาวคลื่นที่  $1261\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นของ C-O stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พีกความยาวคลื่น  $1154\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-O stretching จากแป้ง พีกความยาวคลื่น  $1024\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending และพีกความยาวคลื่นที่  $926$  และ  $856\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-H bending ในโมเลกุลแป้ง [29-30]

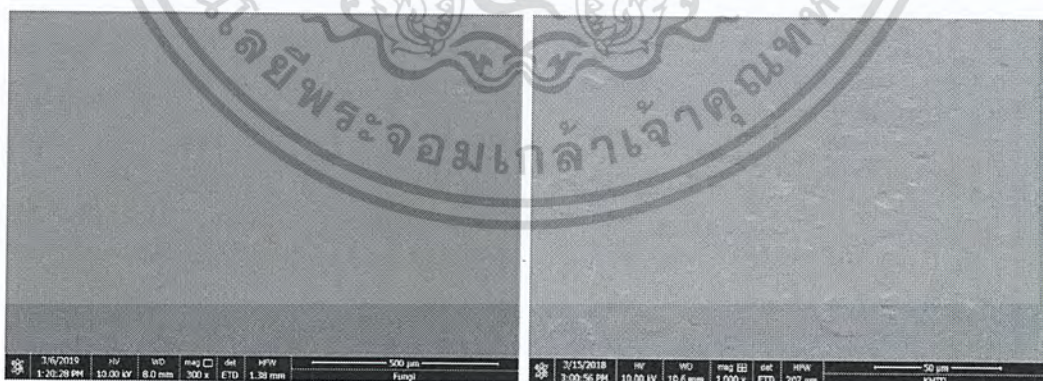
เมื่อเติมไฮดรอกซีพวอฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 (ข)-(ค) และในปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ดังรูปที่ 4.2 (ข)-(ง) พบอินฟราเรดสเปกตรัม

มีลักษณะคล้ายคลึงกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างเป็นสารพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน [15-16] และพบว่าพีคความยาวคลื่นที่  $1261\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นของ C-O stretching มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส เนื่องจากแป้งในสูตรผสมมีปริมาณลดลง นอกจากนี้พบว่าพีคความยาวคลื่นที่  $3409\text{ cm}^{-1}$  และ  $1414\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending ตามลำดับ เกิดการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง แสดงให้เห็นว่ามีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส [23] เนื่องจากสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังกับไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส และเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้พีคแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อนที่ไปยังความยาวคลื่นลดลงตามลำดับ เพราะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น และไม่พบพีคใหม่ปรากฏขึ้น

#### 4.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์โม่พลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า เพื่อศึกษาขนาดอนุภาค การกระจายตัว และการเข้ากันได้ของคอมพอลิเมอร์โม่พลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังกับไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส โดยให้ผลการทดลองดังนี้



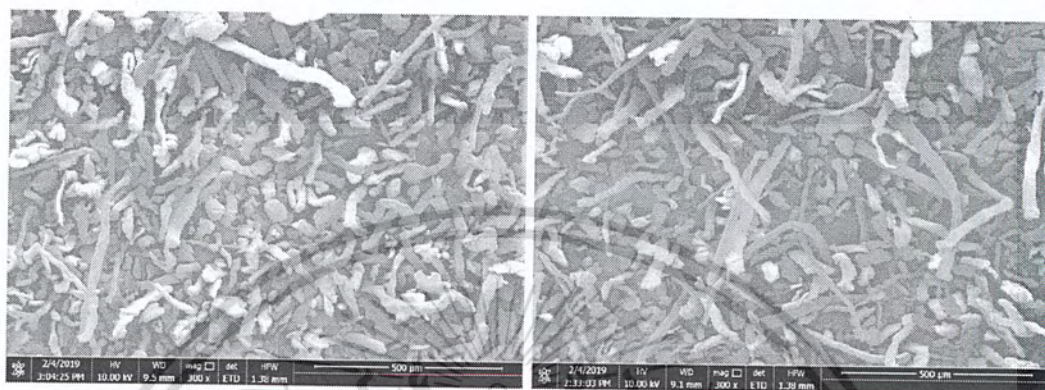
(ก) TPCS, 300X

(ข) TPCS, 1500X

#### รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของเทอร์โม่พลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก)-(ข) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงถึงส่วนของเม็ดแป้งในชิ้นงานมีการหลอมได้อย่างสมบูรณ์



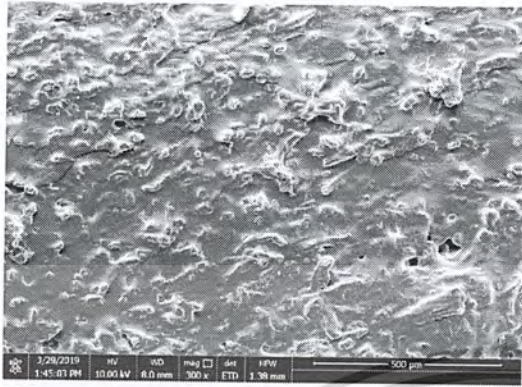
(ก) HPMC3.61, 300X

(ข) HPMC6.04, 300X

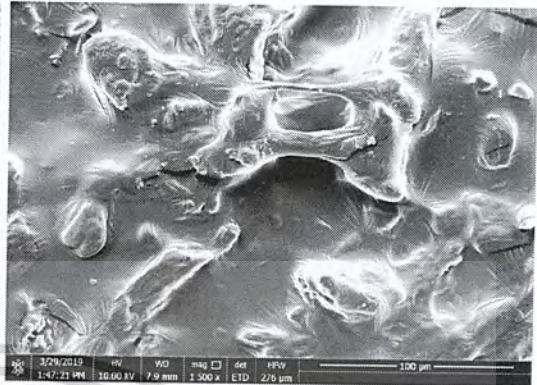
#### รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.4 (ก)-(ข) แสดงลักษณะภาพพื้นผิวของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ (ภาคผนวก ข)

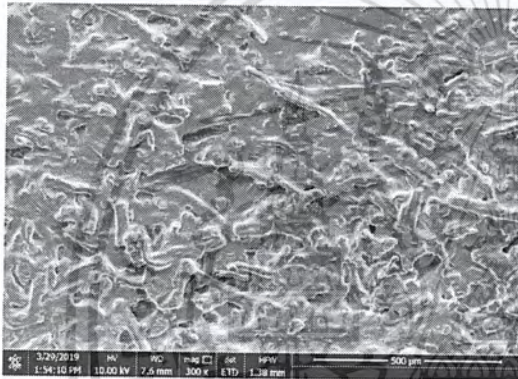
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



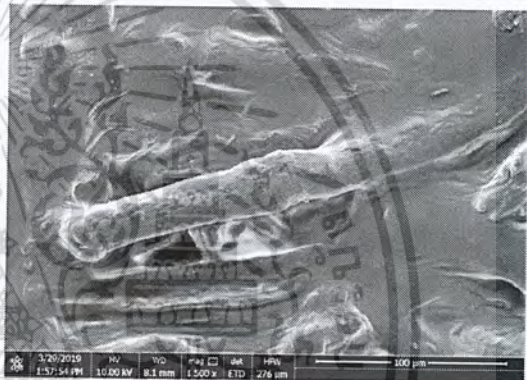
(ก) TPCS/30HPMC3.61, 300X



(ข) TPCS/30HPMC3.61, 1500X



(ค) TPCS/30HPMC6.04, 300X



(ง) TPCS/30HPMC6.04, 1500X

รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะสันฐานวิทยาของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 300 และ 1500 เท่า พบว่าไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสมีการกระจายตัวทั่วเมทริกซ์ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และฝังตัวในเมทริกซ์ของแป้งได้ดี มีภาวะการเปียกของพื้นที่ผิว (Surface wetting) ที่ดี ส่งผลให้ไม่มีรอยแยกระหว่างวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของทั้งสองวัฏภาค เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและการค้า

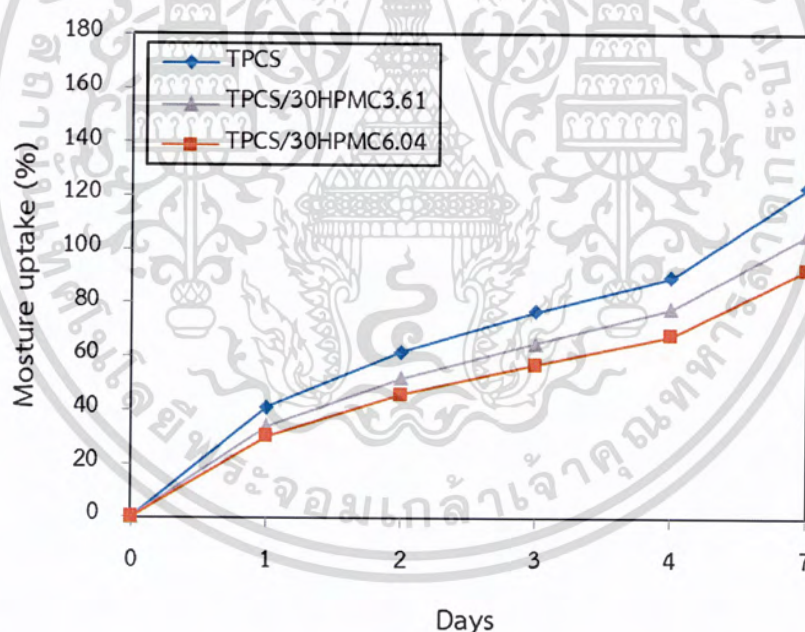
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



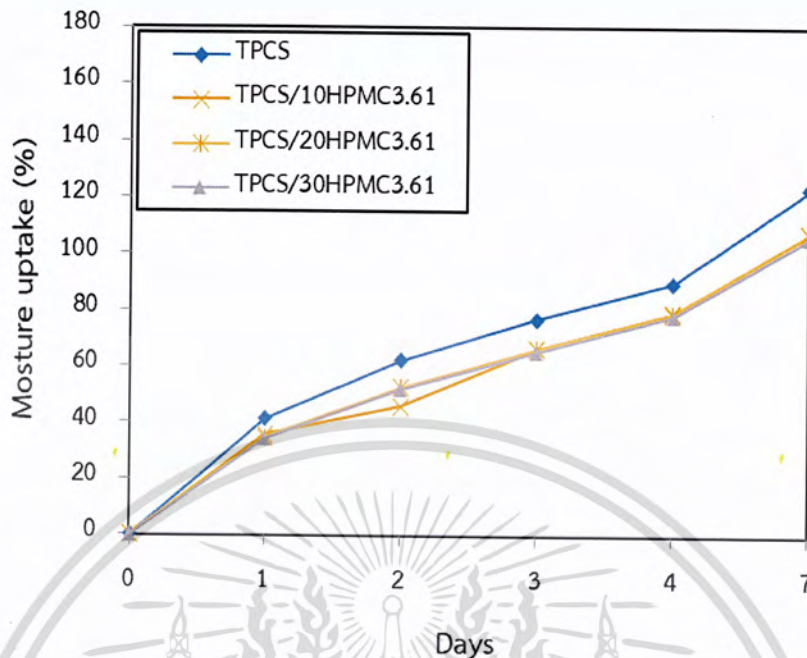
เฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าปริมาณไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมากขึ้น และมีภาวะการเปียกของพื้นที่ผิวที่ดี ส่งผลให้ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสสามารถเข้ากันได้ดีกับแป้ง และมีกระจายตัวที่ดี แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของทั้งสองวัสดุ

#### 4.3 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

การดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน ทดสอบโดยนำไปวางในบรรยากาศภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ  $30 \pm 3^{\circ}\text{C}$  นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักทุกวัน โดยให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

จากรูปที่ 4.7-4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลส ที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสูตร หลังจากนั้นวันที่ 7 มีราเกิดขึ้นที่ชิ้นงาน จึงหยุดการทดสอบ

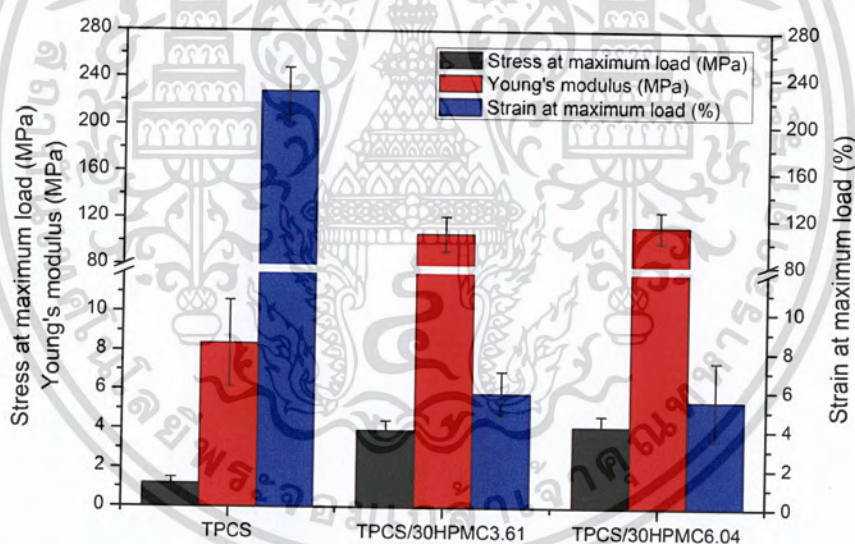
จากการทดลองพบว่าคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสมีแนวโน้มการดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากโครงสร้างของไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระน้อยกว่าแป้ง ส่งผลให้มีสมบัติความชอบน้ำน้อยกว่าแป้ง นอกจากนี้คอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ที่ปรับปรุงด้วยไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย 3.61 มีแนวโน้มการดูดซับความชื้นมากกว่าคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ที่เสริมแรงด้วย

ไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

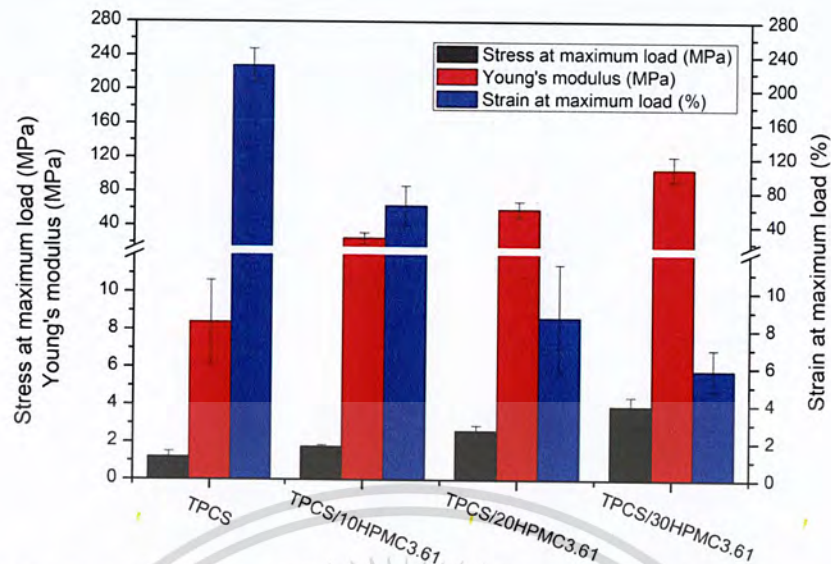
(รูปที่ 4.7) เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับความชื้นมากขึ้น ในขณะที่คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรทซ์ที่เสริมแรงด้วยไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสในปริมาณต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแบ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรทซ์ที่ปรับปรุงด้วยไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแบ่ง มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด

#### 4.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรทซ์จากแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณต่างกัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine เพื่อศึกษาค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส โดยให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9-4.10



รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรทซ์จากแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแบ่ง



รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

จากรูปที่ 4.9–4.10 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณต่างกัน พบว่าคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสทุกสูตร มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เสริมแรง และมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพีคที่ตำแหน่ง O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อนไปยังความยาวคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.1-4.2) แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีค่าลดลง เนื่องจากไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรง ทำให้คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยืดออกและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นไปได้ยากมากขึ้น [6] และจากรูปที่ 4.9 พบว่าผลของที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 และ 3.61 ตามลำดับ ไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพบว่าผลของปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่าผลของขนาดอนุภาค (จากรูปที่ 4.9–4.10) คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ของเอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

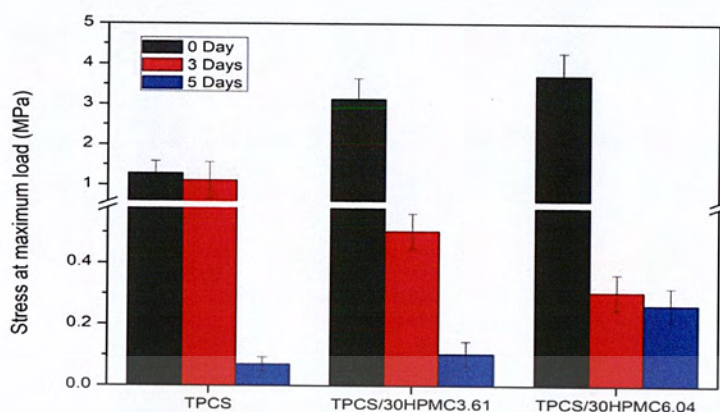
แข็งแรง มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสสูงที่สุดอย่างชัดเจน กล่าวคือ มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดจาก  $1.19 \pm 0.30$  เพิ่มขึ้นเป็น  $3.92 \pm 0.50$  MPa และค่ามอดุลัสจาก  $8.39 \pm 2.23$  MPa เพิ่มขึ้นเป็น  $106.89 \pm 14.79$  MPa เนื่องจากไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสมีโครงสร้างเคมีเป็นพอลิแซคคาไรด์สายโซ่ยาว จึงมีลักษณะเป็นเส้นใยสามารถยึดกันได้ดีกับแป้ง ไม่มีรอยแยกระหว่างวัฏภาคทำให้สามารถรับและส่งผ่านแรงเชิงกลได้ดี (รูปที่ 4.6) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiménez. และคณะ ที่ทำการศึกษาฟิล์มที่บริโภาคได้จากแป้งข้าวโพดผสมไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ 100 : 0, 75 : 25, 50 : 50 และ 0 : 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง เตรียมโดยการเทหล่อ ผลการทดลองพบว่าการเติมไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่มาจากแป้งข้าวโพดเพียงอย่างเดียว [7]

#### 4.5 การย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation properties)

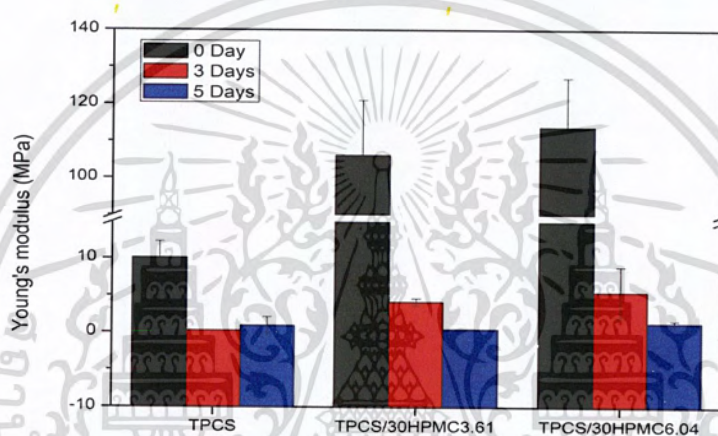
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน สามารถทำได้โดยนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสไปฝังดินและควบคุมความชื้นของดินที่ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 และ 5 วัน จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11-4.12

จากการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกลหลังการฝังดินของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทุกสูตร มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน (รูปที่ 4.11-4.12) เนื่องจากคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีส่วนประกอบของแป้งซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบหลัก จึงสามารถดูดความชื้นจากดินได้ รวมทั้งเกิดการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ในดิน [31] ส่งผลให้คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสมบัติเชิงกลลดลงหลังการฝังดิน ในขณะที่ค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งและอนุภาคของไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสสามารถดูดความชื้นจากในดิน ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความนิ่มตัวและดึงยึดได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ จันจิรา และคณะ ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งท้าววม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ขึ้นรูปโดยการกดอัด พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนการฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานดูดความชื้นภายในดิน ทำให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว [32] นอกจากนี้จากการศึกษาผลของขนาดและปริมาณของไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ต่างกัน พบว่าไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

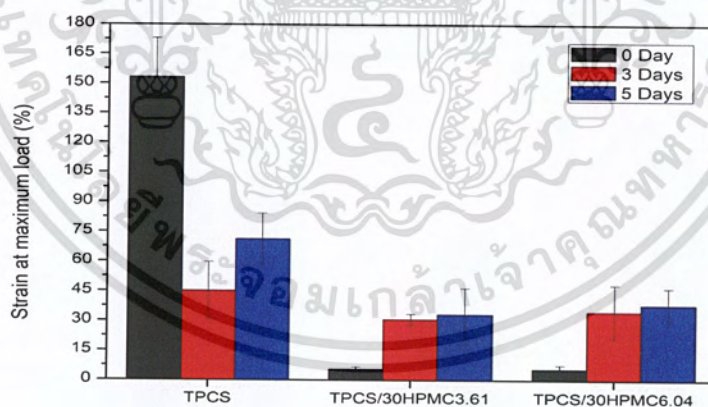
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

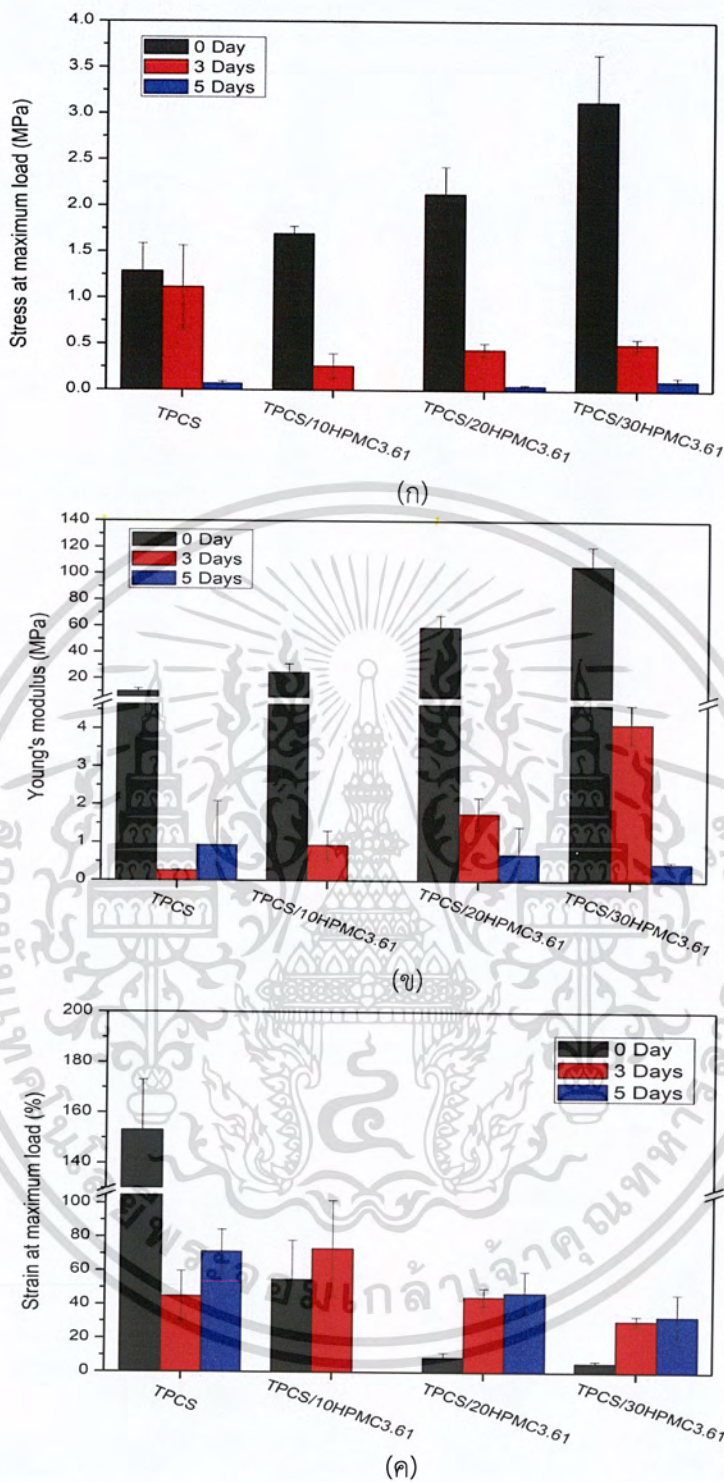


(ค)

รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรง

ดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ (ค) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

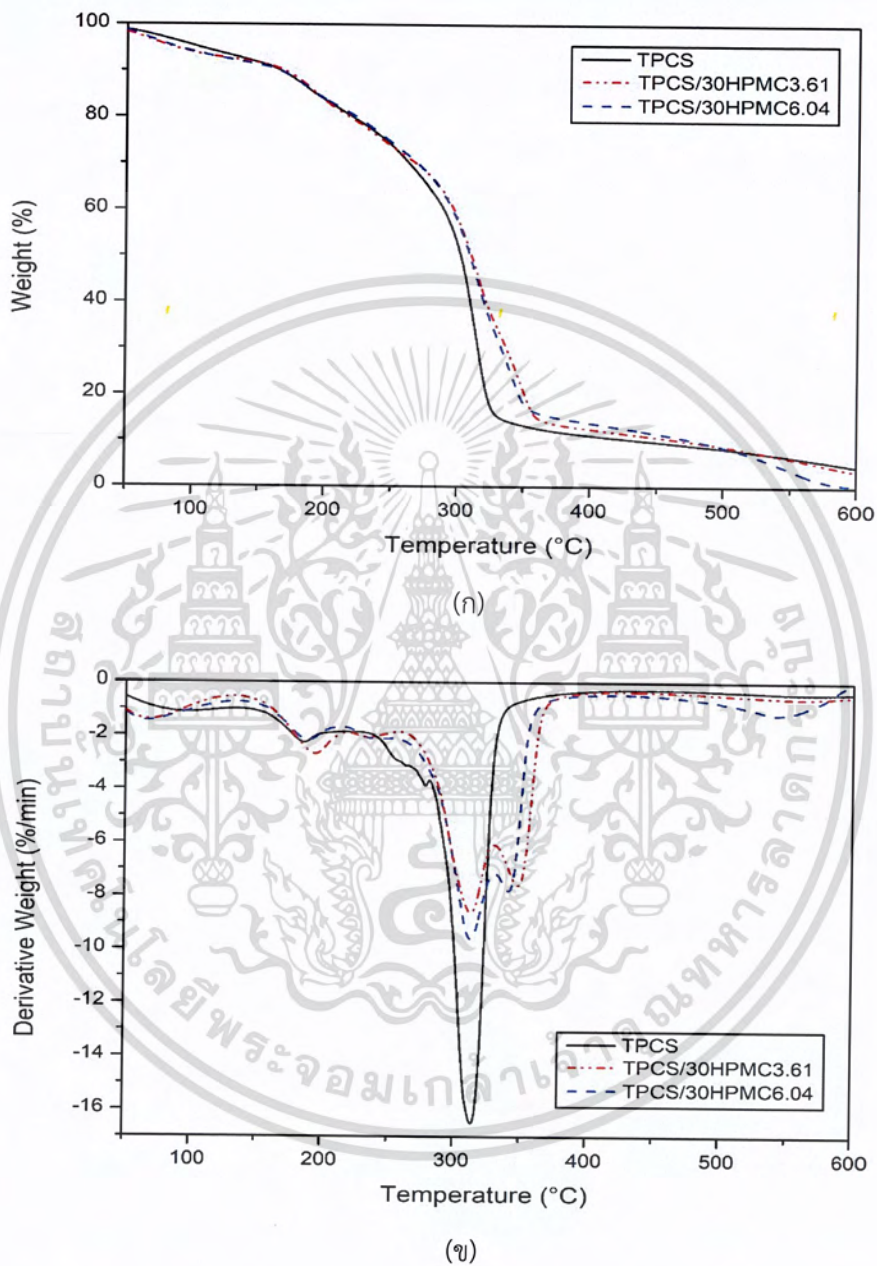
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (Maximum degradation temperature) ด้วยการใช้เครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer) ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ( $N_2$ ) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13-4.14 และตารางที่ 4.2

จากรูปที่ 4.14-4.15 และตารางที่ 4.2 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิล มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 184.9 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้ง ที่อุณหภูมิ 313.8 องศาเซลเซียส [25] และคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของกลีเซอรอล ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้ง และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส โดยไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส มีอุณหภูมิการสลายตัวที่อุณหภูมิ 341.1 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ฉ)

โดยผลการทดสอบพบว่า เมื่อเติมไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และผลการทดสอบของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย 3.61 และ 6.04 พบว่าขนาดไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการสลายตัวของแป้ง แต่เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น คาดว่าเนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่สูงกว่าแป้ง และพบว่าชิ้นงานที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแป้งที่หายไปในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ 235-295 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่ลดลง โดยผลของการปรับปรุงด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแป้งที่หายไปแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าขนาดไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิล และผลของการปรับปรุงด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน พบว่า

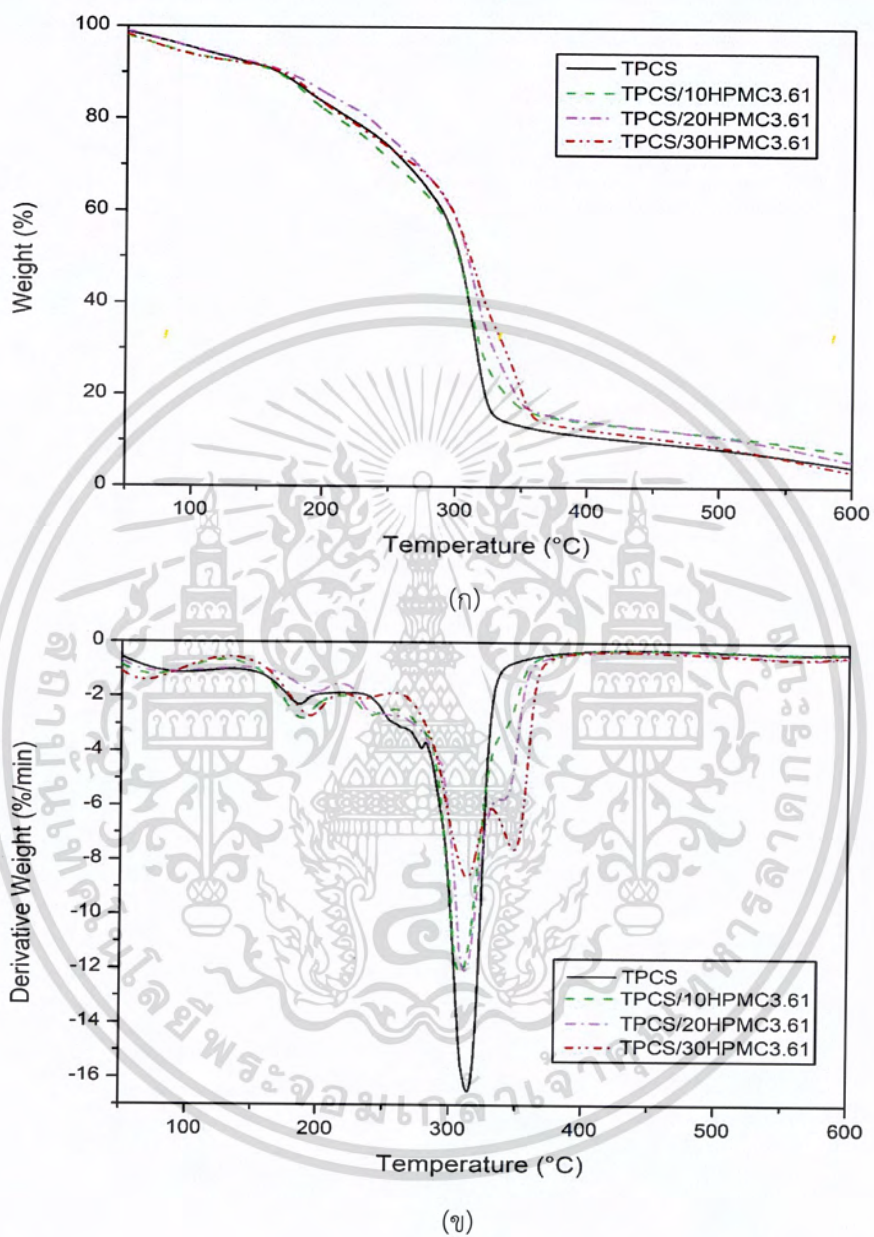
ไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์พลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ( $^{\circ}\text{C}$ )				น้ำหนัก ของแป้งที่ หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งที่เสีย สภาพจาก ความร้อน)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	ช่วงที่ 4 (HPMC)	
TPCS	184.9	257.3 , 277.9	313.8	-	79.90
TPCS/10HPMC3.61	187.3	239.3 , 295.2	307.7	349.2	50.76
TPCS/20HPMC3.61	197.5	244.3 , 285.6	311.6	341.3	44.24
TPAS/30HPMC3.61	194.2	234.6	312.0	347.8	32.06
TPCS/30HPMC6.04	187.3	239.8	312.6	340.7	34.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 และ 6.04 ตามลำดับ ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง โดยมีลิเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมกันด้วยเครื่องผสมระบบปิด ขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด และนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าสเปกตรัมที่ได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลคอมพอลิเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลส ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน สเปกตรัมที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับแป้งมันสำปะหลัง และส่งผลให้ตำแหน่งเลขคลื่นของการสั่นแบบ O-H Stretching และ O-H bending เปลี่ยนแปลงไป โดยเกิดการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง และไม่พบพีคใหม่ปรากฏขึ้น

5.1.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่ามีอนุภาคของไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสกระจายตัวอยู่ทั่วเมทริกซ์ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีน ไม่มีรอยแยกระหว่างวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลส แสดงถึงความเข้ากันได้ของทั้งสองวัฏภาค และเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลส มีอนุภาคของไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้น

5.1.3 จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง และผลของขนาดอนุภาคไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสส่งผลต่อค่าการดูดซับความชื้นมากกว่าผลของปริมาณ โดยคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลสที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นน้อยที่สุด

5.1.4 จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอร์ฟิเลทิลเซลลูโลส มีสมบัติเชิงกล คือ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกลมากกว่าผลของขนาดอนุภาค เมื่อเพิ่มปริมาณของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซมีสมบัติเชิงกล คือ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น และคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง มีสมบัติเชิงกล คือ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสสูงที่สุด

5.1.5 จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการฝังดินของเทอร์โพลอสติกสตาร์ซ มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสลดลง ในขณะที่คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสลดลง แต่ค่าความเครียด ณ จุดสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซก่อนการฝังดิน

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเมื่อเติมไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โพลอสติกสตาร์ซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดต่างกัน มีอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

5.1.7 จากการศึกษา พบว่าผลของขนาดอนุภาคไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อการดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซ และผลของปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลส ไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายโดยการฝังดินและสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซ

5.1.8 สูตรที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพรอพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 โดยสามารถพิจารณาได้จาก สมบัติเชิงกล คือค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึง และค่ามอดุลัสสูงที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติให้ชิ้นงานดูดซับความชื้นให้น้อยลง โดยการปรับปรุงพื้นผิวของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยสารอื่นที่ไม่มีขั้ว เช่น แร่ซิลิโคนชนิดต่างๆ ที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ

5.2.2 ศึกษาและปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลให้มีความทนทานต่อการเกิดเชื้อรามากขึ้น โดยการเติมสารป้องกันเชื้อรา เช่น กรดซาลิซิลิก กรดแอสซิติค หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพศาล นาคพิพัฒน์. 2547. “พลาสติกกับชีวิตในปัจจุบัน.” สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. เล่มที่ 28 : 231-263.
- [2] รังรอง ยกसान, น้ำฝน ลำดับวงศ์, อำพร เสน่ห์ และชนิษฐา วัชรภรณ์. “พลาสติกชีวฐานจากพืชเศรษฐกิจไทย” [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/03-foods/rungrong/food\\_00.html](http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/03-foods/rungrong/food_00.html). 2561
- [3] กลุ่มสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2561. “มันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์.” ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ : 2-11.
- [4] สถาพร นิมกุลรัตน์. 2548. “สารเพิ่มความหนืด.” เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีเภสัช 2 สาขาวิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม, คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [5] Oguz, S. Tam, N. Aydogdu, A. Sumnu, G. and Sahin, S. 2017. “Development of novel pea flour-based nanofibres by electrospinning method.” *Development of novel pea flour-based nanofibres by electrospinning method*. 53(5) : 1269-1277
- [6] Pachana, K. Wattanakornsiri, A. and Kaewpirom, S. 2012. “Physical Properties of Thermoplastic Glutinous Rice Starch Reinforced with Recycled Newspaper Cellulose Fibers.” *Burapha Science Journal*, 17 : 13-23.
- [7] Jiménez, A. Fabra, M.J. Talens, P. and Chiralt, A. 2012. “Influence of Hydroxypropyl methylcellulose addition and Homogenization Conditions on Properties and Ageing of Corn Starch based Films.” *Carbohydrate Polymers*. 89 : 676-686.
- [8] กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติก สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย และ สถาบันพลาสติก. 2559. *Plastic story พลาสติกแสนดีมีอยู่รอบตัว*. กรุงเทพฯ : สถาบันพลาสติก.
- [9] ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556.
- [10] จุฑากานต์ บุญมี. 2555. “พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastic) ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่16(2) : 15-19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ยศธร ธเนศรุ่งโรจน์. “ผลของชนิดแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [12] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [13] จิรพรรณ หน่ายคอน และมาริกา ตันตลักขณา. “วัสดุคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิฟิโอฟิลีนกับเส้นใยอ้อย” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [14] Lee, S. 2561. “Composites” [Online]. Available : <http://app.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/1302212/c11%20Composite.ppt>.
- [15] Vlis, J.V.D. and Loos, K. 2007. “Amylose and Amylopectin Hybrid Materials via Enzymatic Pathways.” *Macromolecular Symposia*. 254(1) : 54-61.
- [16] Tanja, W. 2012. *Cellulose and Cellulose Derivatives in the Food Industry*. 2. Weinheim, Germany : Wiley-VCH.
- [17] อรุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] John, M.J. and Thomas, S. 2012. *Natural Polymer*. Cambridge : The Royal Society Of Chemistry.
- [19] Wikipedia the free encyclopedia. 2560. “Glycerol” [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Glycerol>.
- [20] รังรอง ยกถ่าน. 2557. *พลาสติกชีวฐาน*. กรุงเทพฯ : Asia Digital การพิมพ์.
- [21] ปรรารถนา คำใส ลัดดาวัลย์ เณรยอต และต้นสนีย์ เกตุอ่วม. “ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [22] Toro, R.O. Jiménez, A. Talens, P. and Chiralt, A. 2014. “Properties of Starch-Hydroxypropyl Methylcellulose based Films obtained by Compression Molding” *Carbohydrate Polymers*. 109 : 155-165.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] สุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน, สุวัฒน์ เมืองทะ และอารีญา หาญชนะ. 2554. “สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] Dasaiah, M. Shivakumara, L.R. Demappa, T. and Singh, V. 2016. “Mechanical and Barrier Properties of Hydroxypropyl methylcellulose Edible Polymer Films with Plasticizer Combinations.” *Journal of Food Processing and Preservation*. 41(4) : e13020
- [25] ณีฐา ปัญญาวัฒน์กุล, นวภูมิ พลัง และพรกนก พุสามป็อก. 2560. “อิทธิพลของกรดแลคติกที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยแกลบ.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] Ghanbari, A. Tabarsa, T. Ashori, A. Shakeri, A. and Mashkour, M. 2018. “Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch and Cellulose Nanofibers as Green Nanocomposites: Extrusion Processing.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 112 : 442-447.
- [27] Edhirej, A. Sapuan, S.M. Jawaid, M. and Zahari, N.I. 2015. “Cassava: Its Polymer, Fiber, Composite, and Application.” *POLYMER COMPOSITES*. 38(3) : 555-570.
- [28] Fazeli, M. Florez, J.P. and Simão, R.A. 2019. “Improvement in Adhesion of Cellulose Fibers to The Thermoplastic Starch Matrix by Plasma Treatment Modification” *Composites Part B: Engineering*. 163 : 207-216.
- [29] Lomli-Ramirez, M.G. Barrios-Guzman, A.J. Garcia-Enriquez, S. Rivera-Prado, J.J. and Manriquez-Gonzalez, R. 2014. “Chemical and mechanical evaluation of bio-composites based on thermoplastic starch and wood particles prepared by thermal compression.” *BioResources*. 9(2) : 2960-2974.
- [30] Gunzler, H. and Gremlich, H.U. 2002. *IR Spectroscopy*. German. WILEY-VCH
- [31] Munlika, B. and Kaewtatip, K. 2013. “Biodegradation of thermoplastic starch / eggshell powder composites.” *Carbohydrate Polymers*. 97(2) : 315-320.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] จันจิรา จันทร์แจ่ม เพียงฟ้า สิงห์อุดม และศศิกร ภูมิแก้ว. 2558. “การปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิทย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลของแป้งท้าวยายม่อม เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



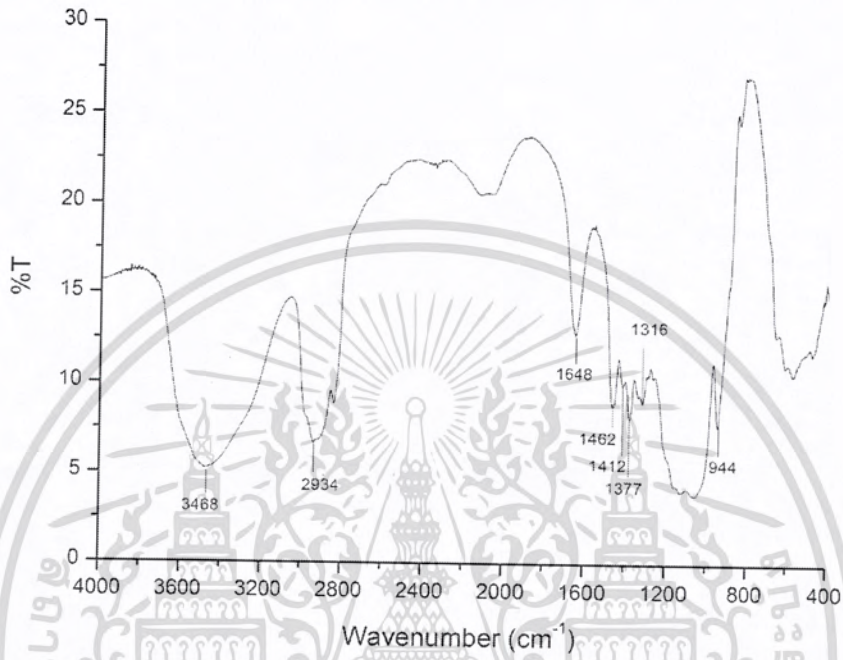
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



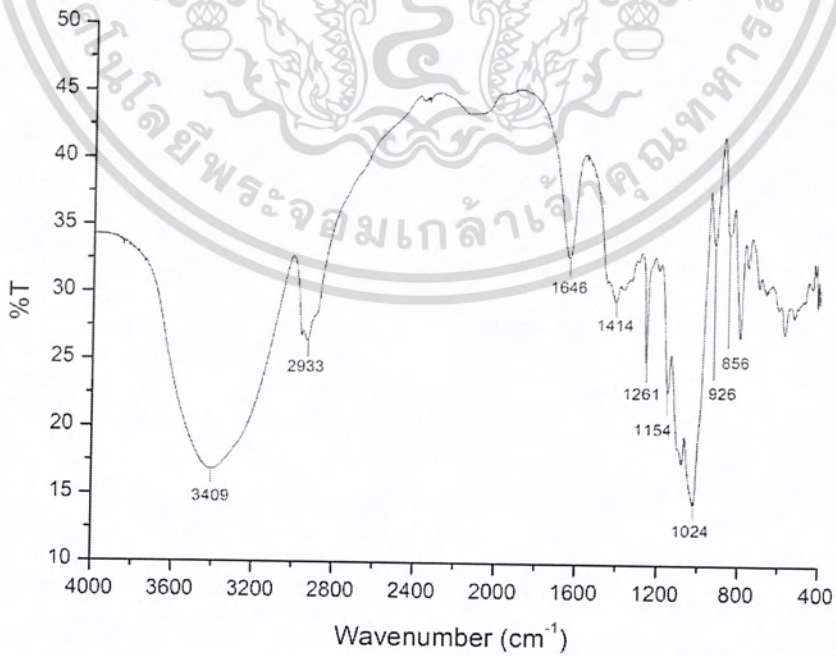
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

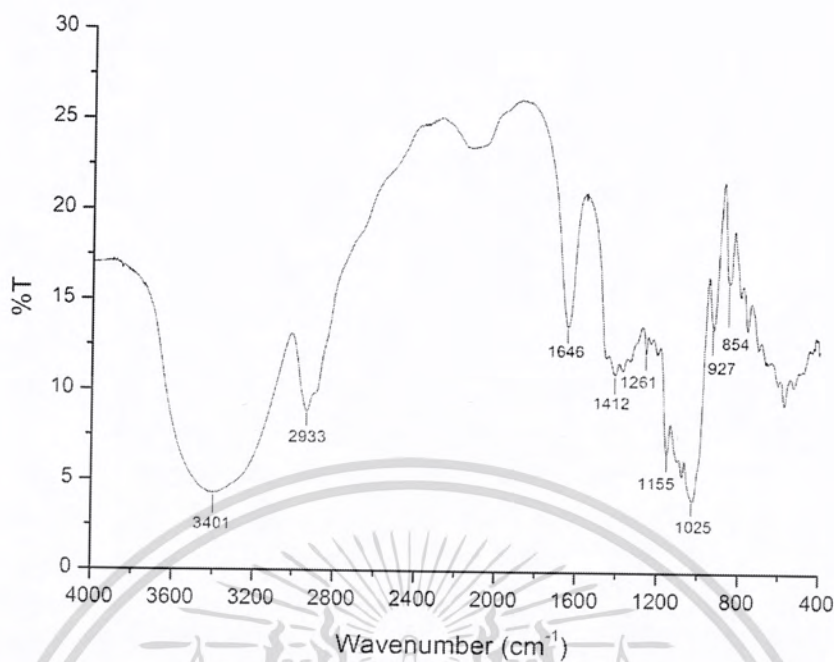


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮดรอกซีพริโอฟิลเมทิลเซลลูโลส

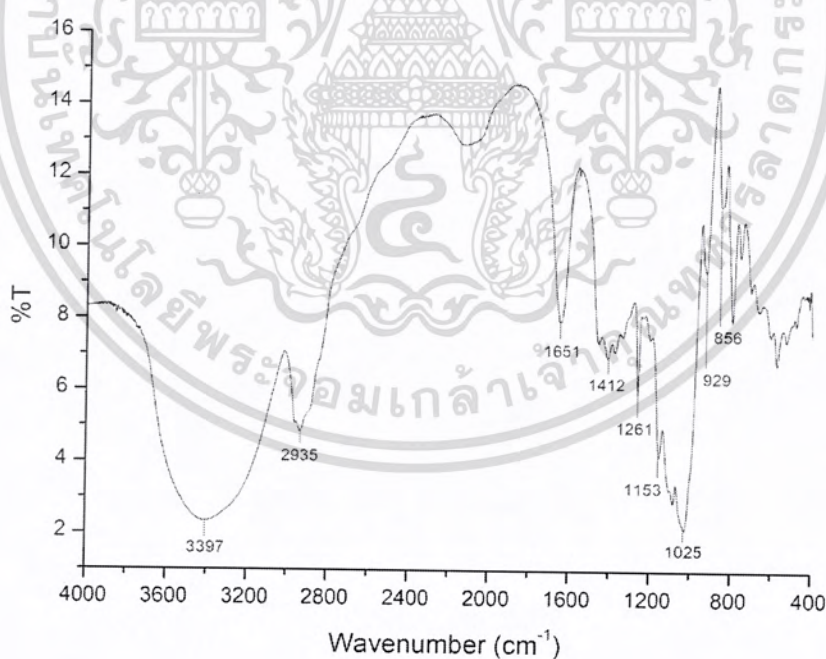


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ควรเก็บรักษาไว้เป็นอย่างดี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

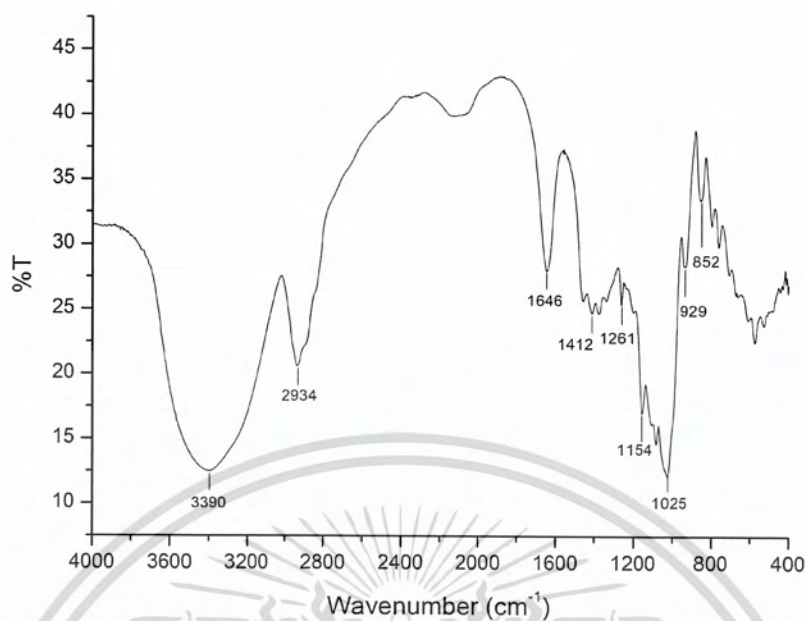


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

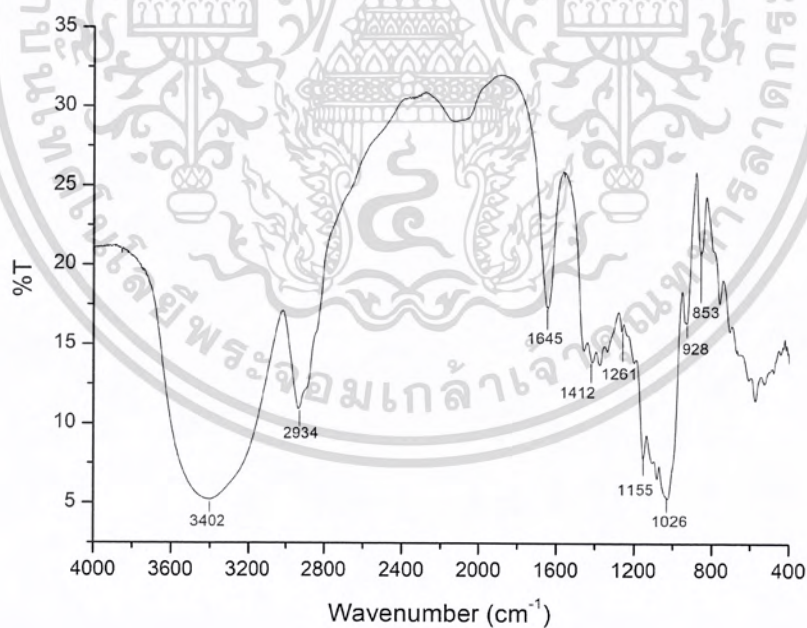


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิเมอร์โพลีโพรพิลีนที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง



รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมพอลิเมอร์โพลีโพรพิลีนที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การศึกษาสัณฐานวิทยา

ตารางที่ ข.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) เฉลี่ย 3.61 ของไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส

ลำดับที่	ไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) เฉลี่ย 3.61		
	ความยาว (L) (mm)	ความกว้าง (D) (mm)	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D)
1	126	31.68	3.98
2	121.7	24.46	4.98
3	121.5	11.69	10.39
4	118.4	21.62	5.48
5	108.8	31.01	3.51
6	92.14	38.26	2.41
7	90.85	40.72	2.23
8	86.3	25.94	3.33
9	83.02	25.34	3.28
10	81.24	38.68	2.10
11	77.36	22.89	3.38
12	77.35	45.5	1.70
13	70.84	49.89	1.42
14	79.9	21.6	3.70
15	64.76	27.53	2.35
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>93.34 ± 20.45</b>	<b>30.45 ± 10.34</b>	<b>3.61 ± 2.19</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) เฉลี่ย 6.04 ของไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส

ลำดับที่	ไฮดรอกซีพอร์ฟิลเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) เฉลี่ย 6.04		
	ความยาว (L) (mm)	ความกว้าง (D) (mm)	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D)
1	216.7	26.83	8.08
2	227.6	52.9	4.30
3	212.6	37.65	5.65
4	212.6	32.24	6.59
5	200.7	25.44	7.89
6	190.4	27.88	6.83
7	153.9	24.81	6.20
8	151.4	37.95	3.99
9	164.8	34.43	4.79
ค่าเฉลี่ย	192.30 ± 28.82	33.35 ± 8.89	6.04 ± 1.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

ตารางที่ ค.1 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เสริมแรงและเสริมแรงด้วยไฮดรอกซีพอรอพิลเมทิลเซลลูโลสในปริมาณและขนาดที่ต่างกัน ต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น		
TPCS	1			
	7			
TPCS/10HPMC3.61	1			
	7			
TPCS/20HPMC3.61	1			
	7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น		
TPCS/30HPMC3.61	1			
	7			
TPCS/30HPMC6.04	1			
	7			

ตารางที่ ค.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์ ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพอลิเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณต่างกัน

วันที่	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น				
	TPCS	TPCS/ 10HPMC3.61	TPCS/ 20HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC6.04
1	43.44	65.86	81.67	95.24	130.98
2	36.83	53.91	67.97	81.01	108.08
3	34.43	51.96	65.91	78.09	104.63
4	33.31	50.90	63.19	75.79	102.42
7	27.64	42.54	53.37	63.97	87.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การศึกษาสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาด และปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (MPa)
TPCS	1.19±0.30
TPCS/10HPMC3.61	1.77±0.08
TPCS/20HPMC3.61	2.61±0.29
TPCS/30HPMC3.61	3.93±0.51
TPCS/30HPMC6.04	4.16±0.56

ตัวอย่าง	ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (%)
TPCS	228.06±19.88
TPCS/10HPMC3.61	63.41±23.27
TPCS/20HPMC3.61	8.65±2.83
TPCS/30HPMC3.61	5.86±1.11
TPCS/30HPMC6.04	5.50±2.01






ตัวอย่าง	มอดุลัส (MPa)
TPCS	8.37±2.23
TPCS/10HPMC3.61	24.81±6.59
TPCS/20HPMC3.61	59.21±9.28
TPCS/30HPMC3.61	106.89±14.79
TPCS/30HPMC6.04	113.34±13.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## ภาคผนวก จ

### สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตารางที่ จ.1 คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณต่างกัน โดยทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 3 และ 5 วัน

จำนวนวันที่ฝังดิน	TPCS	TPCS/ 10HPMC3.61	TPCS/ 20HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC6.04
0					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนวันที่ฝังดิน	TPCS	TPCS/ 10HPMC3.61	TPCS/ 20HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC3.61	TPCS/ 30HPMC6.04
3					
5					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ขนาดและปริมาณ ต่างกัน

ตัวอย่าง	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (MPa)	
	3 วัน	5 วัน
TPCS	1.11±1.45	0.07±0.02
TPCS/10HPMC3.61	0.26±0.13	-
TPCS/20HPMC3.61	0.44±0.07	0.05±0.01
TPCS/30HPMC3.61	0.50±0.06	0.10±0.04
TPCS/30HPMC6.04	0.31±0.06	0.26±0.05

หมายเหตุ เครื่องหมาย "-" หมายถึงไม่สามารถทดสอบได้

ตัวอย่าง	ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (%)	
	3 วัน	5 วัน
TPCS	44.95±24.73	71.25±13.10
TPCS/10HPMC3.61	73.11±28.51	-
TPCS/20HPMC3.61	44.53±5.17	46.98±12.74
TPCS/30HPMC3.61	30.62±2.85	33.29±13.14
TPCS/30HPMC6.04	34.71±18.39	38.79±8.33

หมายเหตุ เครื่องหมาย "-" หมายถึงไม่สามารถทดสอบได้

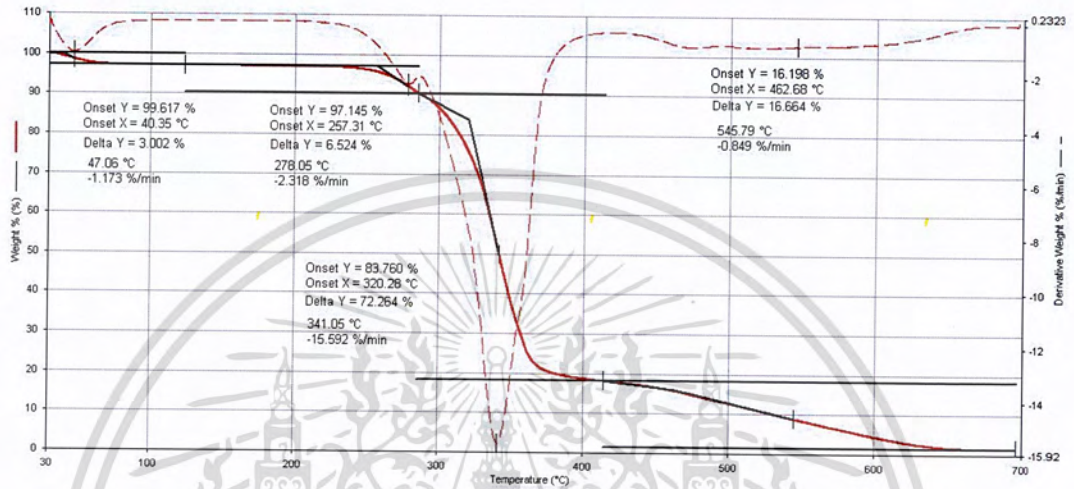
ตัวอย่าง	มอดุลัส (MPa)	
	3 วัน	5 วัน
TPCS	0.26±0.12	0.93±1.17
TPCS/10HPMC3.61	0.93±0.38	-
TPCS/20HPMC3.61	1.77±0.43	0.70±0.73
TPCS/30HPMC3.61	4.13±0.51	0.46±0.36
TPCS/30HPMC6.04	5.49±6.42	1.34±0.64

หมายเหตุ เครื่องหมาย "-" หมายถึงไม่สามารถทดสอบได้

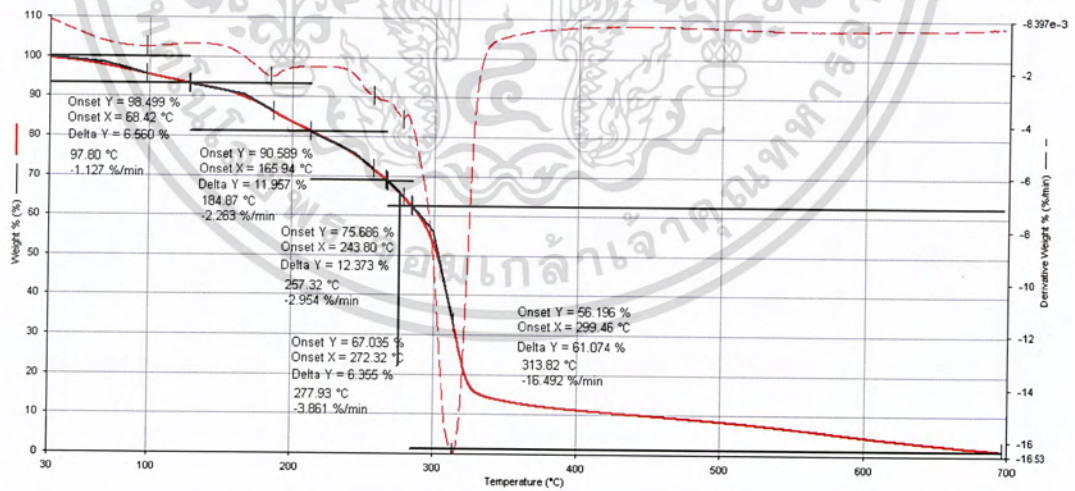
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การศึกษาสมบัติทางความร้อน

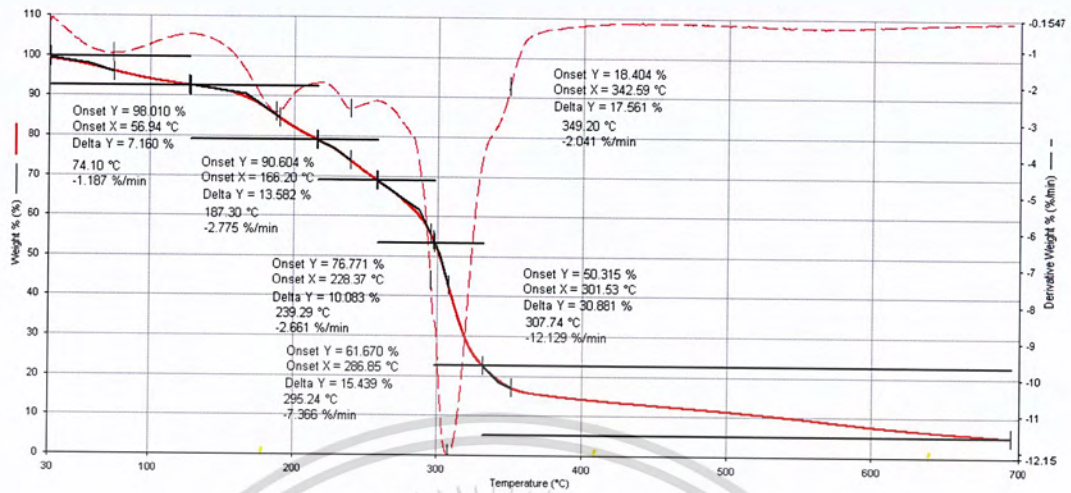


รูปที่ ฉ.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของไฮดรอกซีพพรอฟิล์มทิลเซลลูลอส

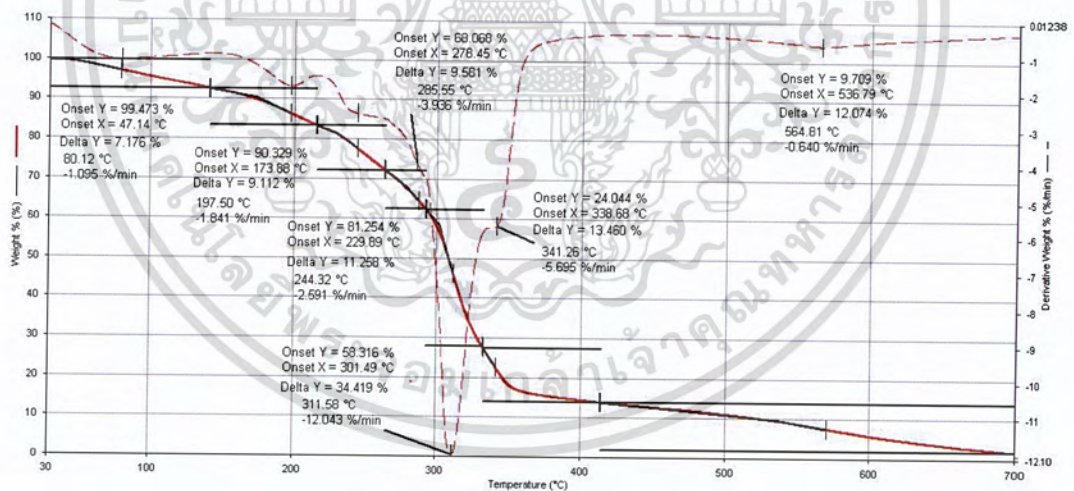


รูปที่ ฉ.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

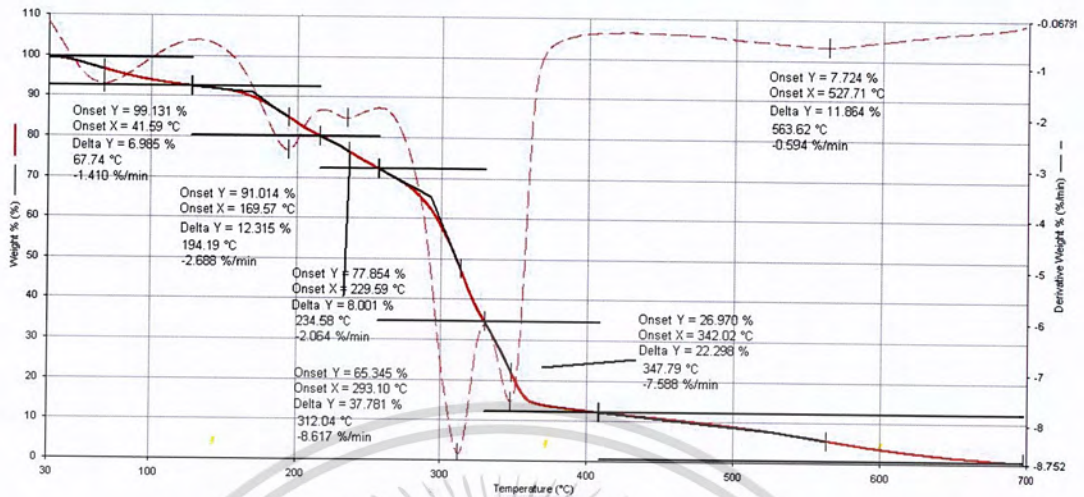


รูปที่ ๑.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

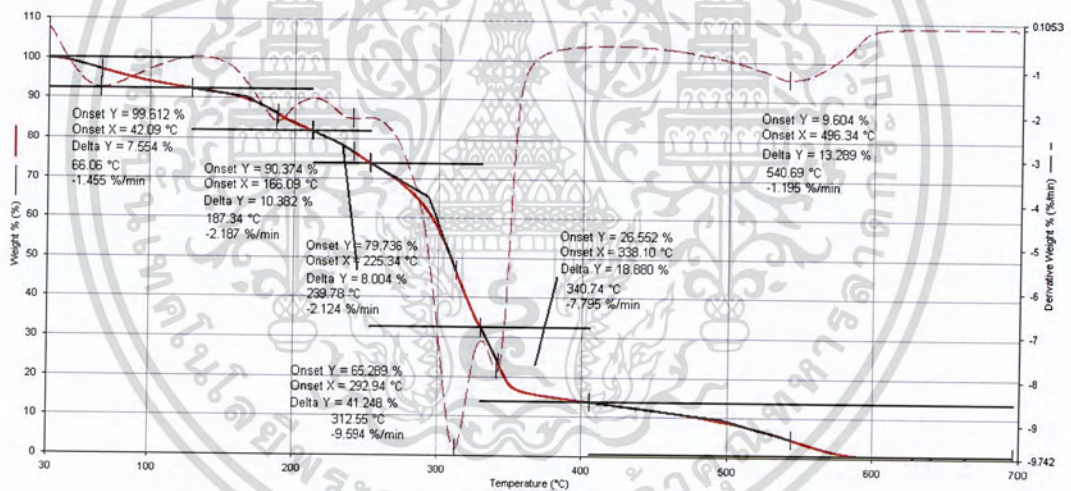


รูปที่ ๑.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๕.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 3.61 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง



รูปที่ ๕.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเสริมแรงไฮดรอกซีพโรพิลเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเฉลี่ย (L/D ratio) 6.04 ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้