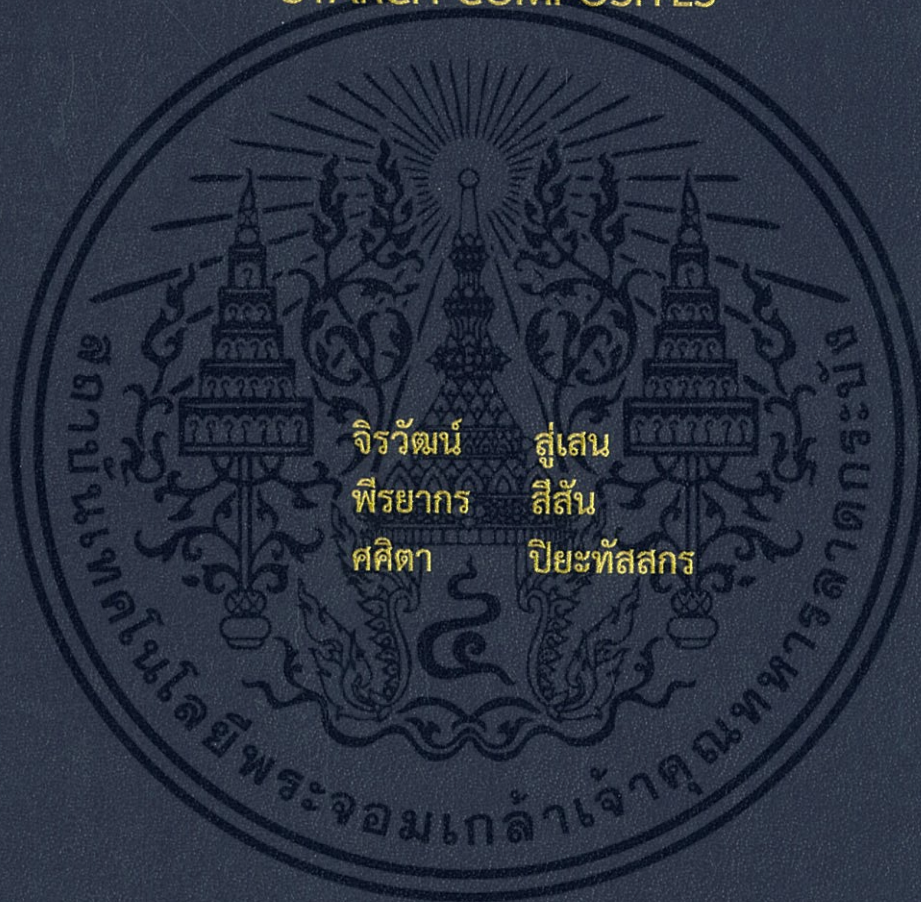


ผลของปริมาณฟางข้าวและแกลบที่มีผลต่อสมบัติของ  
คอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF RICE STRAW AND RICE HUSK CONTENTS  
ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC CASSAVA  
STARCH COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

ผลของปริมาณฟางข้าวและแกลบที่มีผลต่อสมบัติของ  
คอมโพสิทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF RICE STRAW AND RICE HUSK CONTENTS  
ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC CASSAVA  
STARCH COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF RICE STRAW AND RICE HUSK CONTENTS  
ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC CASSAVA  
STARCH COMPOSITES



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  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016


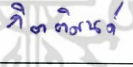
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของปริมาณฟางข้าวและแกลบที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง  
Effect of Rice Straw and Rice Husk Contents on Properties of Thermoplastic Cassava Starch Composites

ชื่อนักศึกษา นายจิรวัดน์ สู่เสน รหัสนักศึกษา 56050463  
นายพีรยากร สีสัน รหัสนักศึกษา 56050555  
นางสาวศศิตา ปิยะทัสสร รหัสนักศึกษา 56050614

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชา เคมี  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ กรรมการ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	ผลของปริมาณฟางข้าวและแกลบที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง Effect of Rice Straw and Rice Husk Contents on Properties of Thermoplastic Cassava Starch Composites		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายจิรวุฒน์ สุแสน	รหัสนักศึกษา	56050463
	นายพิรยากร สีสัน	รหัสนักศึกษา	56050555
	นางสาวศศิตา ปิยะทัสสร	รหัสนักศึกษา	56050614
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
<b>ภาควิชา</b>	เคมี		
<b>คณะ</b>	วิทยาศาสตร์		
<b>มหาวิทยาลัย</b>	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
<b>ปีการศึกษา</b>	2559		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณฟางข้าว และแกลบที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch; TPCS) โดยกำหนดอัตราส่วนของฟางข้าว และแกลบ เท่ากับ 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบว่า ปรากฏพีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1739\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ซึ่งพบในเอมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าว และแกลบ นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นของ O-H Stretching และ O-H bending มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับฟางข้าว และแกลบ จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟางข้าว และแกลบ มีลักษณะเป็นอนุภาค มีการกระจายตัว และเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในด้านความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) จากการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้น พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการย่อยสลายด้วยการฝังดินลดลง และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง เมื่อเติมฟางข้าว และเมื่อเติมแกลบทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ : แกลบ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แป้งมันสำปะหลัง ฟางข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Effect of Rice Straw and Rice Husk Contents on Properties of Thermoplastic Cassava Starch Composites		
<b>Students</b>	Mr. Jirawat	Susen	Student ID 56050463
	Mr. Peerayakorn	Seesan	Student ID 56050555
	Miss Sasita	Piyatassakorn	Student ID 56050614
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2016		
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn		

### Abstract

This research studied on the effect of rice straw (RS) and rice husk (RH) contents on properties of thermoplastic cassava starch (TPCS) composites. The rice straw and rice husk contents was ranged from 0 5 10 and 15 wt.%, using glycerol as a plasticizer. Different TPCS composites were mixed using an internal mixer and; then, shaped by a compression molding machine. It was found from FT- IR spectra that the new wavenumber of  $1739\text{ cm}^{-1}$  (C=O stretching) were observed from hemicellulose and lignin, composition of RS and RH. In addition, the O-H stretching and O-H bending peaks shifted to lower wavenumber by the incorporation of RS and RH into TPCS matrix. For morphology, the result illustrated that RS and RH were well distributed and compatible with TPCS matrix. Furthermore, the highest stress at maximum load and Young's modulus were obtained by TPCS improved by 15%RH (TPCS+ 15%RH). The lowest moisture uptake was found in TPCS improved by 15%RH (TPCS+ 15%RH). The biodegradation was determined by the soil burial test, all of the modified TPCS polymers presented the significant drop in mechanical properties Finally, degradation temperature decreased when RS was incorporated. However, thermal degradation temperature remained constant when RH was added.

**Keywords** : rice husk, thermoplastic starch, cassava starch, rice straw

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูง  
ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ และ ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณย์ ที่กรุณาเป็น  
กรรมการ ตลอดจนให้คำแนะนำเพื่อให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด ที่ได้ให้ความรู้ และ  
ข้อแนะนำดีๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วง  
ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งผู้ที่ให้โอกาสต่อคณะผู้จัดทำ จนทำให้  
ประสบความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

จิรวัดน์ สุแสน

พิรยากร สีสัน

ศศิตา ปิยะพัสสร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้มีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงมีการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกอย่างแพร่หลาย และนำมาใช้ประโยชน์แทนโลหะ ไม้ และวัสดุธรรมชาติอื่นๆ พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นจากการนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม พลาสติกที่ถูกใช้แล้วมักถูกทิ้งเป็นขยะที่ถูกย่อยสลายทางธรรมชาติได้ยาก และใช้เวลานาน ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว ทำให้มีการคิดค้นและพัฒนาพลาสติกที่มาจากชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ง่ายในเวลาอันสั้น [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-based biodegradable plastics) ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable) และถือเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในบรรดาชีวมวลจากธรรมชาติทั้งหลาย แบ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณมาก หาง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ [2]

การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เกิดขึ้นครั้งแรกในราว 40 ปีที่ผ่านมา ด้วยสภาวะโลกร้อนและปัญหามลพิษ ภาวการณ์ขาดแคลนเชื้อเพลิง และวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมีที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ [3]

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) หมายถึง การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติก ซึ่งมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมเหลวได้ หากให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น การหลอมเหลวของแกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย การเติมสารเติมแต่ง (Additives) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลของแป้งเกิดการหลอมเหลวได้ ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) [2]

แต่เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ยังมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งาน คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีการดูดซับความชื้นสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงข้อเสียของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ซึ่งเตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยการเสริมแรงด้วยฟางข้าว (Rice straw) และแกลบ (Rice husk)

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ทำมาจากหัวมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผิวสัมผัสของแป้งจะเนียนลื่นมือ เมื่อทำให้สุกจะเหลวเหนียวหนืด เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียวคงตัว นิยมนำมาผสมอาหารที่ต้องการความเหนียวหนืดใส โดยหัวมันสำปะหลังสดจะมีแป้งเป็นองค์ประกอบประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ [4] แป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถปลูกทดแทนได้ ย่อยสลายได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง ราคาถูก มีสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ที่เหมาะสม เฉพาะตัวจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการนำมาใช้ในการผลิตพลาสติกทดแทนการใช้ผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม

ฟางข้าว (Rice straw) เป็นวัสดุเหลือใช้จำนวนมากภายหลังการเก็บเกี่ยวข้าว มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลส 35-40 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25-30 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 15-20 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 9-14 เปอร์เซ็นต์ [5] ในแต่ละปีมีฟางข้าวเฉลี่ยประมาณ 25.45 ล้านตัน ซึ่งเป็นปัญหาของเกษตรกรในการทำนาภายหลังการเก็บเกี่ยว แม้ปัจจุบันฟางข้าวจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย แต่ด้วยภาวะเร่งรัดในการทำนาครั้งต่อไป การเผาฟางจึงเป็นทางเลือกที่สะดวก และรวดเร็วที่สุด จึงได้มีการนำฟางข้าวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ทางด้านวัสดุประกอบเพื่อเป็นการลดสภาวะมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ [6]

แกลบ (Rice husk) คือ เปลือกแข็งของเมล็ดข้าวที่ได้จากการสีข้าว มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลส 25-35 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 21-35 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 20-31 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 15-17 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 5-10 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 2-5 เปอร์เซ็นต์ [7] มีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวล แล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว [8] แกลบเป็นส่วนหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตข้าว ถูกแยกออกจากข้าวในระหว่างการสีข้าวซึ่งเป็นปัญหาของชาวนาในการกำจัดทิ้ง เนื่องจากทนต่อการเสื่อมสภาพ และย่อยสลายยากเมื่อทิ้งไว้ตามพื้นดิน [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์โดยใช้เส้นใยหลายชนิด ได้แก่ เส้นใยฝ้าย [10] เส้นใยขนุน [11] เส้นใยไหม [12] เส้นใยจากชานอ้อย [13] และเส้นใยบวบ [14] เป็นต้น ซึ่งพบว่าเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ เหล่านี้ ทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น และลดการดูดซับความชื้นลงได้อย่างมาก คณะผู้วิจัยจึงได้นำงานวิจัยดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการศึกษาผลของปริมาณฟางข้าว และแกลบที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันสำปะหลัง โดยกำหนดอัตราส่วนของฟางข้าว และแกลบ เท่ากับ 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ใช้ฟางข้าว และแกลบเป็นส่วนเสริมแรง โดยกระบวนการกดอัด

1.2.2 เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้ฟางข้าว และแกลบในปริมาณต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอรอล

1.3.2 ศึกษาหาปริมาณของฟางข้าว และแกลบที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เตรียมได้ดีขึ้น

1.3.3 ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สันฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ฟางข้าว และแกลบ

1.4.2 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้ฟางข้าว และแกลบ

1.4.3 ช่วยลดการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก และช่วยลดปริมาณขยะเพื่อเป็นการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

วัสดุคอมโพสิต เกิดจากวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปที่มีสมบัติแตกต่างกันมารวมกัน โดยไม่หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุดีขึ้นกว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบเดียว องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะเป็นตัวที่ห่อหุ้ม และยึดสารเสริมแรงให้เกิดการกระจายตัวอย่างต่อเนื่องบนวัสดุเป็นรูปทรงต่างๆ โดยสารเสริมแรงจะช่วยเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบให้ดีขึ้นตามที่ต้องการ [15]

#### 2.1.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

2.1.1.1 คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรง และมอดุลัสสูง ทำให้มีความแข็งแรงตามแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2.1.1.2 คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar Composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกอบ (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

2.1.1.3 คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate Composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Bead) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก [16]

#### 2.1.2 การประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิต

สมบัติของวัสดุคอมโพสิตสามารถออกแบบได้จากวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรง และการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตเป็นไปตามต้องการ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายครอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไป จนถึงวัสดุที่ใช้ในงานเฉพาะกิจที่ต้องการสมบัติพิเศษ [15]

### 2.2 แป้ง

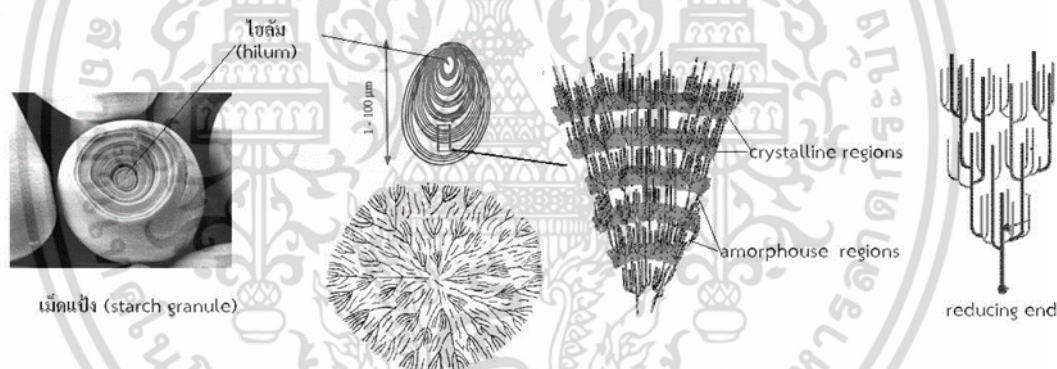
แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้ง ประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เม็ดแป้งที่เปียก สด และมีขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย และชัดเจน ในแป้งที่แห้งไม่พบ Growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์ และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ Growth ring ดังรูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน Reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน Non-reducing end ของอะไมโลส และอะไมโลเพกทินแผ่กระจายออกไป [17] จุดเชื่อมกิ่ง (Branch point) ของอะไมโลเพกทินอยู่ในส่วนออสันฐาน และสายอยู่ในส่วนผลึก [18]

ถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (Polarized Microscope) จะมองเห็นวงแหวน และไฮลัม เป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (Birefringence หรือ Polarization cross) โดยจุดตัดของกากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัม และบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ [19]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างวงแหวน Growth ring [20]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -Glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้ง จะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง

โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามขนาดโมเลกุล และลักษณะการจัดเรียงตัว คือ

- อะไมโลส (Amylose) มีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย
- อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย

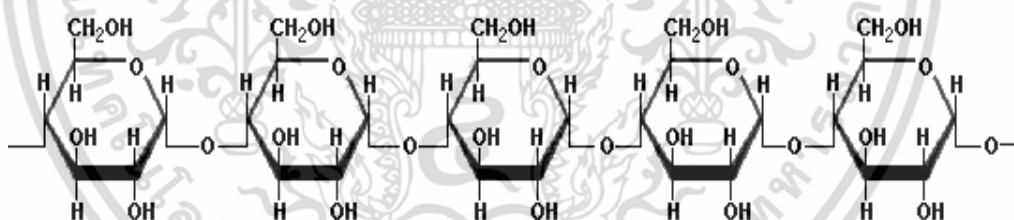
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน [21]

อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4	1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งประกอบด้วยกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อย	3. ละลายน้ำได้ดี
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมาก และใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้น และแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้น และแผ่นแข็ง
7. สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง ได้แก่ ข้าวเจ้า และข้าวโพด	7. สตาร์ชที่มีอะไมโลเพกทินสูง ได้แก่ ข้าวเหนียว

### 2.2.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$  -1,4-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [22]

โมเลกุลของอะไมโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรงของ D-glucose ซึ่งเชื่อมกันด้วย Glycosidic bond ชนิด  $\alpha$  -1,4 ประมาณ 200-2,000 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000 ถึง 1,000,000 โดยจะผันแปรไปตามชนิดของสตาร์ช ขนาด และน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลส มีผลมาจาก Degree of Polymerization (DP) ของอะไมโลสที่แตกต่างกัน อะไมโลสในสตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในสตาร์ชข้าวโพด และข้าวสาลี ที่มี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 สตาร์ชชนิดที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มของการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณ และขนาดโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน [23]

แหล่งของสตาร์ช	ปริมาณ อะไมโลส (ร้อยละ)	ปริมาณ อะไมโลเพกทิน (ร้อยละ)	ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ยของ	
			อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
ข้าวเจ้าชนิด อินดิกา (Indica) จาโปนิกา (Japonica)	17	83	1,000	4,700
			1,100	12,800
ข้าวเหนียว	1	99	-	-
ข้าวโพด	28	72	930	8,200
มันสำปะหลัง	17	83	2,600	-
มันฝรั่ง	21	79	4,900	9,800
ข้าวสาลี	28	72	1,300	4,800

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแป้งจากราก และหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาकुมี ปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า คืออยู่ในช่วง 18-24 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105-106 ดาลตัน [2]

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [23]

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

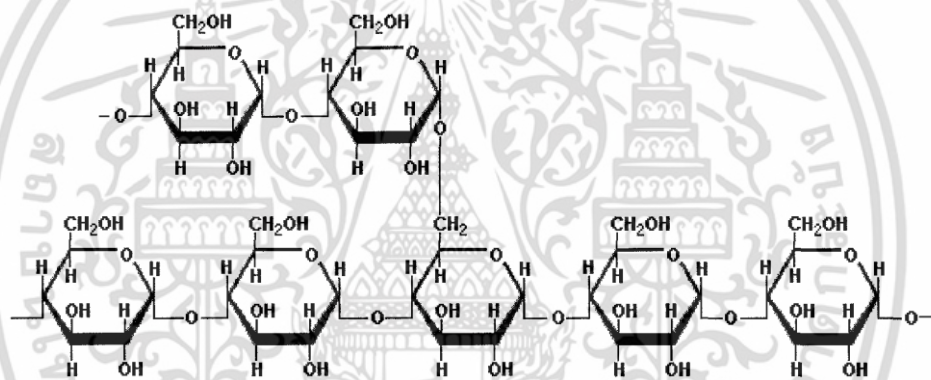
อะไมโลส สามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น Butanol, Fatty acid, Surfactant, Phenol และ Hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ [24] อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง [25]

การตรวจสอบปริมาณอะไมโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และวัดสีที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่าย และนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น เอกสารนี้ และการรบกวนจากจากอะไมโลเพกทิน โดยเฉพาะอะไมโลเพกทินที่มีความยาวสายโซ่กึ่งมากๆ ซึ่งจะไม่ว่การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกัน ทำให้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะไมโลสจะทำให้อะไมโลสนั้นจับกับไอโอดีนไม่ได้ ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ต้องแก้ไขโดยต้องทำการสกัดไขมันออกก่อนที่จะไปทำการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่า คือการใช้ Gel Permeation Chromatography (GPC) นอกจากนี้ก็มีการใช้ High Pressure Size Exclusion Chromatography ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกวิธีการคือการใช้ Concanavalin A มาตกตะกอนอะไมโลเพกทินออกไป และวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสที่เหลืออยู่ [26]

### 2.2.1.2 อะไมโลเพกทิน (Amylopectin)

อะไมโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.3



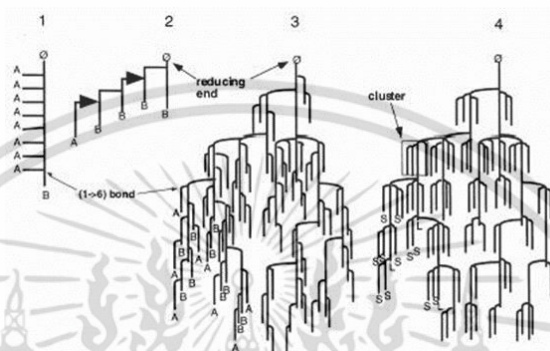
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [27]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพกทินทั้งหมด อะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพกทินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพกทินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

ในปี 1940 Meyer และคณะ (1940) เสนอโมเดลโครงสร้างของอะไมโลเพกทินว่าเป็นแบบการแตกกิ่งแบบสุ่ม (Random branching) ดังรูปที่ 2.4 หลังจากนั้น Nikuni (1978) เสนอ Clustered branching model เป็นต้นแบบของโมเดลที่ยอมรับกันในปัจจุบันซึ่งเสนอโดย Hizukuri (1986) ลักษณะที่สำคัญของโมเดลนี้ คือ จะมีการแบ่งสายโซ่กิ่งเป็นกลุ่มๆ ตามขนาดความยาวของสายโซ่ที่มีช่วงที่แน่นอน (Certain periodicity) อะไมโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า สายโซ่แบบ B นี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย B1, B2, B3 และ B4 ซึ่งมีความยาวคร่อมหนึ่ง สอง สาม และสี่ คลัสเตอร์ (Cluster) ตามลำดับ
- 3) สาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพกทิน แต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



รูปที่ 2.4 แผนภาพโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกทินที่นำเสนอโดย (1) Haworth (2) Staudinger (3) Meyer และ (4) รูปแบบที่ Meyer เปลี่ยนแปลงตาม แบบ Cluster [28]

## 2.2.2 องค์ประกอบทางด้านเคมี และสมบัติของแป้ง

เม็ดแป้ง (Starch granule) นอกจากจะประกอบด้วยโมเลกุลของแป้งเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ รวมอยู่ด้วยในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งพืชแต่ละชนิดด้วย

### 2.2.2.1 ไขมัน (Lipid)

ลิพิดที่สกัดได้จากเม็ดแป้ง แป้งได้เป็น 2 ประเภทคือ ลิพิดที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ และมาจับอยู่กับเม็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง เช่น จากเมมเบรน และสเฟียร์โรโซม ซึ่งจับอยู่กับเม็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยลิพิดพวกไตรกรีเซอไรด์ ไดเอซิลไกลโคลิพิด และฟอสโฟลิพิด ส่วนลิพิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้งอย่างแท้จริงจะพบอยู่ภายในเม็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลีพบว่า เป็นลิพิดประเภทไลโซฟอสโฟลิพิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวโอ๊ต และข้าวโพด พบว่าเป็นกรดไขมันประมาณ 30-60 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวเหนียว ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลีซึ่งมีอะไมโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณลิพิดต่ำมากเช่นกัน และแป้งจากข้าวเหล่านี้ เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะไมโลสสูงก็จะพบลิพิดในปริมาณมากด้วย [29]

แป้งจากหัว (Tuber) หรือราก (Root) เช่น แป้งมันฝรั่ง และมันสำปะหลัง มีไขมันในปริมาณที่ต่ำ (0.1 เปอร์เซ็นต์ หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช (Corn wheat และ Sorghum) ซึ่งมีไขมันประมาณ 0.6-0.8 % (w/w) การมีไขมันในแป้งจะมีผลต่อสมบัติของแป้งเนื่องจากไขมันหรือลิพิด (Lipid) จะเกิดการรวมตัวกับอะไมโลสในแป้งเกิดเป็นสารเชิงซ้อนของอะไมโลส-ไขมัน (Amylose-Lipid complex) ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่การจับกันจะถูกทำลายเมื่อไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส พันธะที่ยึดเหนี่ยวกันจะถูกทำลายทำให้ส่วนของอะไมโลสสามารถละลายออกมาได้ สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลส และไขมันจะมีผลทำให้กำลังการพองตัว (Swelling power) และค่าการละลาย (Solubility) ของแป้งลดลง นอกจากนี้ไขมันยังทำให้แป้งเกิดการเหม็นหืน (Rancid) ขณะเก็บรักษาด้วย [30]

#### 2.2.2.2 โปรตีน (Protein)

โปรตีนที่สกัดได้จากเมล็ดแป้ง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ โปรตีนที่จับอยู่ที่ผิวของเม็ดแป้ง (Surface protein) ซึ่งสกัดออกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินไนซ์ และโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (Integral protein) ซึ่งการสกัดต้องใช้อุณหภูมิใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินไนซ์ โปรตีนที่อยู่ในแป้งจะเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดกลิ่น รส และการเกิดฟองในแป้ง [2]

#### 2.2.2.3 ฟอสฟอรัส (Phosphorous)

ฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืช มักพบในรูปของไลโซฟอสโพลิฟิต ในขณะที่แป้งจากราก และหัวมักมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำ และอยู่ในรูปของฟอสเฟต แป้งมันฝรั่งเป็นแป้งจากหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) สูง โดยหมู่ฟอสเฟตทำให้แป้งมีสมบัติเป็น Polyelectrolyte ทำให้เม็ดแป้งกระจายตัวในน้ำ และพองตัวได้ดี เนื่องจากโมเลกุลแป้งผลัดกันเอง [2]

#### 2.2.2.4 เถ้า และสารอนินทรีย์อื่นๆ (Ash & Inorganic components)

สารอนินทรีย์อื่นๆ ในแป้ง เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  พบในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของสารเหล่านี้หาได้จากสิ่งที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิเฉพาะ ปริมาณเถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืชคือปริมาณฟอสโพลิฟิต ปริมาณเถ้าของแป้งที่ใช้ในทางการค้าโดยทั่วไปคือสารประกอบโลหะของโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม [30]

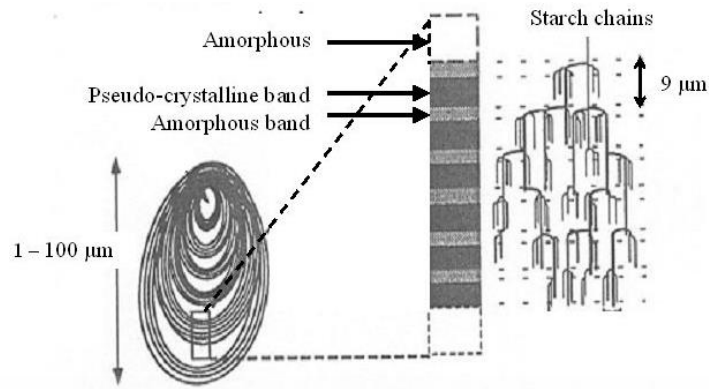
#### 2.2.2.5 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity; RH) ของอากาศขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้น 10-20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) [2]

### 2.2.3 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

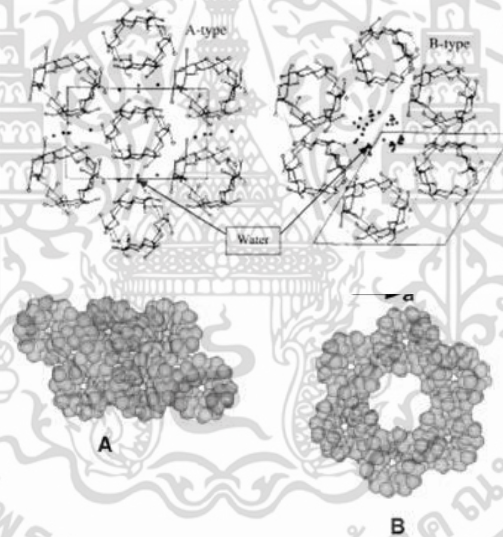
เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) โดยลักษณะความเป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะไมโลเพกทิน ในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ในรูปของคลัสเตอร์ (Series of Stacked Amylopectin Cluster) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่ง มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า Amorphous lamellar และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพกทินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ ที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณส่วนนี้ว่า Crystalline lamellar ดังรูปที่ 2.5 หนึ่งคลัสเตอร์มีขนาด 9 มิลลิเมตร [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างของลาเมลลาในเม็ดแป้ง [31]

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมาก และมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.6 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว)

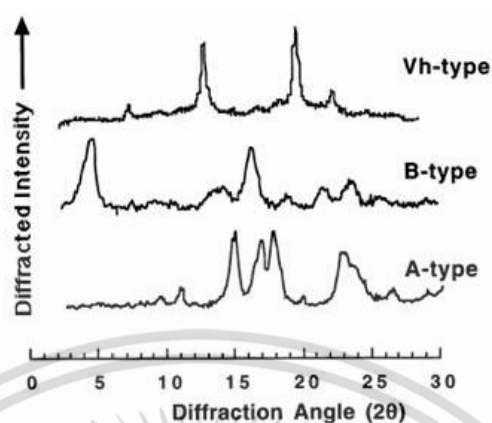


รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B [32]

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ X-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ 2.7 แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่  $17^\circ$  และ  $18^\circ$  และพีคเดี่ยวที่  $23^\circ$  แต่ไม่มีพีคที่  $5.6^\circ$  แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่  $5.6^\circ$  และ  $17^\circ$  แต่ไม่มีพีคที่  $18^\circ$  และมีพีคคู่ (Doublet) ที่  $22^\circ$  และ  $24^\circ$  ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัว และแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่  $5.6^\circ$  และ  $17.9^\circ$  ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้น และแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันฝรั่งขึ้นที่ถูบ่มไว้นานที่

อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส, 30 นาที : Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ใดก็ตาม  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A [33] ลักษณะโครงสร้าง และปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [28]

ตารางที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้าง และปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [2]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน (°C)	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์)
โครงสร้าง A			
• ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
• ข้าวสาลี	36	63.5	23
• ข้าวเหนียว	37	64.5	-
• ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
• ข้าวเจ้า	38	70.0	17
• ข้าวโพด	40	71.3	27
โครงสร้าง B			
• Amylomaize	15-22	86.0	55-7
• สาคุ	26	70.5	28
• มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
• มันเทศ	38	70.0	20
• มันสำปะหลัง	38	66.0	18

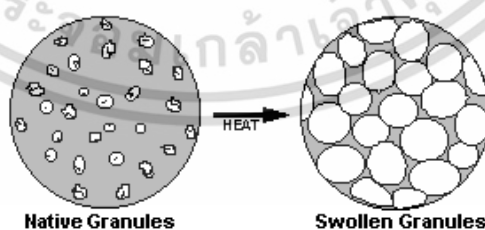
จากตารางที่ 2.4 พบว่า แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะมีความยาวสายโซ่มากกว่าแบบ A และ Naegeli dextrans ซึ่งเตรียมได้จากการย่อยแป้งแบบ B ด้วยกรด จะประกอบด้วยสายโซ่ตรงเป็นส่วนใหญ่ (Peak ที่ DP 13) และมีสายโซ่กิ่งเล็กน้อย (Peak DP 25) ในขณะที่ Naegeli dextrans ของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งแบบ A จะประกอบด้วยสายโซ่กิ่งเป็นหลัก โดยมี Peak ที่ DP 25 ผู้วิจัยให้เหตุผลว่า จุดที่แตกกิ่ง (Branch linkage) ของแป้งแบบ B ส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณออสถฐานของโมเลกุลอะไมโลเพกทิน จึงถูกย่อยได้ง่ายโดยกรด ส่วนแป้งแบบ A จุดที่แตกกิ่งจะกระจุกกระจายอยู่ทั้งในส่วนออสถฐาน และส่วนผลึก ซึ่งส่วนที่อยู่ในผลึกนี้ กรดจะเข้าไปย่อยได้ยาก ทำให้ Naegeli dextrins ของแป้งแบบ A จึงยังคงเหลือสายโซ่กิ่งมาก ส่วนการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส พบว่าแป้งแบบ A ซึ่งที่ความยาวสายโซ่กิ่งที่สั้นกว่าแบบ B จะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้ง่ายกว่าแบบ B มีการเสนอโมเดลโครงสร้างของแป้งแบบ B ว่าประกอบด้วยสายเกลียวคู่ที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากกว่า จึงทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากกว่า [34]

## 2.2.4 สมบัติของแป้ง

### 2.2.4.1 การพองตัว และการละลาย (Swelling and Solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน (Intermixed) ภายในเม็ดแป้งในส่วน Crystalline โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่น และเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัว และทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วน Crystalline เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8) โมเลกุลในส่วน Crystalline ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแห เรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกทินซึ่งมีขนาดเล็ก และอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystalline ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้น และโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น [2]

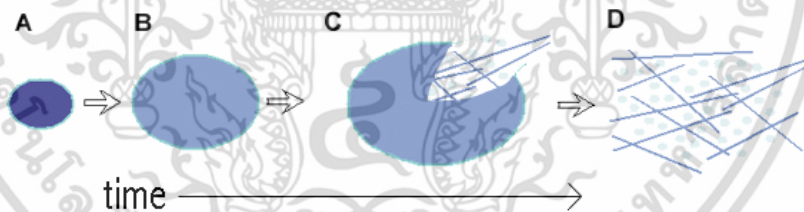


รูปที่ 2.8 การพองตัวของเม็ดแป้ง [35]

#### 2.2.4.1.1 กลไกการเกิดเจลลิตินเซชัน

เมื่อนำแป้งใสในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมาก และสังเกตได้ยาก Collison [1968] สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาลีในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ และเอนไซม์อะไมเลสจะย่อยแป้งที่พองตัวได้ง่ายกว่าแป้งที่ไม่พองตัว ทั้งนี้เนื่องจากการพองตัวของเม็ดแป้งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของเม็ดแป้งกับน้ำเพิ่มขึ้น และเอนไซม์สามารถเข้าถึงเม็ดแป้งได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การพองตัวของเม็ดแป้งยังทำให้เม็ดแป้งแตกตัวเป็นโมเลกุลอิสระมากขึ้น และโมเลกุลอิสระเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในน้ำ และเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกันระหว่างโมเลกุลอิสระเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดเจลลิตินเซชันขึ้น [36]

ปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะ และสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลส และอะไมโลเพกทินในส่วนที่เป็น Crystalline จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบ และมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 องศาเซลเซียส หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส แก่แป้งสาส์จะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน Crystalline ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ และการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้ง และเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน Crystalline ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนเซชันไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนเซชันได้ก่อนขนาดเล็ก [29] แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน [33] แป้งอาจเกิด Gelatinized ได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสโดยการละลายใน Solvent เช่น Alkali, Liquid ammonia, DMSO, aq.  $\text{CaCl}_2$  [2]



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [35]

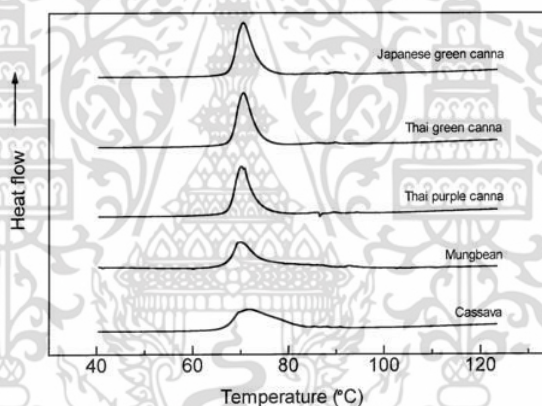
ลำดับการเปลี่ยนแปลง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเรียงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.4.1.2 การตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีไนซ์ของแป้ง

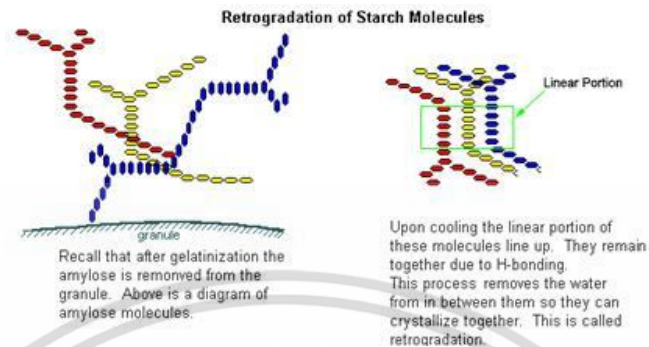
วิธีที่ง่าย และแม่นยำ คือ วัดอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสูญเสียเครื่องหมายกากบาท เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (Kofler hot stage microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนื่องในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อมองผ่านแสงโพลาไรซ์ พบว่าจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เห็นคือ เม็ดแป้งประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เริ่มพองตัว และสูญเสียเครื่องหมายกากบาท ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเจลลาคีไนซ์ (Initial of gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายกากบาทไป 50 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกเป็นจุดกลางของเจลลาคีไนซ์ (Midpoint of gelatinization) และเมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายไปประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกเป็นจุดสุดท้ายของเจลลาคีไนซ์ (Final of gelatinization หรือ Completion point) ดังนั้นส่วนใหญ่มักแสดงช่วงอุณหภูมิเจลลาคีไนซ์ของแป้งเป็นตัวเลขชุด แต่ถ้าระบุเป็นอุณหภูมิเดียวมักเป็นจุดสุดท้ายของเจลลาคีไนซ์หรือที่เรียกกันว่า Birefringence end point temperature (BEPT) [36]



รูปที่ 2.10 DSC Thermogram ของแป้ง [35]

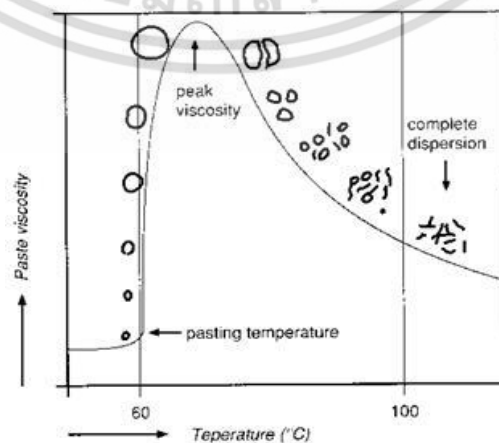
นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง Birefringence ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีไนซ์โดยใช้เครื่องมือที่วัด และบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึก และอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย ( $T_m$ ) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แป้งจะเกิดเจลลาคีไนซ์ โดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุด (Peak temperature) คืออุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีไนซ์ สำหรับการตรวจสอบการเกิดเจลลาคีไนซ์ของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งกับน้ำในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาติไนเซชัน จะได้ Thermogram ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง Heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $\Delta H$ , cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 การคืนตัวของแป้ง [35]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปแป้งจากราก/หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมาก และเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า และเม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง หรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็นเมทริกซ์ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพกทินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกทินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะเกาะยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ ถือว่าผิดกฎหมาย

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทิน อุณหภูมิ และ Shear rate แต่ที่มีผลมากที่สุด ได้แก่ ชนิดของแป้ง

#### 2.1.4.2 การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์

แป้งเป็นอาหารหลักของมนุษย์ และสัตว์ซึ่งได้จากการบริโภคส่วนราก ลำต้น และหัวของพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ โดยมีเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ( $\alpha$ -amylase และ  $\alpha$ -glucosidase) ซึ่งเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic ของแป้ง ทำหน้าที่หลักในการย่อยแป้ง ในระบบการย่อยอาหารแป้งจะเริ่มถูกย่อยในปากซึ่งมี pH ในช่วง 6.2-7.4 โดยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase จากนั้นจะผ่านกระเพาะอาหาร และเข้าสู่ลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum) ซึ่งมี pH ในช่วง 7-8 แป้งจะเริ่มถูกย่อยอีกครั้งหนึ่งด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ที่ผลิตจากตับอ่อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยคือ Dextrin, Maltotriose, Maltose และ Glucose ไตแซคคาไรด์ และโอลิโกแซคคาไรด์จะถูกย่อยต่อด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -glucosidase ที่อยู่บนเยื่อ brush border ซึ่งจะตัดกลูโคสครั้งละหนึ่งหน่วยโดยเริ่มจากปลาย Non-reducing เข้าไป ส่วนแป้งที่ยังเหลืออยู่ จะผ่านลงไปที่ย่อยของลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ ซึ่งอาจจะถูกย่อยสลายต่อยด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในลำไส้ [37]

## 2.3 แป้งมันสำปะหลัง

### 2.3.1 ความเป็นมาของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง เป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อเรียกกันทั่วไปในภาษาอังกฤษว่าแคสซาวา (Cassava) หรือ ทาปิโอก้า (Tapioca) ประเทศแถบแอฟริกา เรียกชื่อภาษาฝรั่งเศสว่า แมนนิอค (Manioc) มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ เช่น ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส และบราซิล ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้จัดมันสำปะหลังไว้เป็นหมวดหมู่ ดังนี้

ORDER: Geraniales or Euphorbiales

CLASS: Dicotyledonea

SUBCLASS: Archichlamydeae

FAMILY: Euphorbiaceae

GENUS: Manihot

SPECIES: Esculenta

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) ทำมาจากหัวมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผิวสัมผัสของแป้งจะเนียนลื่นมือ เมื่อทำให้สุกจะเหลวเหนียวหนืด เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียวคงตัว นิยมนำมาผสมอาหารที่ต้องการความเหนียวหนืดใส หัวมันสำปะหลังสดมีแป้งเป็นองค์ประกอบ

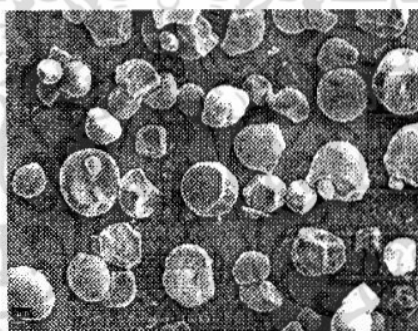
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แป้งมันสำปะหลังที่สกัดจากหัวมันสำปะหลัง และไม่มีการเปลี่ยนรูป เรียกว่า แป้งดิบ (Tapioca Starch หรือ Native Starch) โดยสามารถแบ่งตามการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. แป้งดิบหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) เป็นแป้งที่ได้จากหัวมันสดด้วยกระบวนการแยกกากโปรตีน เป็นต้น
2. แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified Starch) คือ แป้งซึ่งได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ [4]

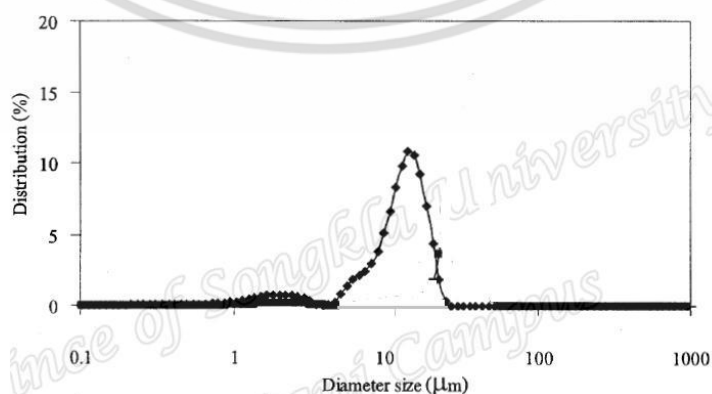
### 2.3.2 ลักษณะรูปร่าง และขนาดของเม็ดแป้ง

ผลการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ที่ความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV พบว่าแป้งมันสำปะหลัง มีลักษณะรูปร่างกลม ส่วนปลายด้านหนึ่งจะมีลักษณะเว้า หรือคล้ายรอยตัด ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของเม็ดแป้งดิบของแป้งมันสำปะหลัง [38]

จากการวิเคราะห์การกระจาย และขนาดของเม็ดแป้ง (รูปที่ 2.14) พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 0.044-27.39 ไมครอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 12.93 ไมครอน ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีการกระจายขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งในช่วง 1-10 ไมครอน เท่ากับ 24.64 และช่วง 10-27.39 ไมครอน เท่ากับ 73.30 เปอร์เซ็นต์ [38]



รูปที่ 2.14 การกระจายขนาดของเม็ดแป้งจากแป้งมันสำปะหลัง [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งดิบของแป้งมันสำปะหลัง [38]

Starch type	Ranges of granule size ( $\mu\text{m}$ )	Granule size in average ( $\mu\text{m}$ )	Distribution of starch granule (%)		
			<1 $\mu\text{m}$	1-<10 $\mu\text{m}$	>10 $\mu\text{m}$
Cassava starch	0.044 - 27.39	12.93 $\pm$ 5.591	2.06	24.64	73.30

### 2.3.3 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบ และส่วนที่เป็นสีเขียวแล้วจะสะสมในรูปคาร์โบไฮเดรต ความสามารถในการสร้าง และสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากพันธุ์ของแป้งมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว และปัจจัยอื่นๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอจะมีส่วนประกอบดังแสดงได้จากตารางที่ 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบในหัวมัน [39]

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21-75.32
เปลือก	4.08-14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87-41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85-39.27

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบในเนื้อมัน [39, 40]

องค์ประกอบในเนื้อมัน	องค์ประกอบในเนื้อมัน
แป้ง	71.9-85.0
● อะไมโลส	15.9-22.4
● อะไมโลเพกทิน	61.59-83.0
โปรตีน	1.57-5.78
เส้นใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

จะเห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้น นอกจากน้ำแล้วก็คือแป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อย และความหนาแน่นของหัวจะมีสูง การตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้งอย่างรวดเร็วที่นิยมทำกันคือ การตรวจสอบความหนาแน่น โดยการชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อยก็แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำมาก และมีแป้งน้อย ในกรณีกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมากก็แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำน้อย และมีแป้งมาก

### 2.3.4 ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง

เนื่องจากหัวมันสำปะหลังเป็นที่สะสมแป้ง จึงเป็นอาหารประเภทแป้ง หรือคาร์โบไฮเดรต ที่ให้พลังงานสำหรับมนุษย์ และสัตว์ ได้เป็นอย่างดี ตลอดจนใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ประโยชน์ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 2.15) มีดังนี้

#### 2.3.4.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

ด้ายที่จะใช้ทอผ้านั้น จะต้องผ่านการชุบแป้งด้ายจึงจะลื่น เรียบไม่มีขน และเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ

#### 2.3.4.2 อุตสาหกรรมไม้อัด

การผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะ กาวที่ผลิตได้นั้นใช้แป้งเป็นส่วนผสม ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งไปกว่านั้นแป้งมันสำปะหลังยังมีสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่นๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอน

#### 2.3.4.3 อุตสาหกรรมกระดาษ

การทำกระดาษนั้นต้องนำเยื่อกระดาษมาเรียงเป็นแผ่น แต่แผ่นกระดาษจะไม่เรียบ ต้องมีการฉาบผิวด้วยกาวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ และยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี และทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

#### 2.3.4.4 อุตสาหกรรมกาว

แป้งมันสำปะหลัง มีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อน หรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียว และมีสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย สติกเกอร์ Gummed paper และ Gummed tape

#### 2.3.4.5 อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม

มีการใช้แป้งเป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้น (Thickener) ในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว (Stabilizer) หรือเกาะตัวกันดีขึ้น (Binder) และยังช่วยในการเสริมแต่ง (Filler) นอกจากนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต กลูโคส (Glucose) เด็กซ์โทรส (Dextrose) อาหารเด็ก ผลิตภัณฑ์ขนมปัง อาหารกระป๋อง บะหมี่ เครื่องดื่ม ไอศกรีม แยม นมเปรี้ยว ไส้กรอก กุนเชียง ซอส ลูกกวาด และโซดาทำขนม เป็นต้น

#### 2.3.4.6 วัสดุที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

นำแป้งมันสำปะหลังมาแปรสภาพคล้ายพลาสติก ซึ่งเมื่อเติมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ทำให้เกิดเป็นสารผสมที่สามารถนำไปทำเป็นวัสดุภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนผังแสดงประโยชน์ของหมักปุ๋ย [41]

### 2.4 ฟางข้าว (Rice straw)

ข้าวเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ *Oryza sativa* L. [42] เป็นพืชเศรษฐกิจอย่างหนึ่งของประเทศไทย มีการเพาะปลูกกันทั่วทุกภาคของประเทศ ด้วยเหตุนี้เองทำให้เกิดฟางข้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้ และเป็นวัสดุเหลือใช้จำนวนมากภายหลังการเก็บเกี่ยว ในแต่ละปีมีฟางข้าวเฉลี่ยประมาณ 25.45 ล้านตัน ซึ่งเป็นปัญหาของเกษตรกรในการทำนาภายหลังการเก็บเกี่ยว แม้ปัจจุบันฟางข้าวจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายแต่ด้วยภาวะเร่งรัดในการทำนาครั้งต่อไป การเผาฟางจึงเป็นทางเลือกที่สะดวก และรวดเร็วที่สุด ทำให้มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมถึงมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ปัญหาหมอกควัน ซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพทำให้เกิดโรคต่างๆ ได้แก่ โรคทางเดินหายใจ โรคตาแดง และโรคผิวหนัง [5]

ฟางข้าวมีลักษณะเป็นโพรงตรงกลาง และแบ่งออกเป็นปล้องๆ โดยมีข้อกั้นระหว่างปล้อง ความยาวของปล้องนั้นแตกต่างกัน จำนวนปล้องจะเท่ากับจำนวนใบของต้นข้าว เป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่าย มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ย 99:1 มีปริมาณธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เฉลี่ย 0.51 0.14 และ 1.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีปริมาณธาตุอาหารรองของพืช ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟอร์ เฉลี่ย 0.47 0.25 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [43] มีความชื้นขณะเปียก ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และความชื้นขณะแห้ง ประมาณ 10-12 เปอร์เซ็นต์ [44] มีอุณหภูมิในการสลายตัวมากกว่า 280 องศาเซลเซียส [45]



รูปที่ 2.16 ลักษณะทางกายภาพของฟางข้าว [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว

ฟางข้าว สามารถบดให้เป็นชิ้นหรืออนุภาคเล็กๆ ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับอนุภาคของไม้หรือเส้นใยอื่นๆ มาก [44] เป็นหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ฟางข้าวมีเถ้าสูง และมีโปรตีนต่ำ มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส ประมาณ 32-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลส ประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลิกนิน ประมาณ 10-19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิกา 9-14 เปอร์เซ็นต์ [5]

ตารางที่ 2.8 ค่าเฉลี่ยของปริมาณองค์ประกอบในฟางข้าว [42]

องค์ประกอบของฟางข้าว	เปอร์เซ็นต์
Cellulose	32.0
Hemicellulose	29.9
Lignin	18.8
Mineral ash	10.2
• SiO <sub>2</sub>	74.67
• K <sub>2</sub> O	12.30
• MgO	1.75
• Na <sub>2</sub> O	0.96
• CaO	3.01
Other	9.1

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในผนังเซลล์ของฟางข้าว สายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ของพันธะไฮโดรเจน และพันธันอยู่ในรูปของ Micro fibril ที่มีความยาวอยู่ในระดับมิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร Microfibril ที่อยู่ในผนังเซลล์มีโครงสร้างเป็นแบบผลึก และถูกรวมเข้ากับ Gel matrix ที่ประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ พอร์มตัวอยู่ในรูปของ Biocomposite ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าความแข็งแรงดึงที่สูงขึ้น

เซลลูโลสที่มีอยู่ในฟางข้าว เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีมากที่สุด และเป็นทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable source) ที่มีราคาถูก มักใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมกระดาษ แผ่นผนังในงานก่อสร้าง และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น [47]

### 2.4.2 การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว

2.4.2.1 ใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลส (Cellulosic ethanol) เนื่องจากองค์ประกอบของฟางข้าวประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose material) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์พืชที่เกิดขึ้นจากหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส

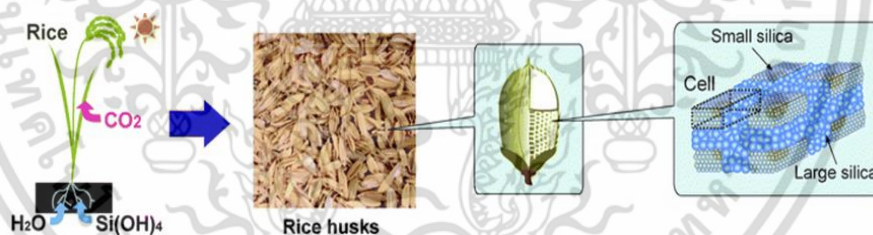
ดังนั้นเอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลสจากฟางข้าวจึงมีสมบัติ และลักษณะทางเคมีเช่นเดียวกับกับเอทานอลที่ผลิตจากน้ำตาล และแป้ง

2.4.2.2 การใช้ผลึกเซลลูโลสจากฟางข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (Nanocomposite) โดยการนำเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงพลาสติก เนื่องจากเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวมีความหนาแน่นต่ำ สามารถลดการสึกกร่อนในเครื่องขึ้นรูปพลาสติก อีกทั้งเส้นใยเซลลูโลสมีความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีราคาถูก

2.4.2.3 การนำฟางข้าวไปใช้เป็นพลังงานทดแทนโดยใช้ชีวมวลจากฟอสซิล [43]

## 2.5 แกลบ (Rice husk)

แกลบ (Local name: Aman rice husk; Scientific name: *Oryza sativa*) [48] คือ เปลือกแข็งของเมล็ดข้าวที่ได้จากการสีข้าว เช่น ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า ข้าวสาลี เป็นต้น เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวล แล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว [6] มีค่า Aspect ratio ที่กว้าง มีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2 เปอร์เซ็นต์ของข้าวเปลือก [14] แกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม [49] เป็นส่วนหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เหลือใช้จากการเกษตรในกระบวนการผลิตข้าวที่มีราคาถูก และถูกแยกออกจากข้าวในระหว่างการสีข้าว ซึ่งในทุกๆ ต้นของการผลิตข้าวจะให้แกลบออกมาประมาณ 0.23 ตัน ซึ่งเป็นปัญหาของชาวนาในการกำจัดทิ้ง เนื่องจากแกลบทนต่อการเสื่อมสภาพ และย่อยสลายยากเมื่อทิ้งไว้ตามพื้นดิน และยังมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ ไม่เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์ [7]



รูปที่ 2.17 ลักษณะภายใน และภายนอกของแกลบ [50]

### 2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

แกลบมีองค์ประกอบทางเคมี เป็นเซลลูโลส 25-35 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 18-21 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 26-31 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 15-17 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น (Moisture content) 5-10 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 2-5 เปอร์เซ็นต์ [7]

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบของแกลบ [7]

องค์ประกอบของแกลบ	เปอร์เซ็นต์
Cellulose	31.12
Hemicellulose	22.48
Lignin	22.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mineral ash	13.87
• SiO <sub>2</sub>	93.19
• K <sub>2</sub> O	3.84
• MgO	0.87
• Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.78
• CaO	0.74
• Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5887
Water	7.86
Extractives	2.33

### 2.5.2 สมบัติของแกลบ

แกลบมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา ไม่ละลายในน้ำ ซิลิกาในแกลบสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุได้ จึงทนทานต่อแรงกระทำสูง มีศักยภาพในการเป็นวัสดุทนความร้อน ทนต่อสภาพอากาศ เหนียว และมีความคงตัวทางเคมี

### 2.5.3 การใช้ประโยชน์จากแกลบ

ด้านการเกษตร ใช้ผสมเพื่อปรับสภาพดิน ใช้ทำปุ๋ยหมัก และใช้กันความชื้นในคอกสัตว์  
ด้านการก่อสร้าง เป็นส่วนผสมในการทำอิฐเมื่อเผาเป็นถ่านแล้วเพิ่มสารเคมีบางประเภทใช้เป็นวัสดุถมในงานถนนได้ และใช้เป็นส่วนผสมการผลิตซีเมนต์

ด้านพลังงาน และอุตสาหกรรม ใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาเป็นถ่านขาวจนมีคุณสมบัติเป็นต่างใช้เป็นส่วนผสมของสบู่ ยาสระผม และน้ำยาล้างจาน เป็นต้น ใช้ทำแท่งถ่านอัดซีเมนต์แกลบ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ดูดซับก๊าซจากกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม [8]

## 2.6 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

### 2.6.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จุลินทรีย์ หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้ว จะเหลือเพียงน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีกระบวนการหลัก 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการย่อยสลายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอก็จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่ 2 ภายในเซลล์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) นี้ก็คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ [51] พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถจำแนกตามกลไกของการย่อยสลายได้ ดังต่อไปนี้

2.6.1.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโต และดำรงชีวิตของพืชที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรีย และเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งผู้บริโภคบางรายที่กลัวว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะเกิดการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งานโดยทำให้อายุการใช้งานสั้น และไม่คุ้มค่าในการใช้งานนั้น ไม่ต้องกังวลในจุดนี้อีกต่อไป เพราะทราบได้ที่เราไม่ทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ให้เป็นขยะ โดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบ และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลาย ก็จะไม่เกิดการย่อยสลาย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มการทำตลาดที่ดี และมีการผลิตเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ Polylactic Acid (PLA) และ Polyhydroxyalcanoates (PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากธรรมชาติคือ ใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง และข้าวโพด ให้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากพลาสติก 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีพลาสติกย่อยสลายได้ที่นิยมในตลาดเช่นกัน นั่นคือ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบปิโตรเคมีมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพลาสติกทั้ง 2 ชนิดข้างต้น ซึ่งได้มาจากพืชธรรมชาติ

2.6.1.2 พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation plastics) หรือบางครั้งเรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (Bio-erodible plastics) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวีหรือแสงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) ของแสง และความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัย และพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.3 พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradable plastics) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น มีหมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว สัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งขึ้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรงพลาสติกชนิดนี้ต้องใช้ในภูมิภาคที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวตามอัตราที่คาดการณ์ได้

2.6.1.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น Depolymerase, Lipase, Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [52]

## 2.6.2 การนำพลาสติกชีวภาพไปใช้งาน

พลาสติกชีวภาพสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภทเช่นเดียวกับพลาสติกจากปิโตรเคมี ส่วนใหญ่ถูกใช้ในงานที่เน้นคุณสมบัติการย่อยสลายได้ โดยมีตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในระดับสากลที่ได้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ท้องตลาดแล้ว เช่น

### 2.6.2.1 การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือไหลละลาย และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัด และฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.2.2 สารเคลือบกระดาษหรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

### 2.6.2.3 फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืช ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บ และการจัดการฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุ และสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสาร เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

### 2.6.2.4 ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติก และฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูง และยังไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยก และทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป เพื่อผลิตเป็นถุง และฟิล์มในบางโอกาส

### 2.6.2.5 ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food Waste Film and Bags)

ฟิล์ม และถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมัก

### 2.6.2.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer Packaging Materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บ และทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูป และอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.2.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทก โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้ามีข้อดี คือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้าย และขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวก และประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้ง และพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำ และย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน และสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว [53]

### 2.6.3 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตรถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ และพอลิเมอร์ ตามลำดับ จากนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จะผ่านการปรับปรุงสมบัติ และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เมื่อหมดอายุการใช้งานหรือไม่เป็นที่ต้องการแล้ว การนำไปทิ้งในสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้พลาสติกเหล่านี้ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [54]

## 2.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

### 2.7.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักแห้ง สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ  
 $C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้  
 $C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้น ร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์  
 ก่อนการย่อยสลาย

## 2.7.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งในปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

## 2.7.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

### 2.7.3.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้าง และสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

### 2.7.3.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งทิ้งไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไป และมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำ และเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำมาฝังดินไว้ 6 เดือนมาตรวจสอบปริมาณไนโตรเจน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโต และสร้างโคโลนีบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแบงบนพอลิเมอร์โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

#### 2.7.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับ และความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแบงที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้จุลินทรีย์ย่อยสลายแบงจะเกิดรูที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

#### 2.7.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

2.7.5.1 การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะของสัณฐานของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก

2.7.5.2 การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่าย และรวดเร็ว ใช้การศึกษาการย่อยสลายแบงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแบง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแบงก่อน และหลังการย่อยสลาย

#### 2.7.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ [2]

#### 2.7.7 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กันโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ  $2d\sin\theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

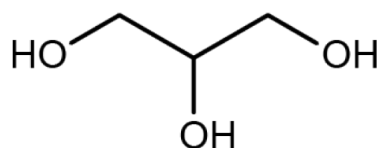
มุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [55]

## 2.8 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์ (Polymer) หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดจุดหลอมที่ทำให้เกิดการไหล (Flexing temperature) ของพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกมีความยืดหยุ่น และอ่อนนุ่มขึ้น สะดวกต่อการดึง รีด ฉาบ หรือหล่อแบบ และยังเป็นตัวรักษาความอ่อนนุ่มไม่ให้เสียไปโดยง่าย อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อกรดต่าง น้ำมัน และผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นำไปทำประโยชน์ได้มากมาย เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร พิล์มห่ออาหาร เครื่องมือแพทย์ รองเท้า กระเป๋า กระเบื่อง่ายๆ พื้น สายไฟ และท่อน้ำ เป็นต้น โดยมีการใช้พลาสติไซเซอร์ในอุตสาหกรรมพลาสติก PVC ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการใช้พลาสติไซเซอร์ทั้งหมด [56]

### 2.8.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (Glycerin) มีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีรสหวานเล็กน้อย กลีเซอรอล เป็นสารจำพวกพอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_3H_8O_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล และมีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) จากภาพโครงสร้างของกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.19 พบว่ากลีเซอรอลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งใน 2 หมู่เป็นของไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของกลีเซอรอล [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล [57]

สมบัติทางกายภาพ และทางเคมี	ข้อมูล
สูตรทางเคมี	$\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$ หรือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะ และสี	ของเหลว ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 °C
จุดเดือด	290 °C
สมบัติการละลายใน 100 ส่วน น้ำ	ละลายดีมาก
แอลกอฮอล์	ละลายดีมาก
อีเทอร์	ไม่ละลาย
ความร้อนของการหลอมเหลวที่ 18.07 °C	47.49 cal/g
ความหนืดของกลีเซอรอลในเหลวที่ ความบริสุทธิ์ 100%	10 cP
ความบริสุทธิ์ 50%	25 cP
การแพร่กระจายใน i-Amyl alcohol	$0.12 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
เอทานอล	$0.56 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
น้ำ	$0.94 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$

สำหรับสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของกลีเซอรอล แสดงในตารางที่ 2.10 พบว่ากลีเซอรอลละลายได้ดีทั้งในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้งฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออลเอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิก ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ และไดออกเซน ไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น ดังนั้นการที่กลีเซอรอลละลายได้ในสารหลายประเภท จึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอาง เป็นต้น [57]

## 2.9 สารหล่อลื่น

เป็นสารที่ช่วยลดความฝืดในเครื่องจักร ทำให้ทำการผสมง่ายขึ้น ตลอดจนทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ติดแม่พิมพ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารหล่อลื่นภายนอก (External Lubricants) เป็นสารที่เติมลงไป เพื่อลดความฝืดระหว่างผิวของพลาสติกกับผิวของโลหะ หรือวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร และแม่พิมพ์

2. สารหล่อลื่นภายใน (Internal Lubricants) เป็นสารที่ช่วยลดความฝืดภายในเนื้อพลาสติก

กล่าวคือ เป็นตัวช่วยลดความฝืดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ควรละเมิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหล่อลื่นบางชนิดมีคุณสมบัติอย่างอื่นอยู่ด้วย เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้พลาสติก หรือเป็นพลาสติกไฮเซอไรด์ด้วย สารหล่อลื่นมีอยู่ 4 กลุ่ม คือ

1. สารไฮโดรคาร์บอน
2. กรดไขมัน และอนุพันธ์ของกรดไขมัน
3. กลีเซอรอล และแอลกอฮอล์
4. ไพซีนธรรมชาติ

เรซินบางชนิดมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นตัวเอง เรียกว่า Self-lubricants [58]

### 2.9.1 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate)

Magnesium stearate อาจเรียกว่า Octadecanoic acid หรือเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) มีลักษณะเป็นผงสีขาวเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรทางเคมีคือ  $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$  ซึ่งเป็นเกลือของกรดสเตียริก (Stearic acid) กับแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) แมกนีเซียมสเตียเรท มีจุดหลอมเหลวที่ 120 องศาเซลเซียส ไม่ละลายในน้ำได้รับการพิจารณาโดย FDA's Subcommittee ว่าปลอดภัยสำหรับมนุษย์ จึงจัดเป็นสารในกลุ่ม GRAS (Generally recognized as safe) ปริมาณการบริโภค ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน [59] และแมกนีเซียมสเตียเรท มีประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

- ทางเภสัชกรรม ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในยาเม็ดที่ผ่านการอัด
- ทางผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในเครื่องสำอางใช้ผสมกับแป้งเพื่อป้องกันหน้าแห้ง ทำให้หน้าดูเป็นธรรมชาติ
- ทางอาหาร ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในอาหาร [60]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 J. Prachayawarakorn และคณะ ได้ศึกษาการเตรียม และสมบัติต่างๆ ของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch; TPS) จากแป้งถั่วเขียว (Mung bean starch) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอไรด์ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็รรอบ 50 รอบต่อนาที มีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 ส่วน สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่ดี และสามารถเข้ากับเมทริกซ์ สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูงขึ้น และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงมีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด [10] ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.10.2 J. Prachayawarakorn และคณะ** ได้ศึกษาผลของปริมาณ และขนาดของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ เส้นใยปอและเส้นใยนุ่น โดยใช้ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง และกลีเซอรอล โดยเริ่มจากการเตรียมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล และผสมเส้นใยต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิด แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป เมื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นจากการเติมเส้นใยเซลลูโลส อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปอ แต่มีแนวโน้มอุณหภูมิการสลายตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนุ่น สำหรับการดูดซับน้ำพบว่าเมื่อผสมเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าการดูดซับน้ำลดลง [11]

**2.10.3 J. Prachayawarakorn และ W. Hwansanoet** ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไนลอน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใย 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้ง ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนการดูดซับความชื้นเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่างๆ ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง และเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่ดี และสามารถเข้ากับเมทริกซ์แป้งได้ นอกจากนี้พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยชนิดต่างๆ และจากการศึกษาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย [12]

**2.10.4 M. E. Vallejos และคณะ** ได้ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง เสริมแรงด้วยเส้นใยจากชานอ้อยที่ถูกสกัดแยกด้วยเอทานอล และน้ำ โดยมีแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังเป็นเมทริกซ์ และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นทำการผสมเส้นใยลงไปอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง แล้วทำการผสมโดยใช้เครื่อง Rheomix 600 จากนั้นกดด้วยแผ่นเพลตร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่า ชิ้นงานที่มีการใส่เส้นใย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 44 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแป้งข้าวโพด และ 47 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแป้งมันสำปะหลัง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และมอดูลัสสะสม (Storage modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการยืดตัว และการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการใส่เส้นใยลงไปในตัววัสดุคอมโพสิตสามารถปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้ [13]

**2.10.5 K. Kaewtatip และ J. Thongmee** ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยบวบ (Luffa) เป็นส่วนเสริมแรงในคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ปริมาณเส้นใยบวบในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ แล้วทำการผสมโดยใช้เครื่อง Kenwood, KM260 จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกดอัด พบว่า เส้นใยบวบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และค่าความแข็งแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ โดยที่ปริมาณเส้นใยบวบ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่มากที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า TPS/Luffa มีการดูดซับน้ำน้อยกว่า TPS และมีการดูดซับน้ำน้อยลงเมื่อปริมาณของเส้นใยบวบเพิ่มขึ้น ผลจาก SEM ไม่พบช่องว่างระหว่างภูมิภาคของ TPS เมทริกซ์ และเส้นใยบวบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสององค์ประกอบสามารถเข้ากันได้ดี เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน สามารถยืนยันได้จากสเปกตรัมของ FTIR จากผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเส้นใยบวบสามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ [14]

**2.10.6 A.A.S. Curvelo และคณะ** ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยเซลลูโลสจากเยื่อคาลิปต์สเป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สามารถเตรียมได้จากแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยฟอกขาวขนาดสั้น (16% w/w) เส้นใยที่ใส่ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางความร้อน คือ DSC และ TGA และการทดลองการดูดซับน้ำ คอมโพสิตที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ และมอดูลัสเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่เสริมแรง ส่วนความแตกต่างของค่า  $T_g$  ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และคอมโพสิตนั้นพิจารณาจากอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า  $T_g$  น้อยกว่าคอมโพสิตที่ผสมเส้นใย 16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TGA ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เกิดการลดลงของน้ำหนัก TPS และคอมโพสิต เท่ากับ 30 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การดูดซับน้ำของ TPS ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสดูดซับน้ำได้น้อยกว่าสตาร์ช ส่วนการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์นั้น ส่งผลให้ TPS มีความว่องไวต่อน้ำมากขึ้น การวิเคราะห์การแตกหักของพื้นผิวด้วยวิธีการส่อง SEM แสดงให้เห็นถึงการติดแน่นที่ดีระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ จากผลเหล่านี้ทำให้เห็นถึงข้อดีของการใช้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งมีราคาถูกและมีปริมาณมาก [61]

**2.10.7 J. Prachayawarakorn และคณะ** ศึกษาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำหรือเส้นใยฝ้าย ซึ่งทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) โดยการใช้แป้งข้าวเจ้ามาเป็นส่วนผสมหลัก และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมกลีเซอรอลกับแป้งเป็น 1:1 ทำการเตรียมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ และความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียส และ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และเติมสารช่วยผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน และไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน พบว่า มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ ไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน แต่การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน และไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน ทำให้การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง [62]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.10.8 J. Prachayawarakorn และ W. Pattanasin** ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยการใส่แป้งมันสำปะหลังมาเป็นส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกทิน และเส้นใยฝ้าย โคโตซาน และเส้นใยฝ้าย และเพกทินผสมโคโตซาน และเส้นใยฝ้าย โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษาหามุมฟังก์ชันพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ  $1720\text{ cm}^{-1}$  และ  $1550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการใส่เพกทิน และโคโตซานเข้าไปในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ตามลำดับ จากการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยโคโตซาน และเส้นใยฝ้าย ดูดซึมน้ำได้น้อยที่สุด จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่า เพกทิน โคโตซาน และเส้นใยฝ้าย สามารถกระจายตัว และเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเพกทิน และเส้นใยฝ้ายให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสูตร [63]

**2.10.9 Y. Tanetrungroj และ J. Prachayawarakorn** ศึกษาอิทธิพลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งถั่วเขียว แป้งข้าวเหนียว และแป้งท้าวยายม่อม ใช้เครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณแป้งของ TPS จากแป้งแต่ละชนิดกับ LDPE พบว่า เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่ส่งผลทำให้พีคช่วง O-H stretching ของ TPS มีความเข้มเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำสูงขึ้น สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่า เบอร์เซนต์การดึงยึด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มการย่อยสลายด้วยการฝังดินเร็วขึ้น แต่ทำให้ค่าดัชนีการไหล ค่าความสว่างจากการวัดสี และอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE ลดลงเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียว และ LDPE แสดงสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติการย่อยสลาย [64]

**2.10.10 A. Kaushik และคณะ** ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพด เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนที่ผลิตโดยการสกัดฟางข้าวสาลีด้วยแรงดันไอน้ำ (Steam explosion) โดยเริ่มจากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนจากฟางข้าวสาลีโดยใช้แรงดันไอน้ำ แล้วทำการปรับปรุงด้วยกรด และการใช้แรงเชิงกล เส้นใยขนาดนาโนจะถูกทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยใช้เครื่องผสมแรงเฉือนสูง (Fluko high shear mixer) เพื่อกำหนดอัตราส่วนการเติมเส้นใย และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นขึ้นรูปขึ้นงานออกมาในรูปของฟิล์มหล่อ (Cast film) เมื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่างๆ ของเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโน และฟิล์มนาโนคอมโพสิตพบว่า สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย และสมบัติในการต้านการซึมผ่านดีขึ้นเมื่อมีการเติมเส้นใยลงไป 10% ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สมบัติมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมเส้นใยที่มากเกินไป เนื่องจากเส้นใยเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดการกระจายตัวไม่ดี ซึ่งทดสอบได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (SEM) และการศึกษาสมบัติเชิงกล (DMA) นอกจากนี้การศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนและพลาสติกไซเซอร์ซึ่งเกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ ทำให้อุณหภูมิสลายตัวของผลึก (Enthalpy temperature) และการดูดซึมน้ำลดลง [65]

**2.10.11 E. M. Teixeira และคณะ** ทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เซลลูโลสนาโนไฟบริลจากกากมันสำปะหลัง (Cassava bagasse) เป็นสารตัวเติม และใช้กลีเซอรอลหรือของผสมระหว่างกลีเซอรอลกับซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปเป็นฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยมีอัตราส่วนในการใส่สารตัวเติมคือ 0 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง ผลของสารตัวเติมที่เติมลงไปในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ ตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (Dynamical mechanical test; DMA) และการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ซึ่งพบว่าผลที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสกัดด้วยกรดทำให้ได้น้ำตาลจากการไฮโดรไลซิสแป้ง ซึ่งน้ำตาลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ด้วย ผลนี้พิจารณาได้จากการลดลงของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแป้ง และการเพิ่มขึ้นของค่าการดัดงอ ณ จุดขาด ในทางกลับกันนาโนคอมโพสิตที่มีการเติมของผสมระหว่างกลีเซอรอลกับซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จะไปขัดขวางการเกิดผลึกของอะไมโลเพกทินบนพื้นผิวของเซลลูโลสไมโครไฟบริลที่เป็นสารตัวเติมในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้การเติมเซลลูโลสนาโนไฟบริลลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซทำให้มีความชอบน้ำที่ลดลง [66]

**2.10.12 M. Bootklad และคณะ** ศึกษาคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ผงเปลือกไข่เป็นสารตัวเติม โดยขนาดอนุภาคที่ใช้อยู่ในช่วง  $26.26 \pm 9.48 \mu\text{m}$  ทำการขึ้นรูปโดยการกดอัด (Compression molding) ผลของการใช้ผงเปลือกไข่ (EP) กับสมบัติของ TPS เมื่อเทียบกับผลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ พบว่าสารประกอบอินทรีย์บนพื้นผิวของผงเปลือกไข่ทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) ที่ส่งเสริมให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแกร่งระหว่างผงเปลือกไข่ และ TPS เมทริกซ์ ซึ่งยืนยันได้จากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการทดสอบฝังดินพบว่าคอมโพสิต TPS/EP ย่อยสลายมากขึ้น และรวดเร็วกว่าคอมโพสิต TPS/CC นอกจากนี้ผงเปลือกไข่ยังเพิ่มสมบัติต้านทานน้ำ และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ TPS [67]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ตรา ปลามังกร ผลิตจาก โรงงานแป้งมัน ไทยท่าชลบุรี

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง [72]

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	
- อะไมโลส	15.9-22.4
- อะไมโลเพคติน	61.59-83.0

3.1.2 ฟางข้าว จากเขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

3.1.3 แกลบ จากโรงสีพิมานวรกิจ 1999

3.1.4 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดทางการค้า จากบริษัท Lab System

3.1.5 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

3.1.6 น้ำมันซิลิโคน จากบริษัท Dow Corning Corporation

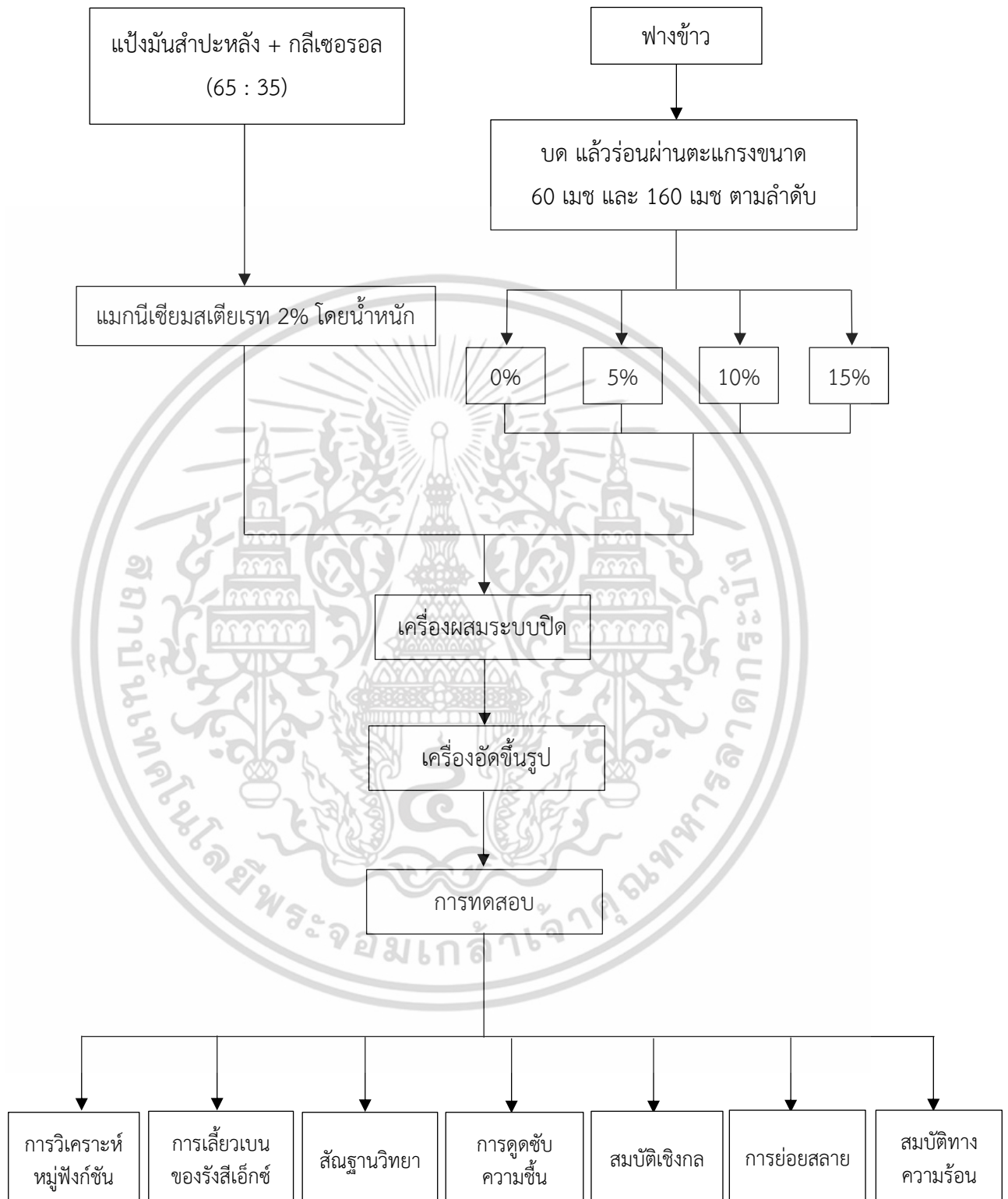
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer): Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding): บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT
- 3.2.3 เครื่องบดละเอียด: Retsch รุ่น ZM 100
- 3.2.4 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K
- 3.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM): LEO รุ่น 1450k
- 3.2.6 เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA): Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT
- 3.2.7 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FTIR): Perkin Elmer รุ่น FT-IR spectrum GX
- 3.2.8 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์: CEAST รุ่น 6052
- 3.2.9 เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (g): Precisa Instrument
- 3.2.10 เครื่องปั่นเนกประสงค์: Sharp รุ่น EM-44A
- 3.2.11 ตู้อบความร้อน: Memmert รุ่น UF 55
- 3.2.12 แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
- 3.2.13 ถูมือกันความร้อน
- 3.2.14 เกรียง
- 3.2.15 ก่อปิดสนิท
- 3.2.16 แผ่นใสถ่ายเอกสาร
- 3.2.17 ไมโครมิเตอร์
- 3.2.18 ถูซิล
- 3.2.19 กรรไกร

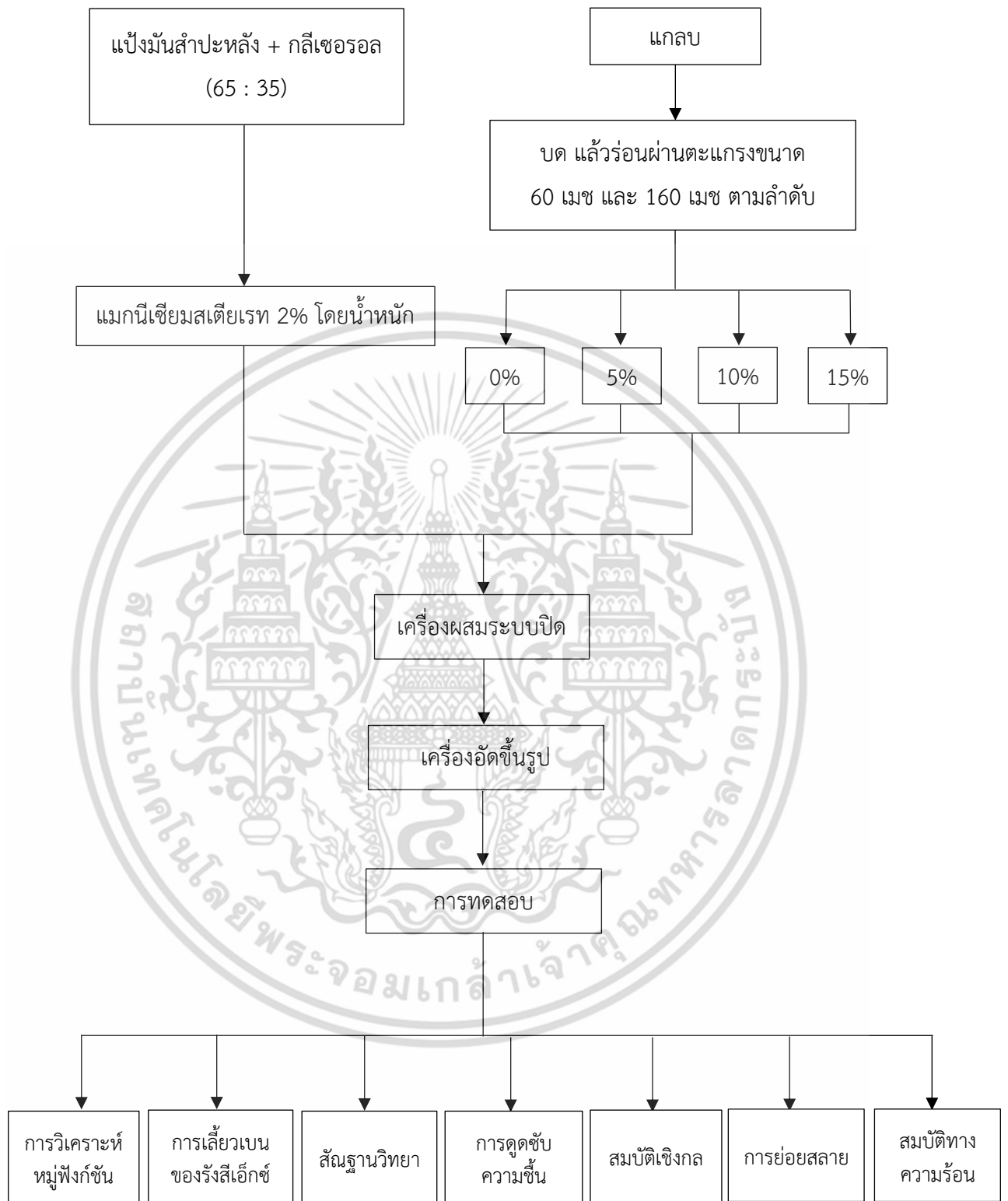
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัยในโครงการพิเศษนี้ แสดงได้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมฟางข้าว

3.3.1.1 นำฟางข้าวมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.1.2 นำฟางข้าวไปบดด้วยเครื่องบดเนกประสงค์

3.3.1.3 นำฟางข้าวไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด ด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช และ 160 เมช ตามลำดับ

3.3.1.4 นำฟางข้าวที่ทำการบดแล้ว มาเก็บในกล่องที่มีฝาปิดสนิท

#### 3.3.2 การเตรียมแกลบ

3.3.2.1 นำแกลบไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.2.2 นำแกลบไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด ด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช และ 160 เมช ตามลำดับ

3.3.2.3 นำแกลบที่ทำการบดแล้ว มาเก็บในกล่องที่มีฝาปิดสนิท

#### 3.3.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

3.3.3.1 นำแป้งมันสำปะหลังมาหมักกับกลีเซอรอลเพื่อให้กลีเซอรอลซึมลงไป ในเม็ดแป้ง เป็นเวลา 1 คืน โดยใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 65 และกลีเซอรอล 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.3.2 นำส่วนผสมมาผสมกับแมกนีเซียมสเตียเรท 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.3.3 นำส่วนผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.3.4 ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดรูป โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้ววางแผ่นใส และทาน้ำมันซิลิโคนลงบนแผ่นใสด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.3.3.5 วางเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงบนแม่พิมพ์ ประคบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันแล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi

3.3.3.6 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และนำไปเก็บในถุงปิดสนิทแล้วนำไปทดสอบต่อไป

#### 3.3.4 การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกด้วยฟางข้าวหรือแกลบ

3.3.4.1 นำแป้งมันสำปะหลังมาหมักกับกลีเซอรอลเพื่อให้กลีเซอรอลซึมลงไป ในเม็ดแป้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 65 และกลีเซอรอล 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.4.2 นำส่วนผสมมาผสมกับแมกนีเซียมสเตียเรท 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 จากนั้นนำฟางข้าวหรือแกลบ ที่ปริมาณต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2 มาผสม ในเครื่องผสมระบบปิดอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

**ตารางที่ 3.2** อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง กลิเซอรอล แมกนีเซียมสเตียเรท แกลบ และฟางข้าว ที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	แมกนีเซียมสเตียเรท (กรัม)	ฟางข้าว (กรัม)	แกลบ (กรัม)
65	35	2.0	-	-
65	35	2.0	5.0	-
65	35	2.0	10.0	-
65	35	2.0	15.0	-
65	35	2.0	-	5.0
65	35	2.0	-	10.0
65	35	2.0	-	15.0

3.3.4.4 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ละสูตร ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi

3.3.4.5 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และนำไปเก็บในถุงปิดสนิท แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.4.1 การหาโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชันโดย FTIR

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำสารตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2 - 0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์ และนำเข้าเครื่องอัดเม็ด ภายใต้ความดัน  $10^{-4}$  kg/cm<sup>2</sup> นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ และนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

#### 3.4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กัน โดยกำหนดขอบเขตของการคำนวณพื้นที่ได้กราฟในส่วนบริเวณผลึกที่มุม 10-30° และบริเวณพื้นที่ทั้งหมดที่มุม 5-60° เหมือนกัน ในทุกตัวอย่าง เพื่อระบุวิวัฒนาการของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่ความหนา 200 μm และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 5-60° ด้วยอัตราเร็ว 1°/ นาที แล้วปล่อยรังสีเอกซ์ (Cu-Kα) เข้าชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้ Step time 5 นาที เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Percent crystallinity} = \frac{I_{\text{Crystalline}}}{(I_{\text{Crystalline}} + I_{\text{Amorphous}})}$$

เมื่อ  $I_{\text{Crystalline}}$  คือ พื้นที่ได้กราฟบริเวณที่เป็นผลึก  
 $I_{\text{Amorphous}}$  คือ พื้นที่ได้กราฟบริเวณอสัณฐาน

#### 3.4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาหักหลังจากแช่ไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำตัวอย่างเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาภาพตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่างๆ เพื่อดูการกระจายตัว และรอยต่อระหว่างวัฏภาค นอกจากนี้นำมาใช้หาค่า Aspect ratio (L/D ratio) ของเส้นใยชนิดต่างๆ

#### 3.4.4 การดูดซับความชื้น

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปวางในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกทุกๆ 1 วัน ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น  
 $W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ  
 $W_w$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

### 3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.3

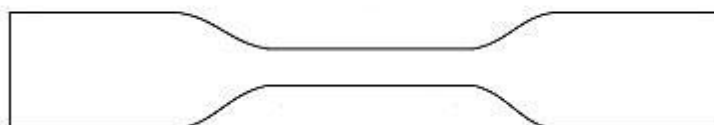
ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D638	MPa
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (%Strain at maximum load)	ASTM D638	%
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D638	MPa

3.4.5.1 ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และ มอดุลัส

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม NEXYGEN ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 8 ชิ้นต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามสภาวะดังนี้

Test Speed:	40 mm/min
Gauge length:	25 mm
Load cell:	1 kN



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่ใช้ทดสอบ [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความเค้น (Stress)} &= \frac{F}{A} \\ \text{โมดูลัส (Modulus)} &= \frac{F/A}{(L-L_0)/L_0} \\ \text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด} &= \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \\ (\% \text{ Strain at maximum load}) \end{aligned}$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)  
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm<sup>2</sup>)  
 L คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุด หลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)  
 L<sub>0</sub> คือ ระยะทางที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุด และพื้นที่หน้าตัดขนาดกัน (mm)

#### 3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ชิ้น ฝังดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 8 – 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 1 และ 2 สัปดาห์ จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

#### 3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การศึกษสมบัติทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 10 – 12 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ใช้ช่วงอุณหภูมิ 50 – 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณฟางข้าว และแกลบที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง โดยกำหนดอัตราส่วนของฟางข้าว และแกลบ เท่ากับ 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สันฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้ โดยสัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลสูตรต่างๆ

สูตร	สัญลักษณ์
แป้งมันสำปะหลัง	CS
แกลบ	RH
ฟางข้าว	RS
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ	TPCS
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+5%RS
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+10%RS
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+15%RS
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+5%RH
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+10%RH
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	TPCS+15%RH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณองค์ประกอบในฟางข้าว และแกลบ [7, 42]

องค์ประกอบ	ฟางข้าว (เปอร์เซ็นต์)	แกลบ (เปอร์เซ็นต์)
Cellulose	32.00	31.12
Hemicellulose	29.90	22.48
Lignin	18.80	22.34
SiO <sub>2</sub> (Silica)	7.62	12.93
Others	9.10	7.86

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วนต่างๆ ให้ผลการทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้



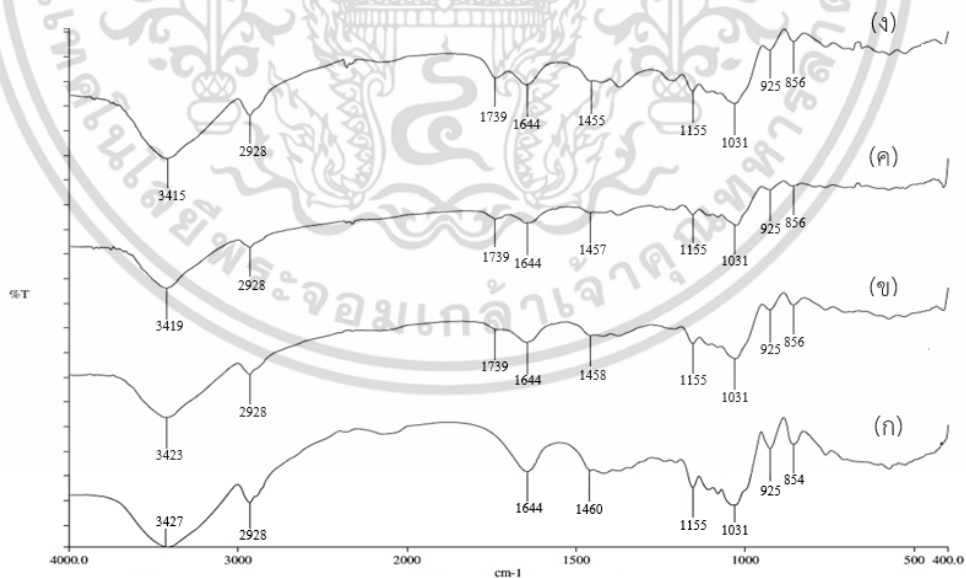
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทำได้โดยใช้เครื่อง Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอรอล กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ พิคที่ปรากฏขึ้นมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

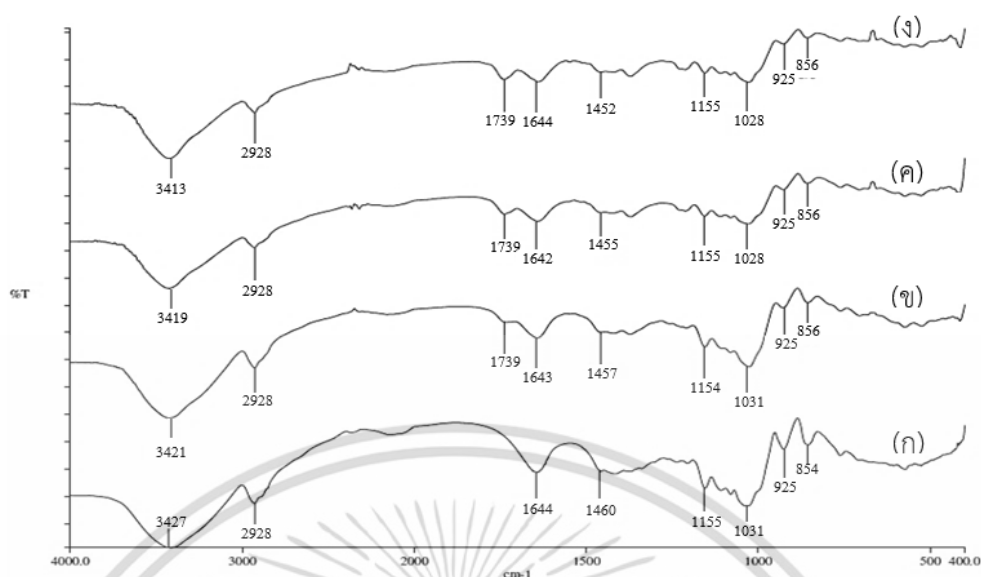
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น [70]

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะการสั่น
3600-3200	O-H stretching
3000-2800	Alkanes C-H stretching
1750	C=O stretching
1640	Bounded water
1485-1420	O-H bending
1300-1100	C-O stretching
1200-1000	C-O-H bending
940-900	C-H out of plane bending
860-800	C-H out of plane bending
770-735	C-H out of plane bending
600	C-H ของ $\text{CH}_2$ rocking



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ โดย (ก) TPCS (ข) TPCS+5%RS (ค) TPCS+10%RS และ (ง) TPCS+15%RS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของแกลบในอัตราส่วนต่างๆ โดย (ก) TPCS (ข) TPCS+5%RH (ค) TPCS+10%RH และ (ง) TPCS+15%RH

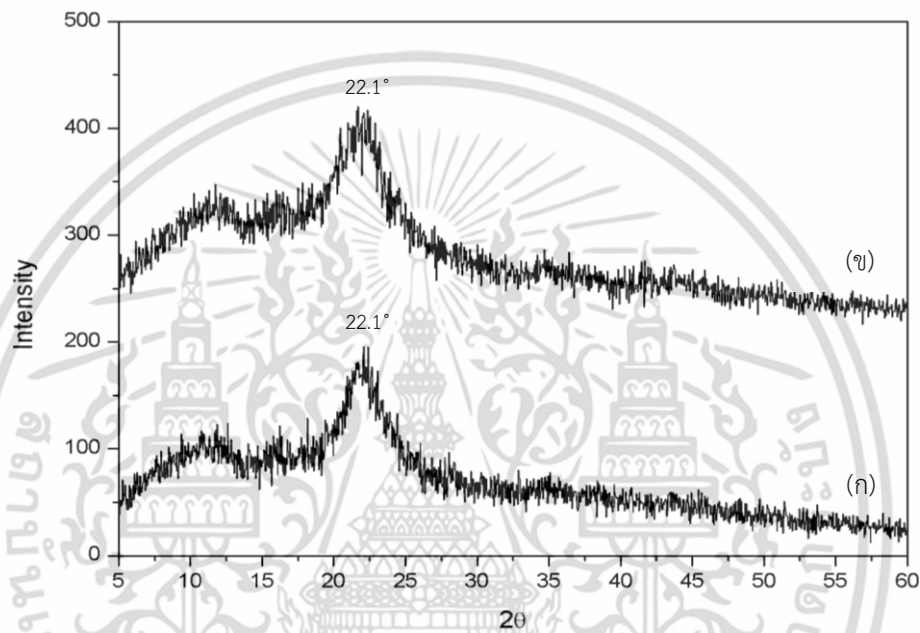
จากรูปที่ 4.1 (ก) - 4.2 (ก) แสดงสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่า สเปกตรัมอินฟราเรดมีลักษณะของพีกในช่วงความยาวคลื่น  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พีกในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C-H Stretching ของ  $\text{CH}_2$  ของแป้งและกลีเซอรอล พีก  $1640\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากน้ำในโมเลกุลของแป้ง พีกช่วง  $1300-1100\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นแบบ C-O Stretching ของแป้ง พีกที่ตำแหน่ง  $1460\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ O-H Bending พีกช่วง  $1200-1000\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นแบบ C-O-H Bending และพีกช่วง  $900-735\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นแบบ C-H out of plane bending [71]

เมื่อเติมฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วนต่างๆ ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ดังรูปที่ 4.1-4.2 (ข)-(ง) จะได้พีกที่มีลักษณะคล้ายกับพีกของแป้ง เนื่องจากแป้ง ฟางข้าว และแกลบมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน โดยความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ พบว่าพีก  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นของ O-H Stretching และพีก  $1460\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H bending จากแป้ง มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ ระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewta Kaewtatip and Jariya Thongmee [14] และ Jutarat Prachayawarakorn and Worawan Pattanasin [72] และนอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่  $1739\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่อะเซทิล ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเอมิเซลลูโลสหรือลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว และแกลบ [73]

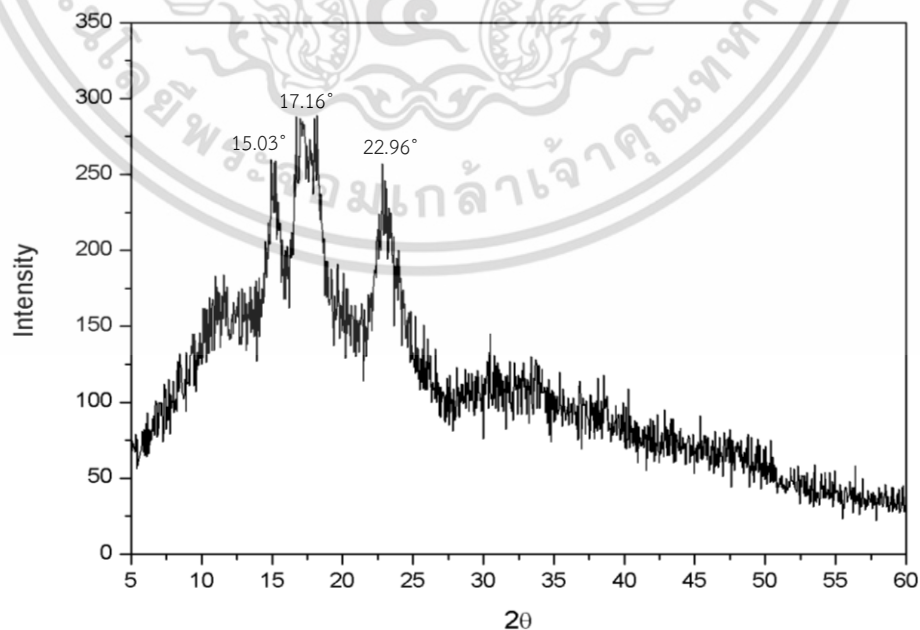
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก และปริมาณความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ ( $2\theta$ ) อยู่ในช่วง  $5-60^\circ$  และกำหนดขอบเขตของการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟในส่วนบริเวณผลึกที่มุม  $10-30^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ/\text{นาที}$  ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.3 ดิฟแฟร็กโตแกรมของ (ก) ฟางข้าว และ (ข) กลบ

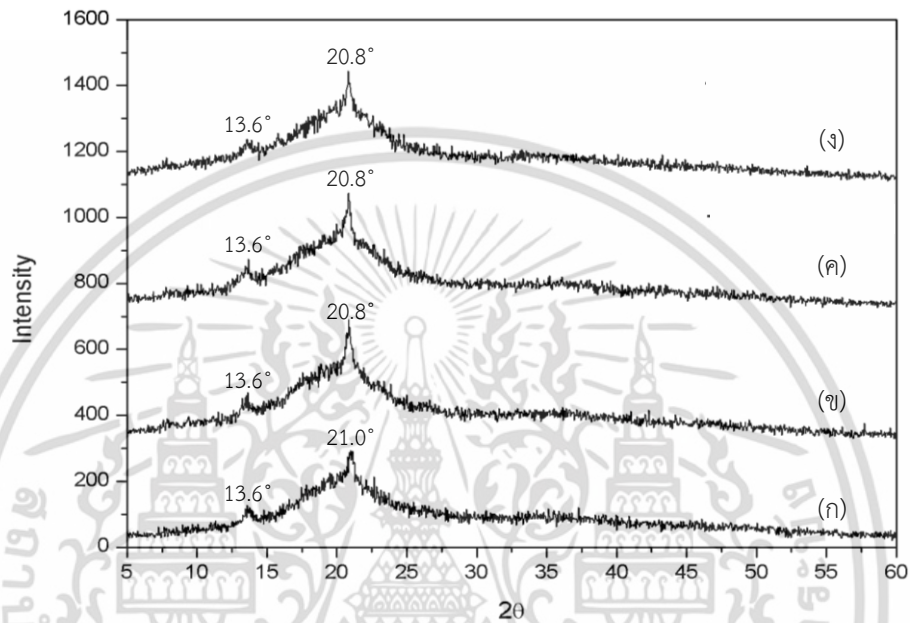


รูปที่ 4.4 ดิฟแฟร็กโตแกรมของแป้งมันสำปะหลัง

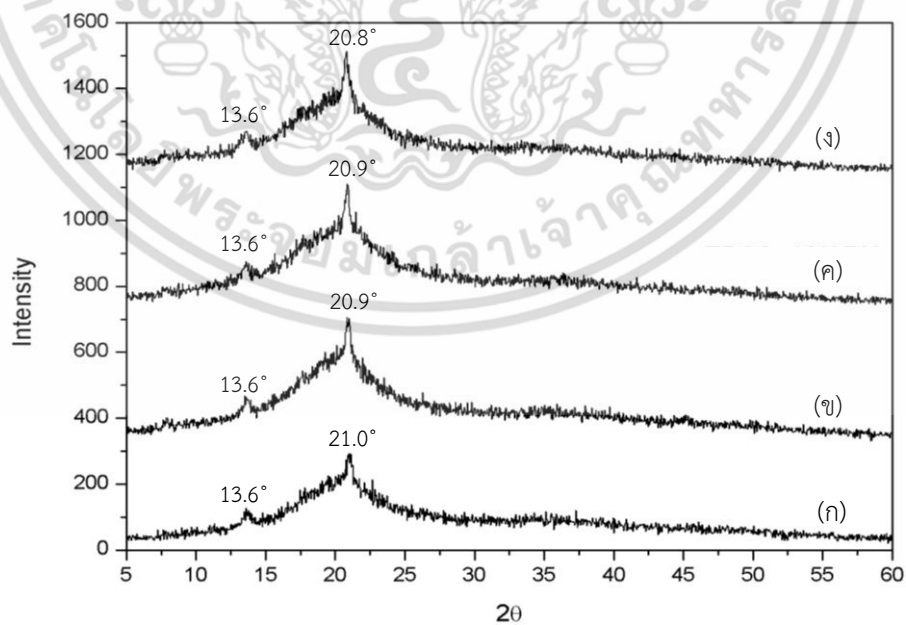
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างผลึกของฟางข้าว (RS) และแกลบ (RH) พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $22.1^\circ$  ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส [74]

จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลัง (CS) พบว่า โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากพืชหัว มีโครงสร้างผลึกแบบ C-type พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $15.03^\circ$   $17.16^\circ$  และ  $22.96^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Léa Rita Pestana Ferreira Mello and Suzana Mali [75]



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟร็กโตแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS+5%RS (ค) TPCS+10%RS และ (ง) TPCS+15%RS



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟร็กโตแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS+5%RH (ค) TPCS+10%RH และ (ง) TPCS+15%RH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5-4.6 แสดงโครงสร้างผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) พบพีคของผลึกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $13.6^\circ$  และ  $21.0^\circ$  [76] โดยพีคที่ทำมุม  $21.0^\circ$  มาจากองค์ประกอบของ TPCS ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ  $V_h$ -type ทั้งหมด ซึ่งเกิดจากการนำแป้งมาเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ แล้วผ่านการให้ความร้อน และแรงเฉือน เพื่อทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ทำให้ลักษณะของผลึกเปลี่ยนแปลงไป และความเป็นผลึกของแป้งถูกทำลาย เกิดเป็นผลึกแบบ  $V_h$ -type [72]

**ตารางที่ 4.4** ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ

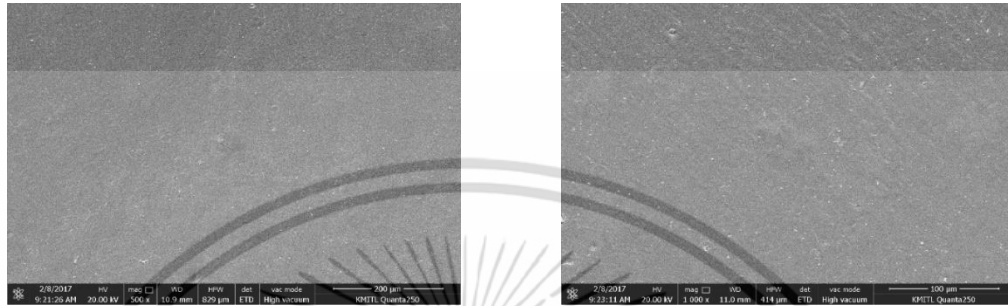
ตัวอย่าง	ความเป็นผลึก (%)
CS	39.96
RS	50.03
RH	55.05
TPCS	38.89
TPCS+5%RS	41.42
TPCS+10%RS	43.13
TPCS+15%RS	44.21
TPCS+5%RH	42.35
TPCS+10%RH	44.14
TPCS+15%RH	47.55

จากตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในฟางข้าว และกลบมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกมากกว่าแป้ง และเซลลูโลสยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ นอกจากนี้ฟางข้าว และกลบยังมีซิลิกาซึ่งอยู่รวมกันเป็นผลึก และในซิลิกายังมีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ เมื่อพิจารณาดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ (รูปที่ 4.5-4.6) พบว่าพื้นที่ใต้กราฟ ของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของฟางข้าว และกลบเพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติแล้ว พบว่า TPCS+15%RH มีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมาคือ TPCS+10%RH, TPCS+15%RS, TPCS+10%RH, TPCS+10%RS, TPCS+5%RH, TPCS+5%RS และ TPCS ตามลำดับ

### 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยพิจารณาขนาดของอนุภาค การกระจายตัว และความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ ให้ผลการทดลองดังนี้

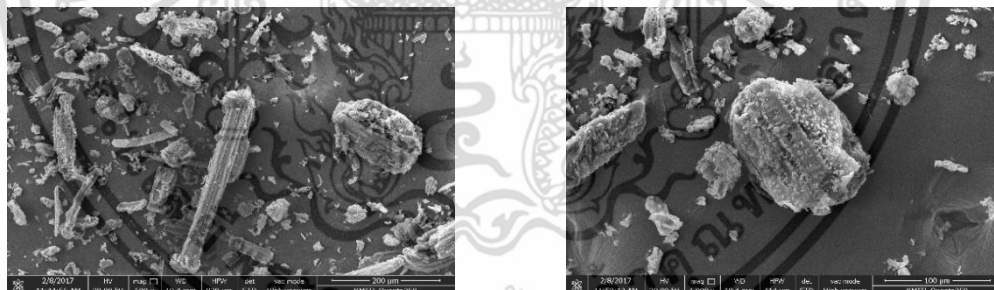


(ก) TPCS, 500X

(ข) TPCS, 1000X

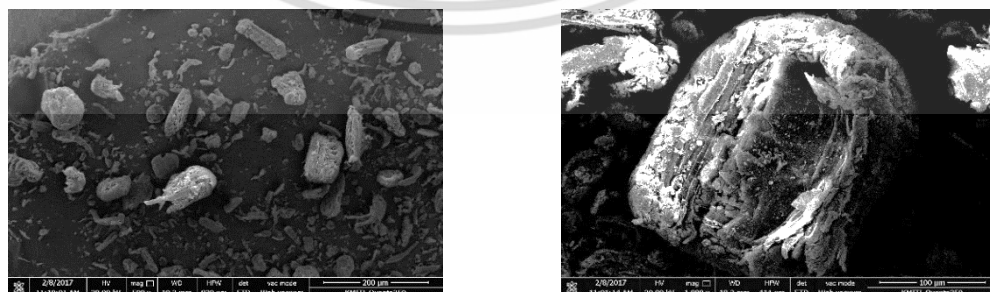
**รูปที่ 4.7** ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีลักษณะพื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียว



(ก) RS, 500X

(ข) RS, 1000X



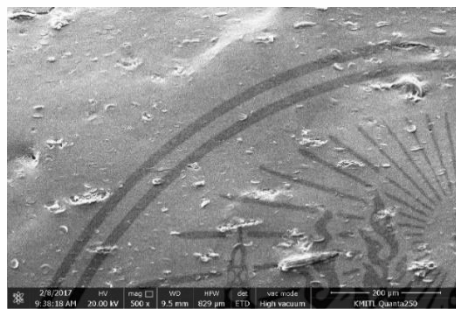
(ค) RH, 500X

(ง) RH, 1000X

**รูปที่ 4.8** ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว และแกลบ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว และแกลบ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1000 เท่า ตามลำดับ พบว่า ฟางข้าวมีลักษณะคล้ายทรงกลมสลับกับอนุภาคยาวเล็กน้อย มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 165.12 ไมโครเมตร และมีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 65.86 ไมโครเมตร จาก 30 ตัวอย่าง และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) มีค่าเท่ากับ  $2.91 \pm 1.78$  ส่วนแกลบมีลักษณะคล้ายทรงกลม มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 161.15 ไมโครเมตร และมีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 104.56 ไมโครเมตร จาก 30 ตัวอย่าง และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) มีค่าเท่ากับ  $1.71 \pm 0.70$  (ภาคผนวก ค)



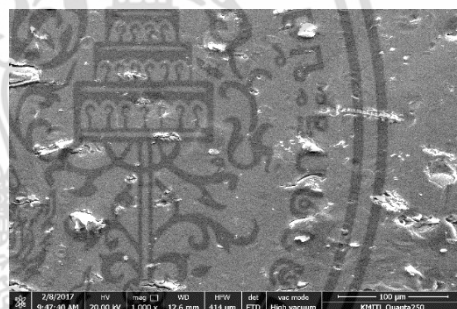
(ก) TPCS+5%RS, 500X



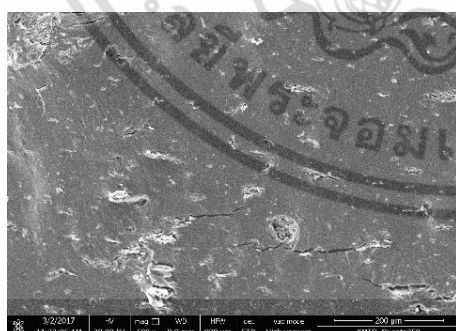
(ข) TPCS+5%RS, 1000X



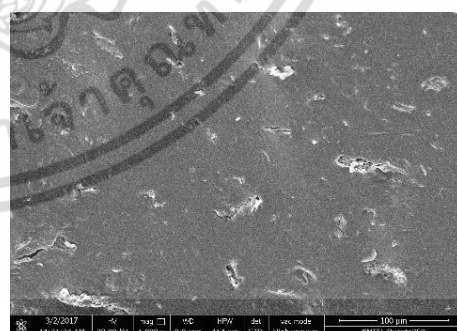
(ค) TPCS+10%RS, 500X



(ง) TPCS+10%RS, 1000X

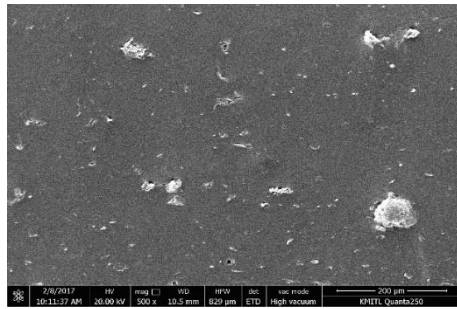


(จ) TPCS+15%RS, 500X

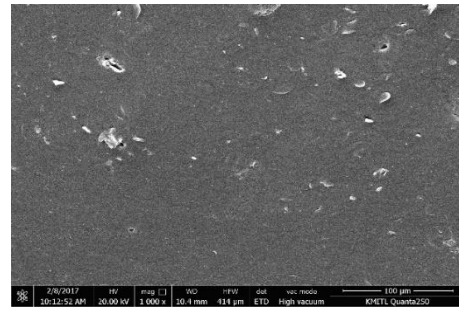


(ฉ) TPCS+15%RS, 1000X

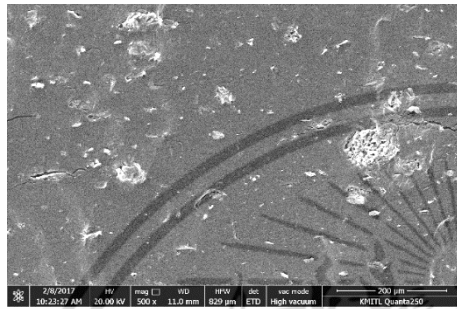
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



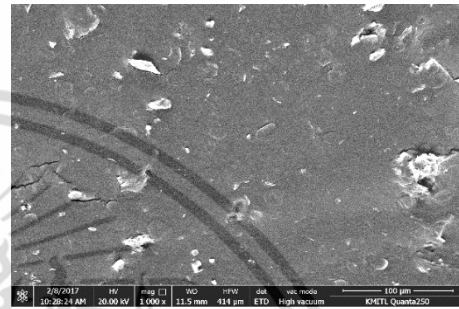
(ช) TPCS+5%RH, 500X



(ซ) TPCS+5%RH, 1000X



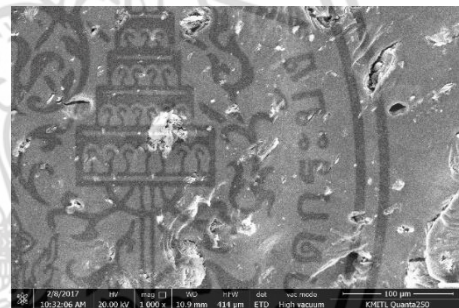
(ฅ) TPCS+10%RH, 500X



(ญ) TPCS+10%RH, 1000X



(ฎ) TPCS+15%RH, 500X



(ฏ) TPCS+15%RH, 1000X

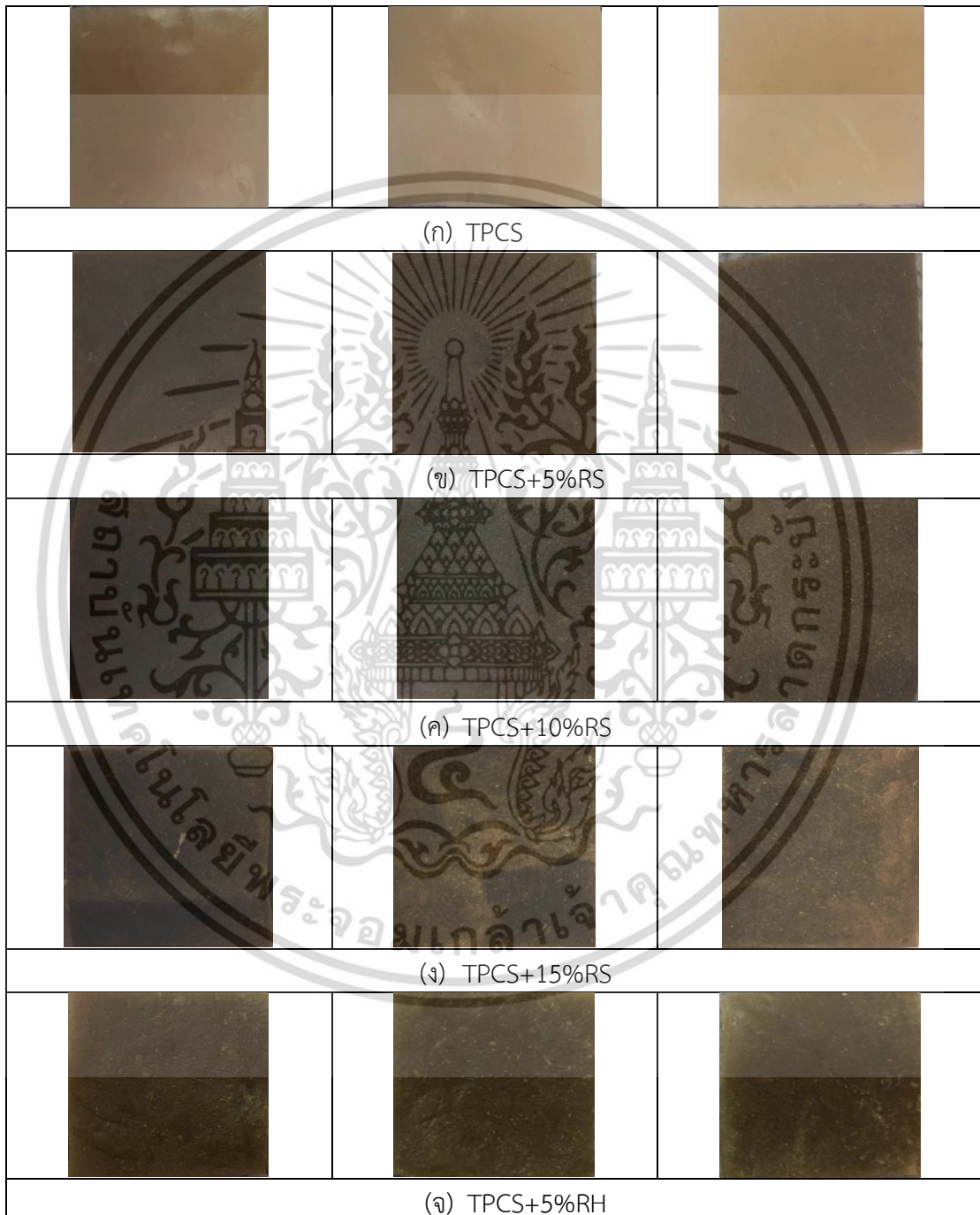
รูปที่ 4.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า

ลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วน 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 4.9) พบว่าฟางข้าว และแกลบไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แต่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และไม่พบรอยต่อระหว่างวัฏภาคขององค์ประกอบทั้งสอง ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับฟางข้าว และแกลบ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับฟางข้าว และแกลบ มีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ และนอกจากนี้ยังพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในปริมาณที่มากขึ้น มีปริมาณของอนุภาคฟางข้าว และแกลบกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมากขึ้นด้วย

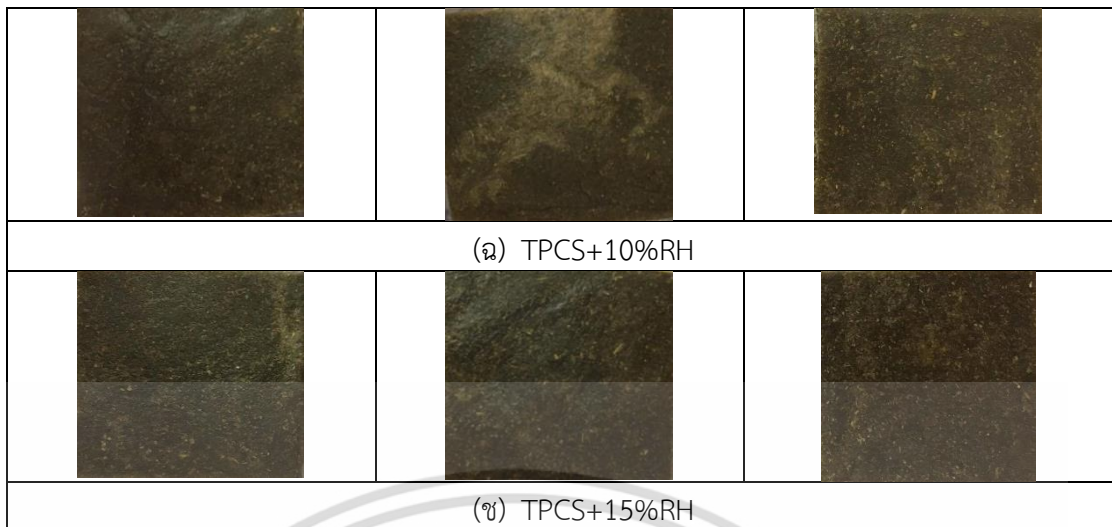
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

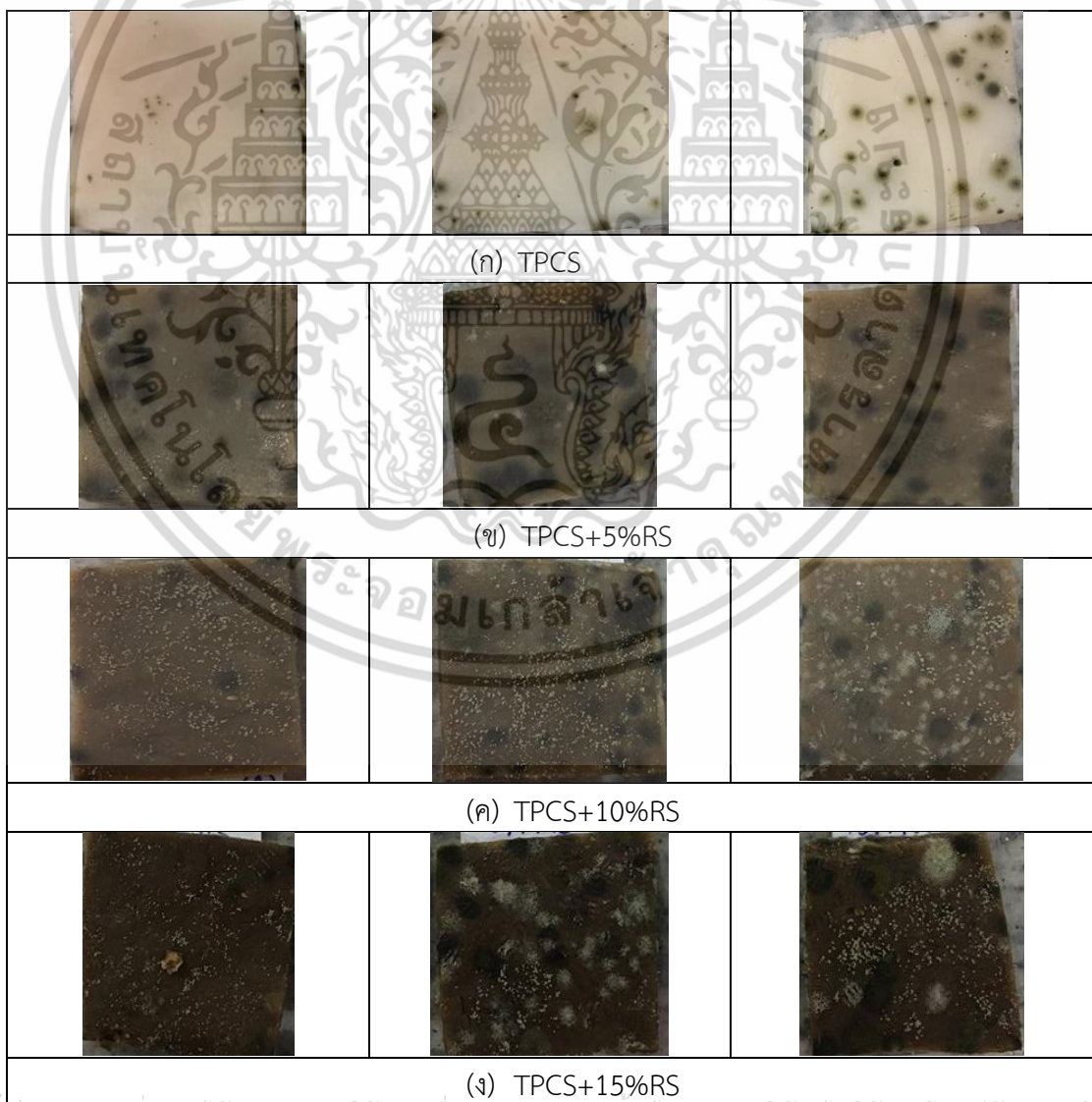
การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ฟางข้าว และกลบในอัตราส่วนต่างๆ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99\pm 1$  เปอร์เซ็นต์ ได้ผลการทดลอง แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10-4.13 และภาคผนวก ง



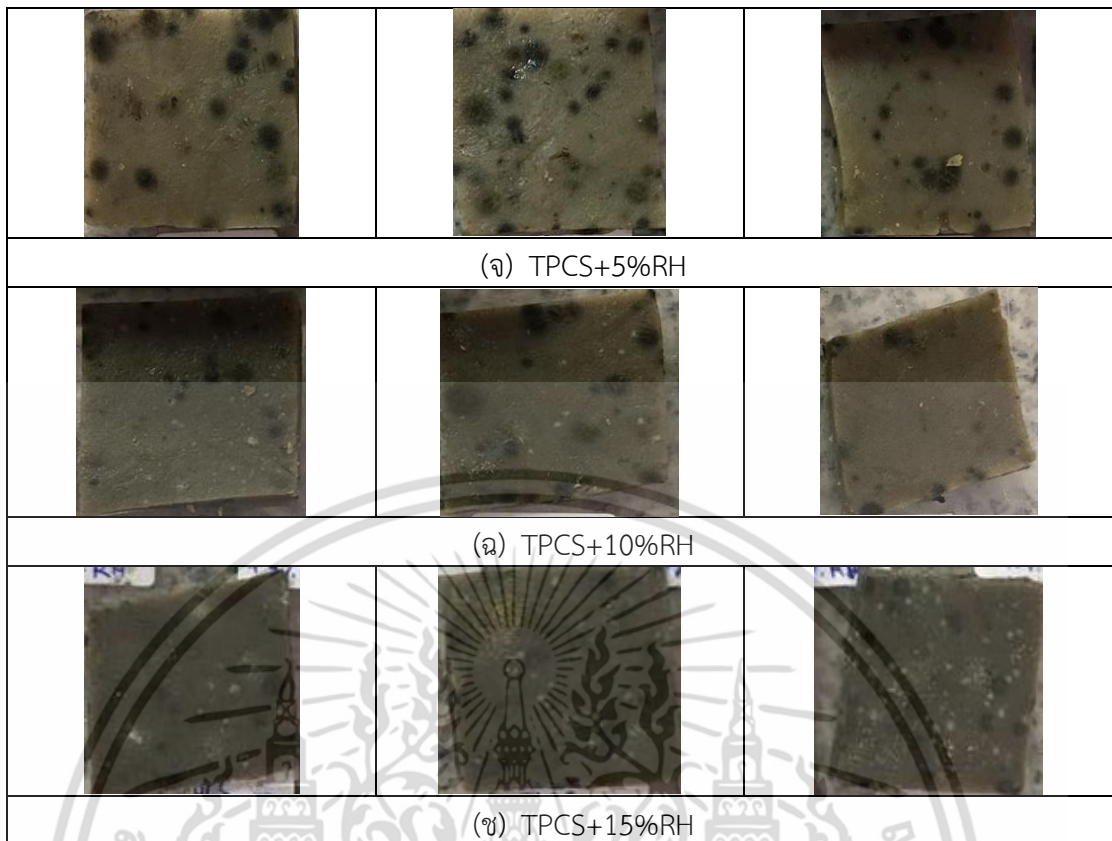
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



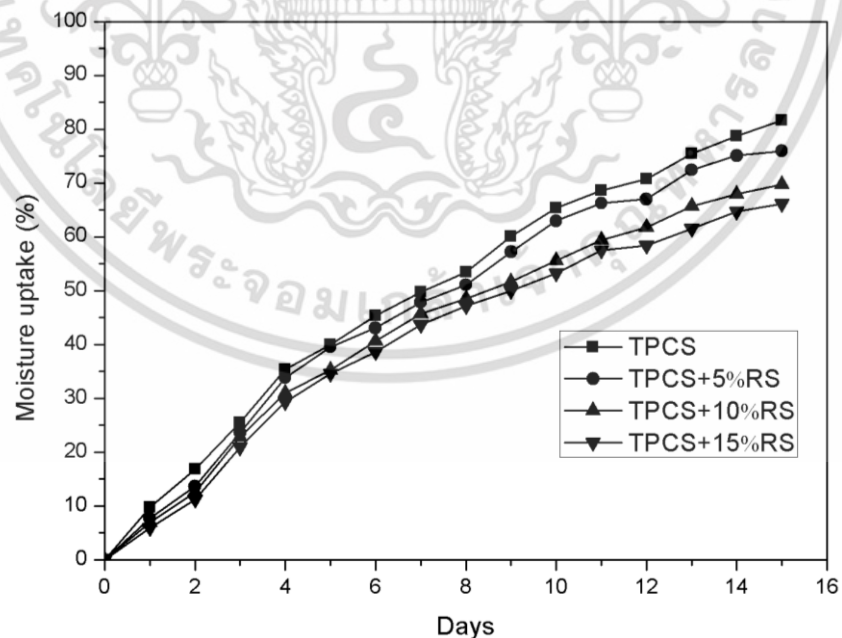
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตรต่างๆ ก่อนทำการทดสอบการดูดซับความชื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

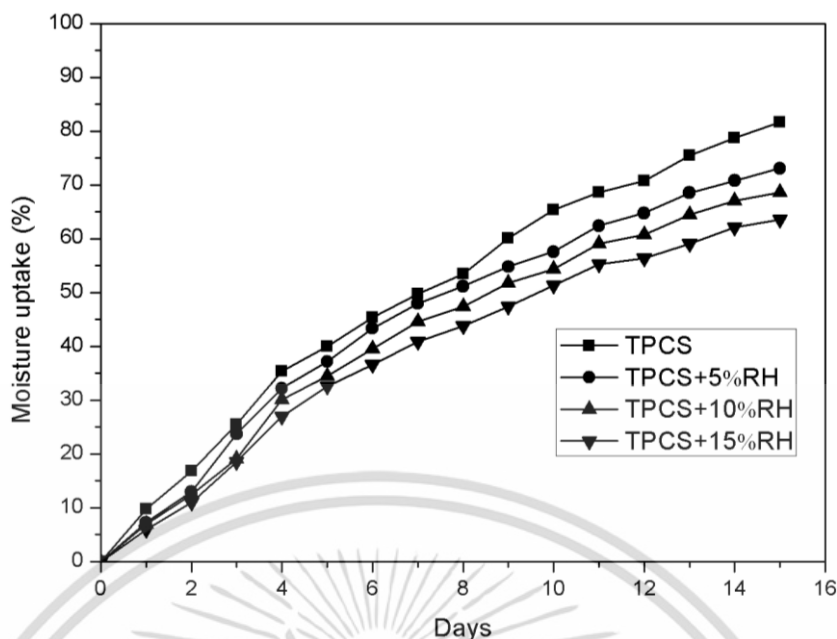


รูปที่ 4.11 ตัวอย่างชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์สูตรต่างๆ หลังทำการทดสอบการดูดซึบความชื้นเป็นเวลา 15 วัน



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการดูดซึบความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแคลบในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.12-4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแคลบ ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายในระยะเวลา 15 วัน พบว่าในช่วงแรกชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากนั้นการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์ ของ TPCS, TPCS+5%RS, TPCS+10%RS, TPCS+15%RS, TPCS+5%RH, TPCS+10%RH และ TPCS+15%RH ในวันที่ 15 มีค่าเท่ากับ 81.67±1.79 เปอร์เซ็นต์, 75.96±1.07 เปอร์เซ็นต์, 69.77±2.12 เปอร์เซ็นต์, 66.16±1.77 เปอร์เซ็นต์, 73.08±3.25 เปอร์เซ็นต์, 68.65±2.02 เปอร์เซ็นต์ และ 63.51±1.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีแนวโน้มการดูดซับความชื้นมากขึ้น เนื่องจากในโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแคลบ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของฟางข้าว และแคลบ ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดน้อยลง เนื่องจากฟางข้าว และแคลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง ซึ่งระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรง มีความเป็นผลึกสูง นอกจากนี้เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ในฟางข้าว และแคลบยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ ส่งผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jutarat Prachayawarakorn and Worawan Pattanasin [72] อีกทั้ง ฟางข้าว และแคลบ ยังมีลักษณะที่มีองค์ประกอบภายในเป็นวงอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน [77] ซึ่งแสดงว่าไม่มีขั้วมากกว่าแป้ง นอกจากนี้ฟางข้าว และแคลบยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแคลบมีการดูดซับความชื้นน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของฟางข้าว และแกลบ เห็นได้ว่าแกลบมีปริมาณลิกนินมากกว่าฟางข้าว แต่มีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่า ทำให้แกลบดูดซับความชื้นน้อยกว่าฟางข้าวเมื่อเปรียบเทียบที่น้ำหนักเท่ากัน เนื่องจากปริมาณลิกนินที่มากกว่าส่งผลให้ความชื้นขั้วลดลง และปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่น้อยกว่า ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระน้อยกว่าฟางข้าว จึงส่งผลให้มีความชอบน้ำลดลง และดูดความชื้นได้น้อยลง

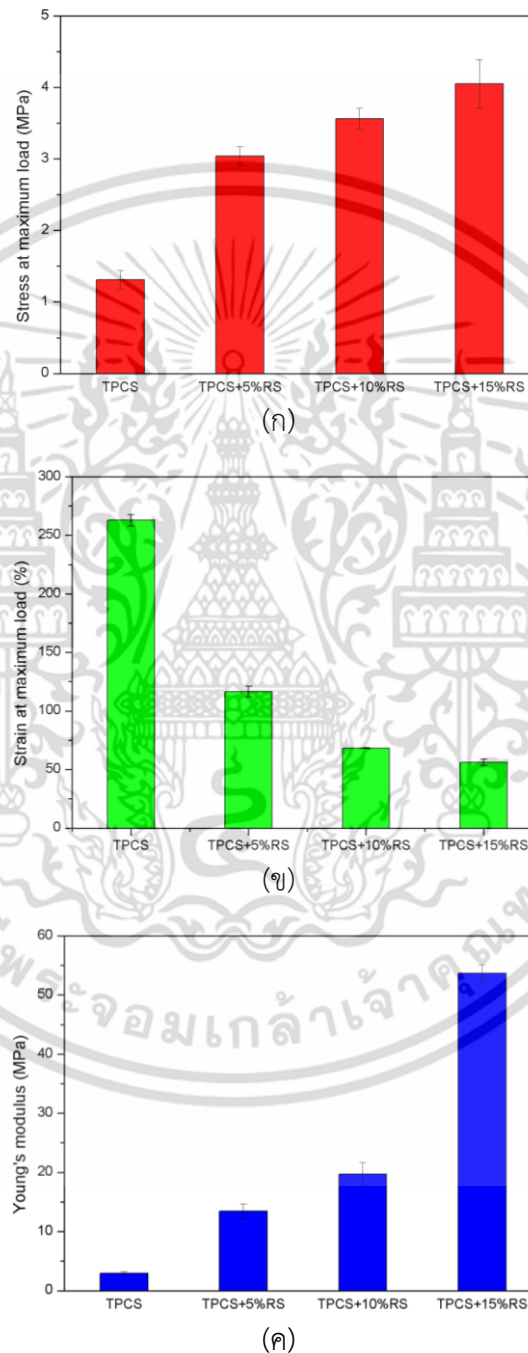
เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ (TPCS+15%RH) มีค่าการดูดความชื้นน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของแกลบมากขึ้น แกลบสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งได้มากขึ้น ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระลดลงอย่างมาก จึงส่งผลให้แป้งดูดซับความชื้นน้อยลง ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสูตร TPCS พบว่า สูตร TPCS+15%RH มีการดูดซับความชื้นน้อยกว่า สูตร 0 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

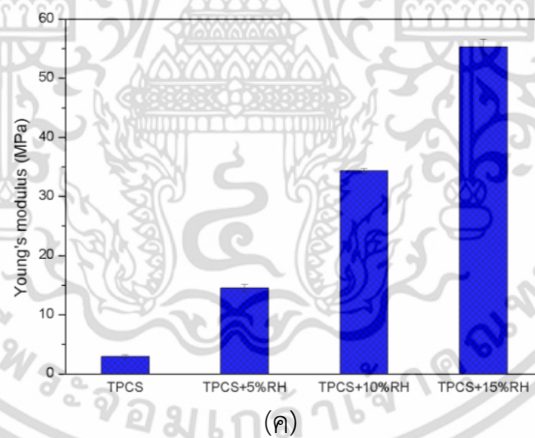
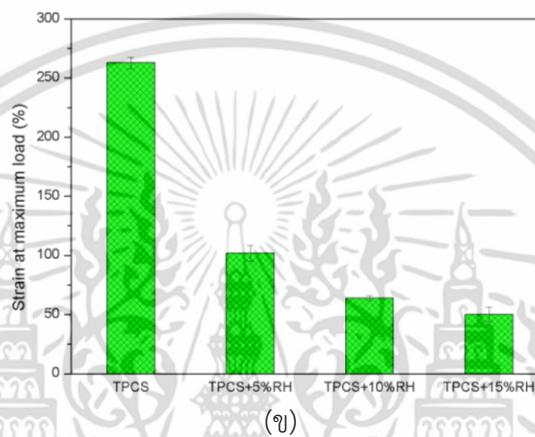
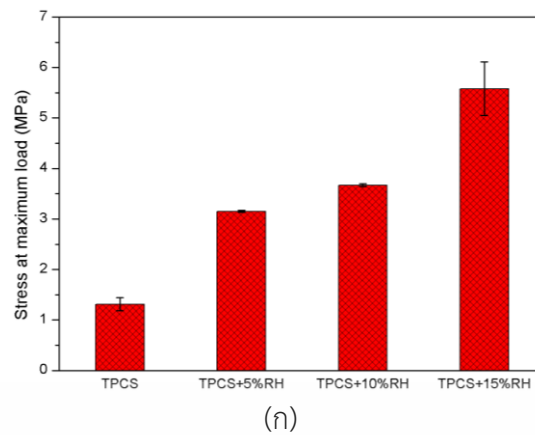
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14-4.15 และภาคผนวก จ



รูปที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

(ข) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเกล็ดใบอ้อตราส่วนต่างๆ (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14-4.15 (ก-ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณฟางข้าว และแกลบ ส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟางข้าว และแกลบ เป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลสที่มีหมู่ไฮดรอกซิล สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้าง ส่งผลให้มีความเป็นผลึกสูง อีกทั้งในฟางข้าว และแกลบยังมีซิลิกาที่อยู่รวมกันเป็นผลึก และมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทานต่อแรงกระทำสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลของ XRD (ตารางที่ 4.4)

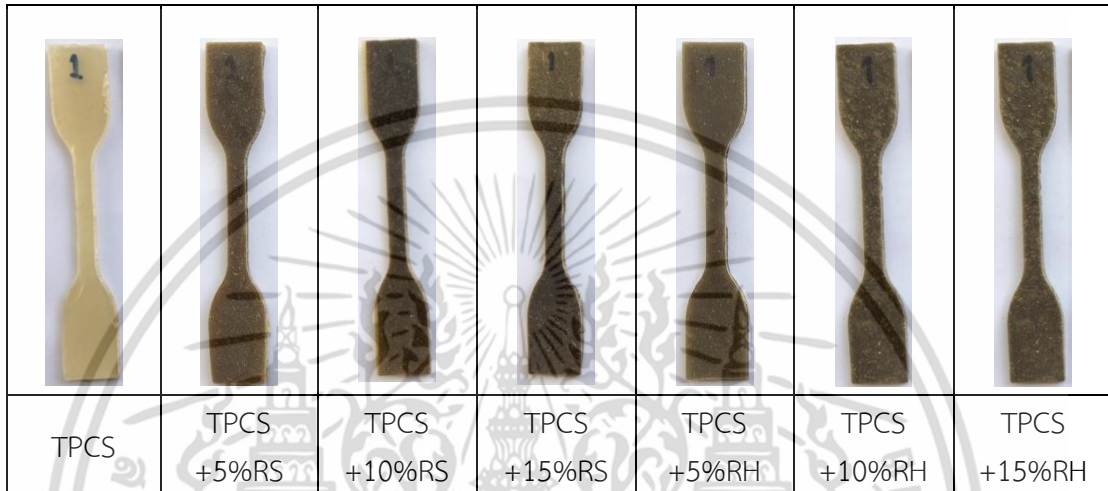
นอกจากนี้ฟางข้าว และแกลบสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของ FT-IR (รูปที่ 4.1-4.2) เลขคลื่นที่ตำแหน่ง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  ของ O-H stretching และเลขคลื่นที่ตำแหน่ง  $1450\text{ cm}^{-1}$  ของ O-H bending เกิดการยับยั้งของ Peak ไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่น้อยลง แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ และบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับฟางข้าว และแกลบ และผลจากสัณฐานวิทยา (SEM รูปที่ 4.9) พบว่า มีการกระจายตัวที่ดีของฟางข้าวและแกลบ ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และยังพบว่ามีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเคลือบอยู่บนอนุภาคของฟางข้าว และแกลบ และไม่พบช่องว่างระหว่างวัสดุภาค ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ มีสมบัติเชิงกลดีกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว เนื่องจากแกลบมีองค์ประกอบของลิกนินมากกว่าฟางข้าว (ตารางที่ 4.2) ซึ่งลิกนินทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมระหว่างเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ทำให้ส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ลิกนินยังมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระทำสูง และในแกลบยังมีองค์ประกอบของซิลิกามากกว่าในฟางข้าว ซึ่งซิลิกาเป็นสารประกอบอินออร์แกนิกที่มีโครงสร้าง และพันธะภายในโมเลกุลที่มีความแข็งแรงสูงจึงสามารถรับแรงกระทำได้ดี [77]

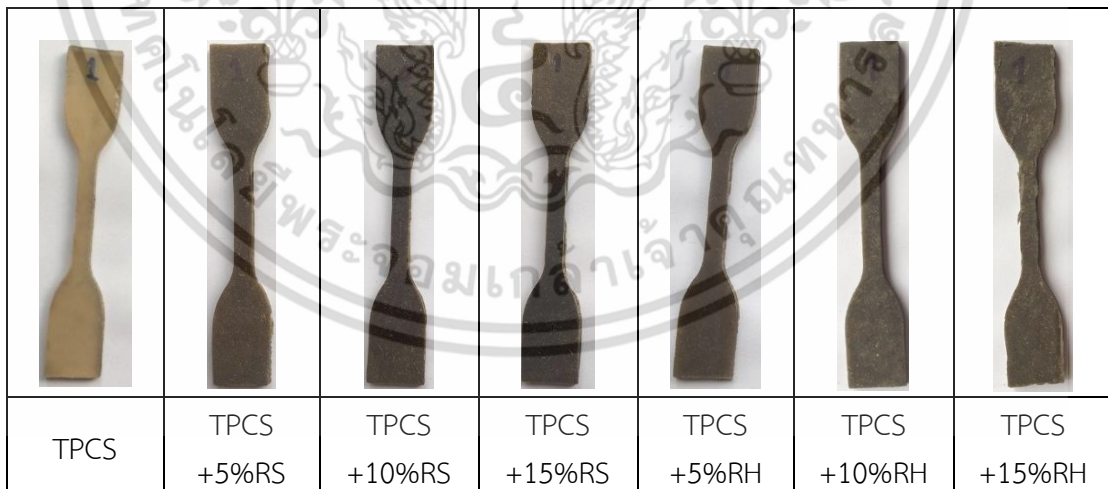
จากผลการทดลองพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด โดยมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด เท่ากับ  $5.58 \pm 0.53\text{ MPa}$  และค่ามอดูลัส เท่ากับ  $55.29 \pm 1.18\text{ MPa}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ

#### 4.6 การย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation properties)

สมบัติการย่อยสลายทำการทดสอบโดยการฝังดิน และสามารถทำได้โดยนำเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ มาฝังดิน และควบคุมความชื้นของดินที่  $14 \pm 2$  เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 วัน โดยลักษณะของตัวอย่างชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ และหลังทำการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 4.16-4.17 และได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.18-4.19

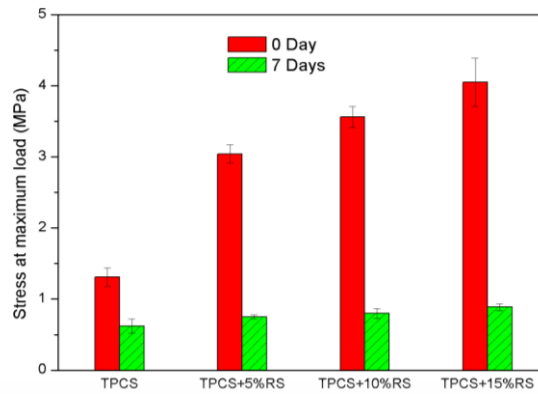


รูปที่ 4.16 ลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนทำการทดสอบ

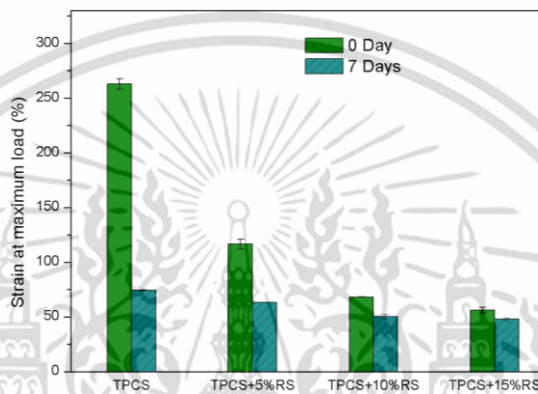


รูปที่ 4.17 ลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ หลังการฝังดินเป็นเวลา 7 วัน

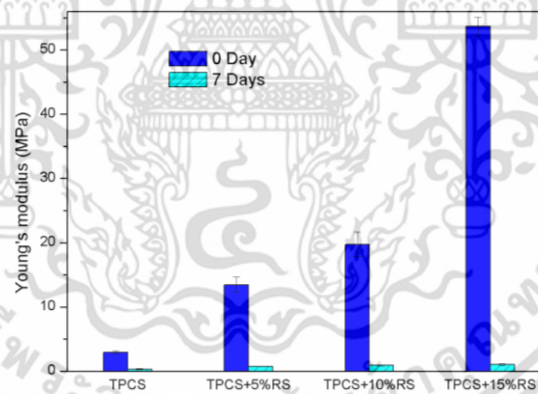
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



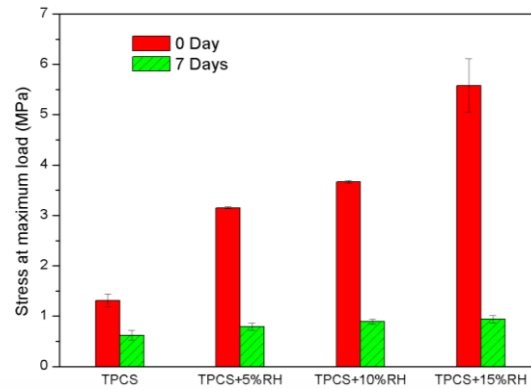
(ข)



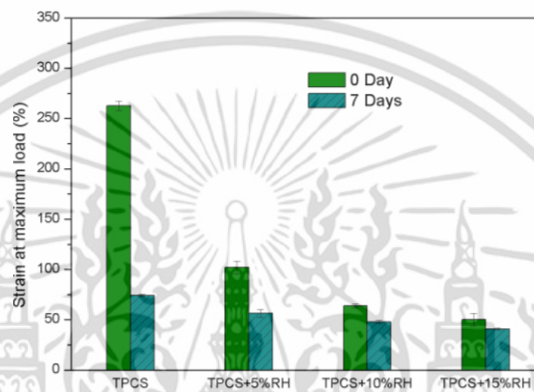
(ค)

รูปที่ 4.18 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส

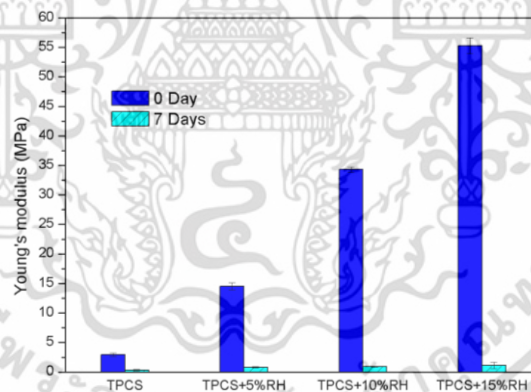
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลก่อน และหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วย  
 แกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด  
 (ข) ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส

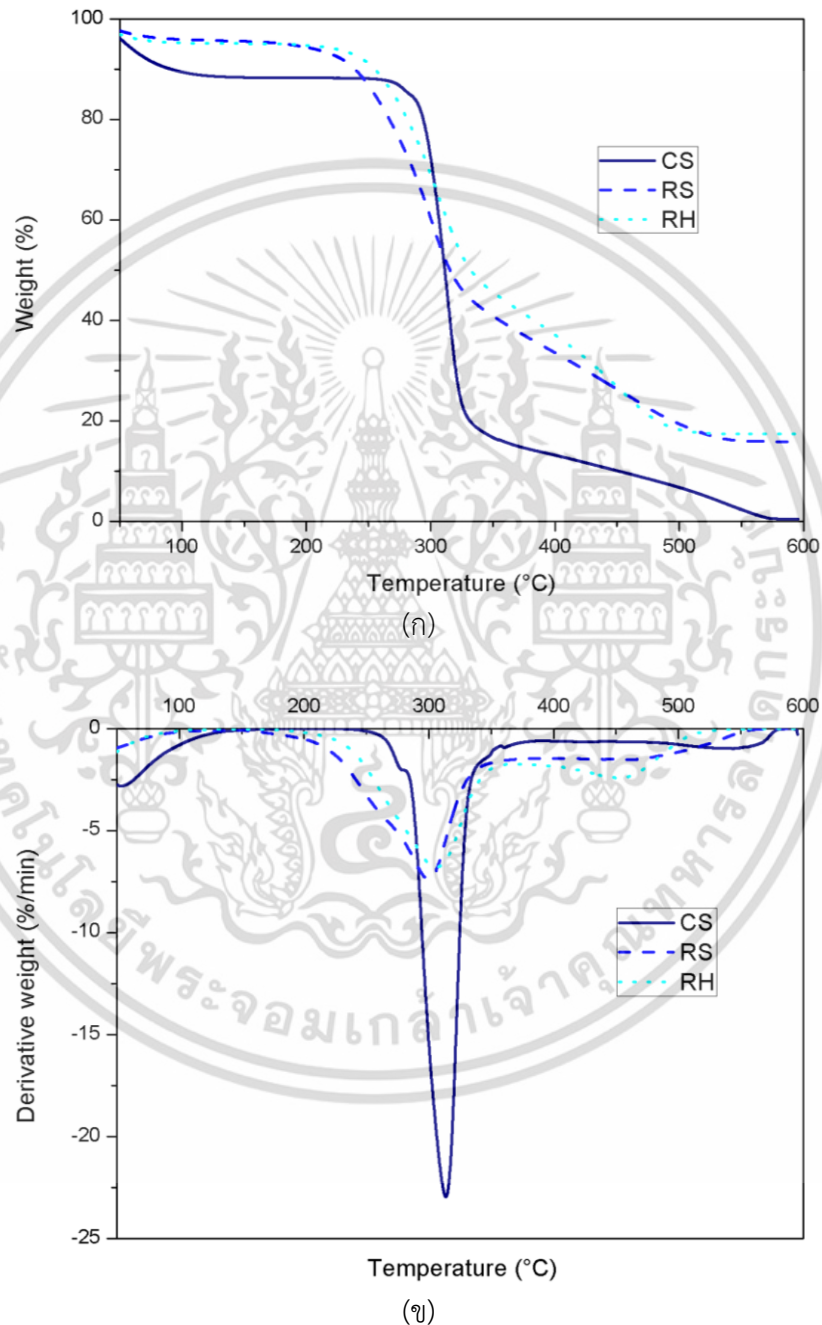
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการนำขึ้นงานไปฝังดิน และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ ในอัตราส่วนต่างๆ หลังฝังดินมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดินอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.18-4.19) เนื่องจากในดินมีความชื้น เทอร์โมพลาสติกสตาบิลสามารถดูดความชื้นจากดิน เพราะเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีส่วนประกอบของแป้งซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) มีความมีขั้ว ทำให้ชิ้นงานมีความชอบน้ำ และน้ำสามารถแทรกซึมเข้าระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีขนาดที่สั้นลง รวมทั้งการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ในดิน ที่สามารถย่อยสลายองค์ประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในแป้ง ฟางข้าว และแกลบได้ [67] จากผลดังกล่าวทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีลักษณะบวมพอง อ่อนตัว และง่ายต่อการฉีกขาดเมื่อเทียบกับก่อนฝังดิน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีค่าลดลงอย่างชัดเจน

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติกับสูตรที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ พบว่ามีแนวโน้มการย่อยสลายใกล้เคียงกัน เนื่องจากการย่อยสลายโดยการฝังดินควบคุมสภาวะในการทดสอบได้ยาก เช่น ปริมาณ และชนิดของจุลินทรีย์ หรือปริมาณความชื้นในชิ้นงานจึงส่งผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรที่ไม่แน่นอน ทำให้สมบัติเชิงกลในแต่ละตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ มีแนวโน้มลดลง ได้แก่ ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ความเครียด ณ จุดรับแรงดึง สูงสุด และมอดุลัส

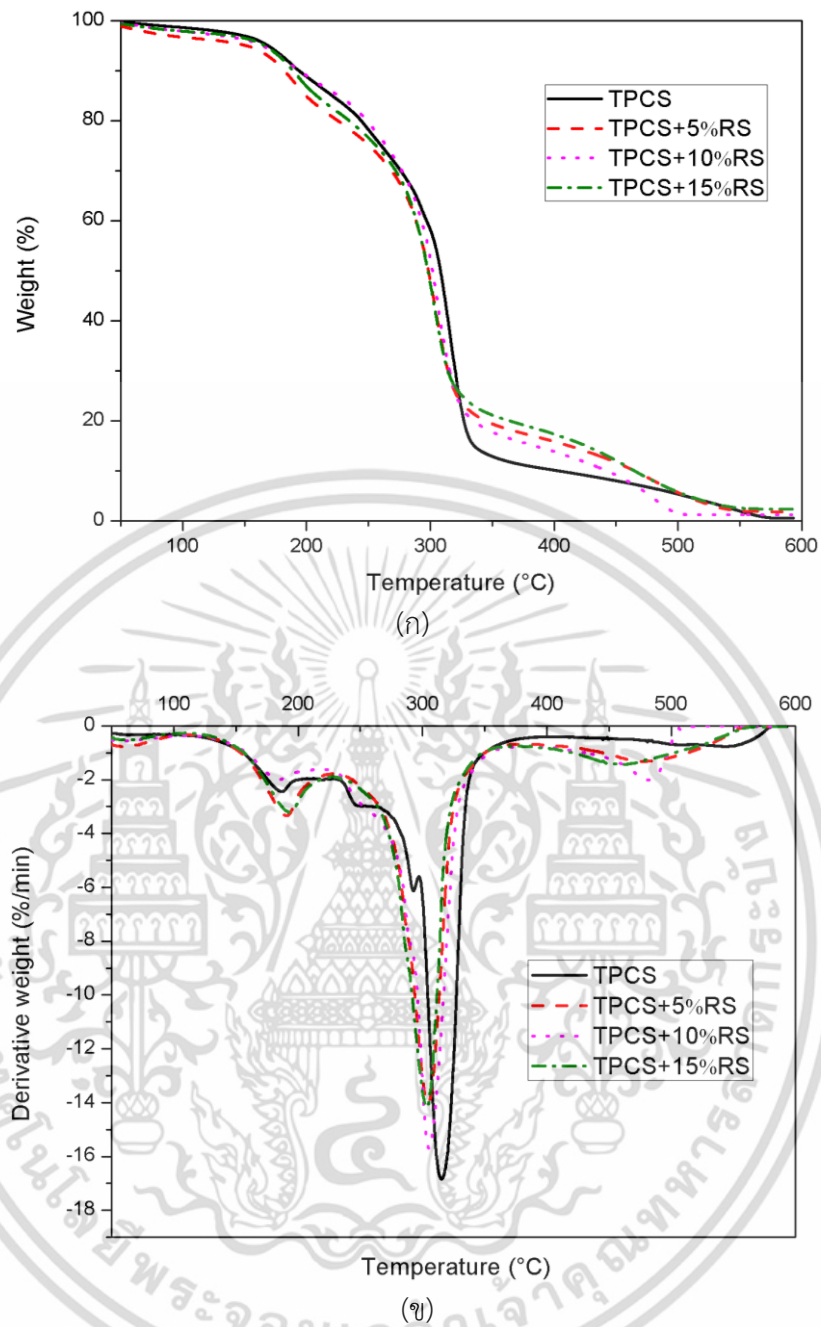
#### 4.7 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วนต่างๆ สมบัติทางความร้อน ที่ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



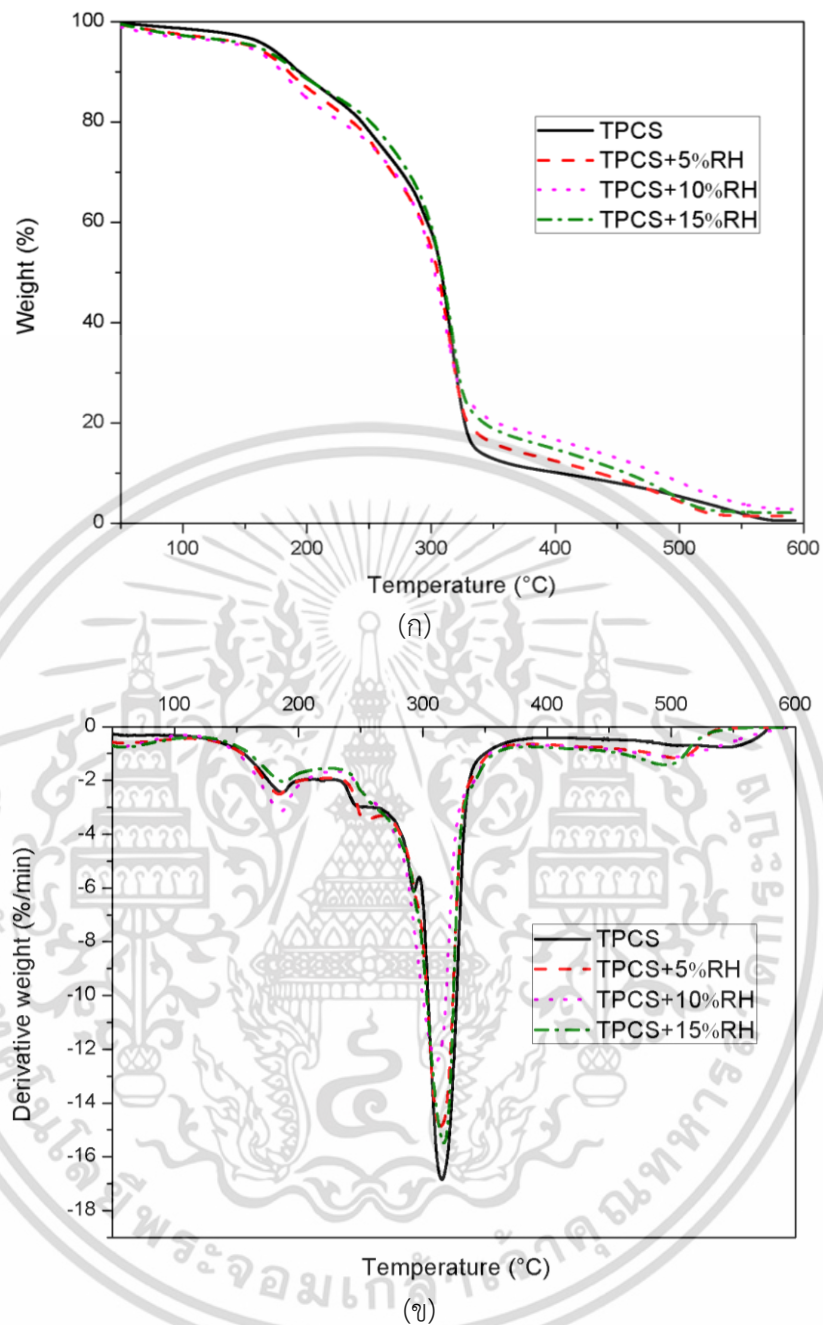
รูปที่ 4.20 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง ฟางข้าว และแกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแคลบในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของแป้งมันสำปะหลัง ฟางข้าว และแกลบ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3 (ลิกนิน และ เถ้า)
		แป้ง	เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส	
CS	52.89	314.16	-	-
RS	45.59	-	299.41	470.30
RH	40.02	-	305.54	453.05

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

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (Bounded water)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	ช่วงที่ 4 (ฟางข้าว หรือ แกลบ)
TPCS	155.77	291.83	315.28	-
TPCS+5%RS	190.23	288.48	304.11	476.62
TPCS+10%RS	183.53	287.37	304.67	480.53
TPCS+15%RS	192.46	286.81	303.56	462.11
TPCS+5%RH	184.63	293.51	314.16	502.86
TPCS+10%RH	185.05	287.11	314.10	503.51
TPCS+15%RH	187.43	294.06	316.95	496.16

จากรูปที่ 4.20 และ ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง ฟางข้าว และแกลบ พบว่า แป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 52.89 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 314.16 ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของน้ำ และแป้ง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาฟางข้าว และแกลบ พบว่า มีอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 45.49 และ 40.02 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของน้ำ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 299.41 และ 305.54 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 470.30 และ 453.05 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของลิกนิน และเถ้าที่มาจากองค์ประกอบที่มีอยู่ในฟางข้าว และแกลบ ตามลำดับ [78]

จากรูปที่ 4.21-4.22 ตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ข พบว่า เทอร์โมพลาสติกสติกส์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 155.77 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของกลีเซอรอล ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 291.83 องศาเซลเซียส คาดว่าเป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของน้ำในรูปที่ไม่อิสระ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Bounded water) ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ 160-500 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำในรูปที่ไม่อิสระ [76] และนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) ที่พบพีคช่วง  $1644\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในแป้ง ซึ่งเป็นไปตามสมบัติการดูดซับความชื้นของแป้ง และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 315.28 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้ง

ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่ทำกรปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าวในอัตราส่วน 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิในการสลายตัว 4 ช่วง โดยอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 190.23 183.53 และ 192.46 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของกลีเซอรอล อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 288.48 287.37 และ 286.81 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bounded water) อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 304.11 304.67 และ 303.56 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้ง และอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 4 ที่อุณหภูมิ 476.62 480.53 และ 462.11 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว

และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแคลบในอัตราส่วน 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิในการสลายตัว 4 ช่วงเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 184.63 185.05 และ 187.43 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 293.51 287.11 และ 294.06 อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 314.16 314.10 และ 316.95 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 4 ที่อุณหภูมิ 502.86 503.51 และ 496.16 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการสลายตัวของกลีเซอรอล น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bounded water) แป้ง และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่ทำกรปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า มีอุณหภูมิในการสลายตัวลดลง เนื่องจากฟางข้าว มีอุณหภูมิในการสลายตัวน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังตารางที่ 4.5 แต่เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์สูตรที่ทำกรปรับปรุงสมบัติด้วยแคลบ พบว่า มีอุณหภูมิในการสลายตัวใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ ผลนี้คาดว่าอาจเกิดจากปริมาณซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของแคลบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอัตรกิริยา (พันธะไฮโดรเจน) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกากับแป้ง [79] ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR รูปที่ 4.2) ส่งผลทำให้มีอุณหภูมิในการสลายตัวมากกว่า เนื่องจากซิลิกามีอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่าแป้ง และฟางข้าว [80]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณฟางข้าว และแกลบที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด แล้วขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องกดอัด ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สเปกตรัมที่ได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ พบพีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1739\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่อะเซทิล ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว และแกลบ นอกจากนี้พบว่าทุกตัวอย่าง พีคที่ตำแหน่งของ O-H Stretching และ O-H Bending มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง

5.1.2 จากการศึกษาการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก และปริมาณความเป็นผลึก พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงที่สุด

5.1.3 จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟางข้าว และแกลบ มีลักษณะเป็นอนุภาคกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และไม่พบรอยต่อระหว่างวัฏภาคขององค์ประกอบทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบในปริมาณมากขึ้น มีปริมาณของอนุภาคฟางข้าว และแกลบกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมากขึ้นด้วย

5.1.4 จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่น้อยที่สุด

5.1.5 จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) มีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RS) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงมีสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ มีแนวโน้มการย่อยสลายที่ดี โดยสามารถพิจารณาได้จากสมบัติเชิงกลที่ลดลงอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ฟางข้าวมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนไม่ เปลี่ยนแปลงเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ทำการ ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ

5.1.8 สูตรที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (TPCS+15%RH) โดยสามารถพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูง ที่สุด สมบัติเชิงกลที่สูงที่สุด และสมบัติการดูดซับความชื้นที่น้อยที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อศึกษาวิธีการ ขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ

5.2.2 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยอนุภาคอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ

5.2.3 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุดูดซับความชื้นให้น้อยลง โดยการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ ด้วยสารอื่น เช่น ไฮเลนหรือกรดสเตียริก เป็นต้น

5.2.4 ศึกษา และปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้มีความทนทานต่อการเกิดเชื้อรามากขึ้น โดยการเติมสารป้องกันเชื้อรา

5.2.5 ในการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคฟางข้าว และแกลบ ควรใช้กำลังขยายที่สูงกว่า 1000 เท่า เพื่อให้เห็นอนุภาคนาขนาดอื่นๆ อย่างชัดเจน ทำให้มีความแม่นยำในการคำนวณหาค่า Aspect ratio มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพศาล นาคพิพัฒน์. “พลาสติกกับชีวิตในปัจจุบัน.” สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. เล่มที่ 28 : 231-263.
- [2] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] สมาคมแป้งมันสำปะหลัง. 2559. แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร. [Online]. Available : [http://www.thaitapiocastarch.org/article26\\_th.asp](http://www.thaitapiocastarch.org/article26_th.asp).
- [4] ศูนย์วิจัยมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2016. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. [Online] Available : [http://web.sut.ac.th/cassava/?name=10cas\\_technology&file=readknowledge&id=13](http://web.sut.ac.th/cassava/?name=10cas_technology&file=readknowledge&id=13).
- [5] วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์ และนุชรา ลินบัวทอง. 2556. “การปรับสภาพฟางข้าวทางเคมีเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลังงานทดแทน” หน้า 129-135. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51 ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มก. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [6] กลุ่มระบบงานวิจัย กองแผนงาน กองแผนงาน ร่วมกับกลุ่มวิจัยและพัฒนาอินทรีย์วัตถุเพื่อการเกษตรสำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน. 2559. การไกล่เกลี่ยเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตข้าว. [Online]. Available : [http://www.ldd.go.th/menu\\_moc/POSTER/rice/rice.htm](http://www.ldd.go.th/menu_moc/POSTER/rice/rice.htm).
- [7] Prachayawarakorn, J. and Yaembunying, N. 2005. “ Effect of recycling on properties of rice husk-filled-polypropylene.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 27(2) : 343-352.
- [8] Ngah, W.S., and Hanafiah, M. A. K. M. 2008. “ Removal of heavy metal from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents. ” *Bioresource Technology*. 99(10) : 3935-3948.
- [9] Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., and Zakaria, Z. 2015. “ Rice Husk Filled Polymer Composites.” *International Journal of Polymer Science*. 2015 : 32.
- [10] Prachayawarakorn, J., Hommanee, L., Phosee, D and Chairapakasatien, P. 2010. “ Property improvement of thermoplastic mung bean starch using cotton fiber and low-density polyethylene.” *Starch/Stärke*. 62(8) : 435-443.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Prachayawarakorn, J., Chaiwatyothin, S., Mueangta, S. and Hanchana, A. 2013. "Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites." *Materials & Design*. 47 : 309-315.
- [12] Prachayawarakorn, J. and Hwansanoet, W. 2012. "Effect of Silk Protein Fibers on Properties of Thermoplastic Rice Starch." *Fibers and Polymers*. 13(5) : 606-612.
- [13] Vallejos, E. V., Curvelo, A. A. S., Teixeira, E. M., Mendes, F. M., Carvalho, A. J. F., Felissia, F. E. and Area, M. C. 2011. "Composite materials of thermoplastic starch and fibers from the ethanol-water fractionation of bagasse." *Industrial Crops and Products*. 33 : 739-746.
- [14] Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2012. "Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa." *Materials and Design*. 40 : 314-318.
- [15] ทฤทภัค กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรรี. 2552. "ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ" *วิศวกรรมสาร มก.* 22(70) : 18-32.
- [16] อธิพิพล แจ่มชัด. 2554. "พอลิเมอร์คอมโพสิต." กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [17] Oates, C. G. 1997. "Toward an Understanding of Starch Granule Structure and Hydrolysis." *Trends in Food Science and Technology*. 8(11) : 375-382.
- [18] French, D. 1984. Organization of Starch Granules. In Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E.F., (eds.) **Starch : Chemistry and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Florida: Academic Press Inc. 184-242.
- [19] Kerr, R. W. 1950. "Chemistry and Industry of Starch." *Polymer Chemistry*. 6(2) : 791.
- [20] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2559. **Starch granule / เม็ดสตาร์ช**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/uploaded/starch%20granule%202.JPG>.
- [21] Beynum, G. M. A., Van J. A. 1985. "Starch conversion technology." *Polymer International*. 19(4) : 417.
- [22] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2559. **Amylose / อะไมโลส**. [Online]. Available : <http://www.scientificpsychic.com/fitness/starch.gif>.

- [23] Kasemsuwan, T., Jane, J., Chen, Y. Y., Lee, L.F., McPherson, A. E., Wong, K. S. and Radosavljevic, M. 1999. “Effects of Amylopectin Branch Chain Length and Amylose Content on the Gelatinization and Pasting Properties of Starch.” *Cereal Chemistry*. 76(5) : 629-637.
- [24] Galliard, T. and Bowler, P. 1987. “Starch: Properties and Potential.” *Starch*. 39(10) : 374.
- [25] Pomeranz, Y., 1985. **Functional properties of food components**. New York : Academic Press. Inc.
- [26] Bradbury, A. G. W. and Bello, A. B. 1993. “Determination of molecular size distribution of starch and debranched starch by a single procedure using high-performance-size-exclusion chromatography” *Cereal Chemistry*. 70(5) : 543-547.
- [27] Tortland, P. 2013. **Good Carbs..Bad Carbs...It’s Anything But Simple**. [Online]. Available : <https://naturalnutmeg.com/wp-content/uploads/2013/12/Amylopectin-1024x508.jpg>.
- [28] Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V., and Ball, S. 1998. “Starch granules: structure and biosynthesis.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 23(2) : 85-112.
- [29] Morrison, W. R. and Laignelet, B. 1983. “An Improved Colorimetric Procedure for Determining Apparent and Total Amylose in Cereal and Other Starches.” *Journal of Cereal Science*. 1 : 9-20.
- [30] Davies, T., Miller, D. C. and Baldwin, P. M. 1997. “Starch granule surface imaging using low-voltage scanning electron microscopy and atomic force microscopy.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 21(2) : 103-107.
- [31] Mishra, S., Monro, J. and Hardacre, A. 2016. **Food Structure and Carbohydrate Digestibility**. [Online]. Available : [http://www.intechopen.com/source/html/41122/media/image1\\_w.jpg](http://www.intechopen.com/source/html/41122/media/image1_w.jpg).
- [32] Tester, R. F., Karkalas, J., Qi, X. 2004. “Starch—composition, fine structure and architecture.” *Journal of Cereal Science*. 39(2) : 151-165.
- [33] Kawabata, A., Takase, N., Miyoshi, E., Sawayama, S., Kimura, T. and Kudo, K. 1994. “Microscopic Observation and X-ray Diffractometry of Heat/Moisture-Treated Starch Granules.” *Starch/Stärke*. 46(12) : 463-469.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] Jane, J., Ao, Z., Duvick, S. A., Wiklund, M., Yoo, S., Wong, K. and Gardner, C. 2003. "Structure of Amylopectin and Starch Granules: How Are They Synthesized?." *Journal of Applied Glycoscience*. 50 : 167-172.
- [35] ดุษฎี อุตภาพ. 2559. **เคมีและสมบัติของแป้ง**. [Online]. Available : [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2\\_intro.files/image023.gif](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2_intro.files/image023.gif).
- [36] Schoch, T. J. and Maywald, F. C. 1956. "Microscopic Examination of Modified Starch." *Anal. Chem.* 28(3) : 382-387.
- [37] มนตรี จุฬาวัฒนทล และประหยัด โกมารทัต. 2542. **ชีวเคมี**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [38] คมขลัท ผุสดี, ญัฐวุฒิ วรรณวิจิตร และนนทียุต น้อยประชา. 2559. "ผลของกรดสเตียริก กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท และแมกนีเซียมสเตียเรทต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลัง." *โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [39] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2559. **องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง**. [Online]. Available : <http://www.tapiocathai.org/D.html>.
- [40] Charles, A. L., Chang, Y. H., Ko, W. C., Sriroth, K. and Huang, T. C. 2005. "Influence of Amylopectin Structure and Amylose Content on the Gelling Properties of Five Cultivars of Cassava Starches." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53(7) : 2717-2725.
- [41] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2559. **อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง**. [Online]. Available : [http://kasetinfo.arda.or.th/arda/cassava/?page\\_id=256](http://kasetinfo.arda.or.th/arda/cassava/?page_id=256).
- [42] Murakami, K., Sato, M., Kato, T. and Sugawara, K. 2012. "Influence of difference in chemical compositions of rice straw on hydrogen formation in nickel-catalyzed steam gasification." *Fuel Processing Technology*. 95 : 78-83.
- [43] กันญา โกสุมภ์. 2556. "การศึกษาและออกแบบไบโอมิดสำหรับย่อยวัสดุเหลือใช้จากข้าว." *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5*.
- [44] Buzarovska, A., Bogoeva, G., Grozdanov, A., Avella, M., Gentile, G. and Errico, M. 2008. "Potential use of rice straw as filler in eco-composite materials." *Australian Journal of Crop Science*. 1(2) : 37-42.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] Chen, X., Yu, J., Zhang, Z. and Lu, C. 2011. “Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw.” *Carbohydrate Polymers*. 85(1) : 245–250.
- [46] Jane, H. 2559. **วิธีการเตรียมดิน**. [Online]. Available : [http://thairice-farm.blogspot.com/2011/03/blog-post\\_26.html](http://thairice-farm.blogspot.com/2011/03/blog-post_26.html).
- [47] สุชาติ สัจวงษ์พนา. 2556. **วิธีการจัดการฟางข้าวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประโยชน์ที่ได้รับ**. กรุงเทพฯ : ส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรม สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- [48] Ismat, Z., Luna, K. C., Dam, A. M., Sarwaruddin, C., Gafur, M. A., Ruhul, A. K. 2015. “Mechanical and Spectroscopic Properties of Rice Husk Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Sodium Hydroxide.” *International Journal of Composite Materials*. 5(6) : 162-166.
- [49] บุญรักษ์ กาญจนวณิชย์. 2559. **สารละลาย : ถ้ำแกลบ ของเหลือสารพัดประโยชน์**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/865->
- [50] Seiichiro, T., Horonori, L., Takeshi, H., and Shinichiro, Y. 2559. **Hierarchical porous carbon from cell assemblies of rice husk for in vivo applications**. [Online]. Available : <http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/ArticleImage/2010/MD/c0md00011f/c0md00011f-f1.gif>.
- [51] จุมพล เหมะศิริรินทร์. 2559. **พลาสติกย่อยสลายได้...นวัตกรรมเพื่อโลก**. [Online]. Available : <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf>.
- [52] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. **พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [53] แพรววี เคหะสุวรรณ, พนาวัลย์ เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และอนุสรณ์ มุลป้อม. 2556. “**พลาสติกชีวภาพ สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านการตลาดของการเกษตรกรในเขตปฎิรูปที่ดิน**.” *เอกสารวิชาการ*. 2556(132) : 40-41.
- [54] สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ. ม.ป.ป. **บทที่ 3 เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [ 55] Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University. 2559. **X-Ray Diffraction Analysis (XRD)**. [Online]. Available : [http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/facilities\\_detail.php?categoryid=17&category\\_subid=29&detailid=256](http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/facilities_detail.php?categoryid=17&category_subid=29&detailid=256).
- [56] สุภานี หิรัญธนกิจจากุล. 2538. ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ ตอนที่10. กระทรวงสาธารณสุข กรุงเทพมหานคร.
- [57] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 23(2) : 141-142.
- [58] ไพศาล นาคพิพัฒน์. “พลาสติกกับชีวิตในปัจจุบัน.” *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว*. เล่มที่28 : 246-247.
- [59] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. 2559. **Magnesium stearate / แมกนีเซียม สเตียเรต**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6894/magnesium-stearate>.
- [60] สงวนชัยเคมี. 2559. **MAGNESIUM STEARATE (octadecanoic acid /magnesium salt) (FACI BRAND): แมกนีเซียม สเตียเรต / แป้งลีน / เกลือแมกนีเซียม**. [Online]. Available : <http://saguanchaichem.com/ProductDetails/Magnesium%20Stearate.html>.
- [61] Curvelo, A. A. S., Carvalho, A. J. F. and Agnelli, J. A. M. 2001. “Thermoplastic starch-cellulosic fibers composite: preliminary results.” *Carbohydrate Polymers*. 45 : 183-188.
- [62] Prachayawarakorn, J., Sangnitivej, P. and Boonpasith, P. 2010. “ Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene.” *Carbohydrate Polymers*. 81(2) : 425–433.
- [63] Prachayawarakorn, J. and Pattanasin, W. 2016. “ Effect of pectin particles and cotton fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 38(2) : 129-136.
- [64] Tanetrungroj, Y. and Prachayawarakorn, J. 2015. “ Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch process by injection molding technique.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 37(2) : 193-199.
- [65] Anupama, A., Mandeep, S. and Gaurav, V. 2010. “Green nanocomposites based on thermoplastic starch and steam exploded cellulose nanofibrils from wheat straw.” *Carbohydrate Polymers*. 82 : 337-345.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [66] Eliangela, M. T., Daniel, P., Antonio, A. S., Elisangela, C., Mohamed, N. B. and Alain, D. 2009. “Cassava bagasse cellulose nanofibrils reinforced thermoplastic cassava starch.” *Carbohydrate Polymers*. 78 : 422-431.
- [67] Munlika, B. and Kaewtatip, K. 2013. “Biodegradation of thermoplastic starch/eggshell powder composites.” *Carbohydrate Polymers*. 97(2) : 315-320.
- [68] Pongsawatmanit, R., Thanasukarn, P. and Ikede, S. 2002. “Effect of Sucrose on RVA Viscosity Parameter, water activity and Freezable Water Fraction of Cassava Starch Suspension.” *ScienceAsia*. 28 : 129-134.
- [69] DeWolfe, A. 2559. **How to Perform an ASTM D638 Plastic Tensile Strength Test.** [ Online] . Available : <http://info.admet.com/Portals/70514/images/ASTM%20D412%20Dumbbell%20Specimen1.jpg>.
- [70] Joao, F.M., Dana, K. and Rui, L.R. 2003. “Thermal properties of thermoplastic starch/ synthetic polymer blends with potential biomedical applicability.” *Journal of materials science: materials in medicine*. 14 : 127-135.
- [71] Lomelí-Ramírez, M. G., Barrios-Guzmán, A. J., García- Enriquez, S., Rivera-Prado, J. J. and Manríquez-González, 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.
- [72] Prachayawarakorn, J. and Pattanasin, W. 2016. “Effect of pectin particles and cotton fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 38(2) : 129-136.
- [73] Ahmed, A. O. and Jong, W. R. 2016. “Isolation of cellulose nanocrystals from grain straws and their use for the preparation of carboxymethyl cellulose-based nanocomposite films.” *Carbohydrate Polymers*. 150 : 187-200.
- [74] Rahmawati, R., Meri, S. and Emil, B. 2015. “Radiation Graft Copolymerization of Acrylic Acid onto Rice Straw Cellulose.” *Macromolecular Symposia*. 353(1) : 231-239.
- [75] Mello, L. R. P.F. and Mali, S. 2014. “Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch.” *Industrial Crops and Products*. 55 : 187-193.

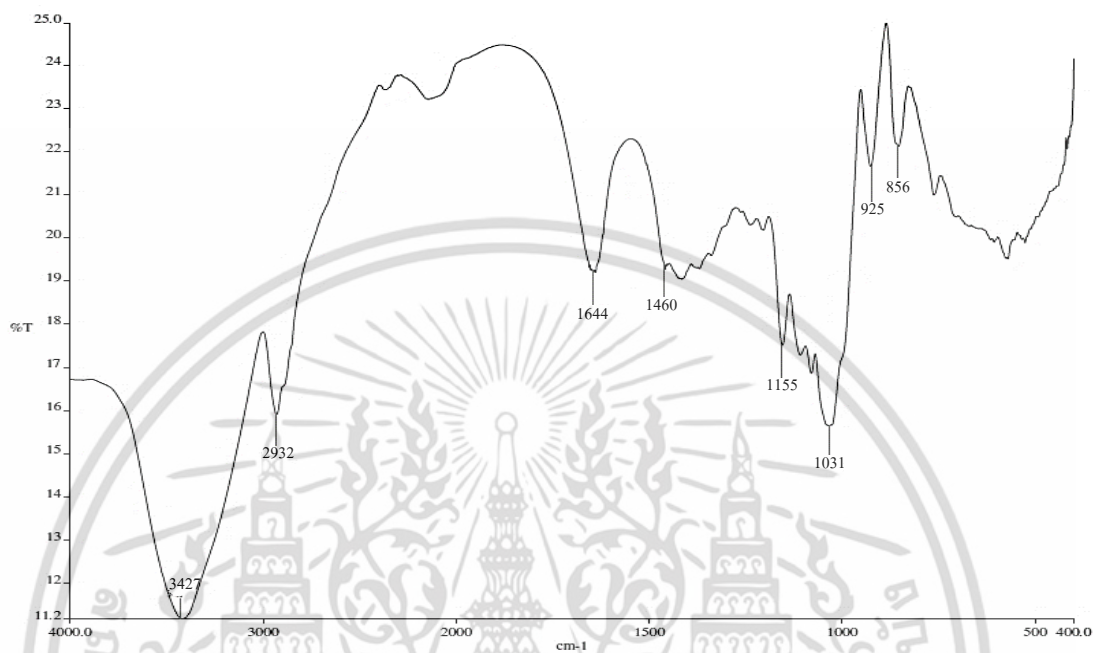
- [76] Mendes, J. F., Paschoalin, R. T., Carmona, V. B., Neto, A. R. S., Marques, A. C. P., Marconcini, J. M., Mattoso, L. H. C., Medeiros, E. S. and Oliveira, J. E. 2016. “ Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion.” *Carbohydrate Polymers*. 137 : 452-458.
- [77] Wei, J. and Meyer, C. 2016. “Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber.” *Cement and Concrete Research*. 81 : 94-111.
- [78] Zakaria, Z., Ishak, M. A. M., Abdullah, M. F. and Ismail, K. 2010. “ Thermal Decomposition Study of Coals, Rice Husk, Rice Husk Char and Their Blends During Pyrolysis and Combustion via Thermogravimetric Analysis. ” *International Journal of Chemical Technology*. 2(3) : 78-87.
- [79] Zakharov., A. I. Belyakov, A. V. and Tsvigunov, A. N. 1993. “Forms of extraction of silicon compounds in rice husks.” *Glass and Ceramics*. 50 : 420-425.
- [80] ScienceLab: Chemicals & Laboratory Equipment. 2560. **Material Safety Data Sheet Silicon Dioxide, Amorphous MSDS.** [ Online] . Available : <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9924924>.



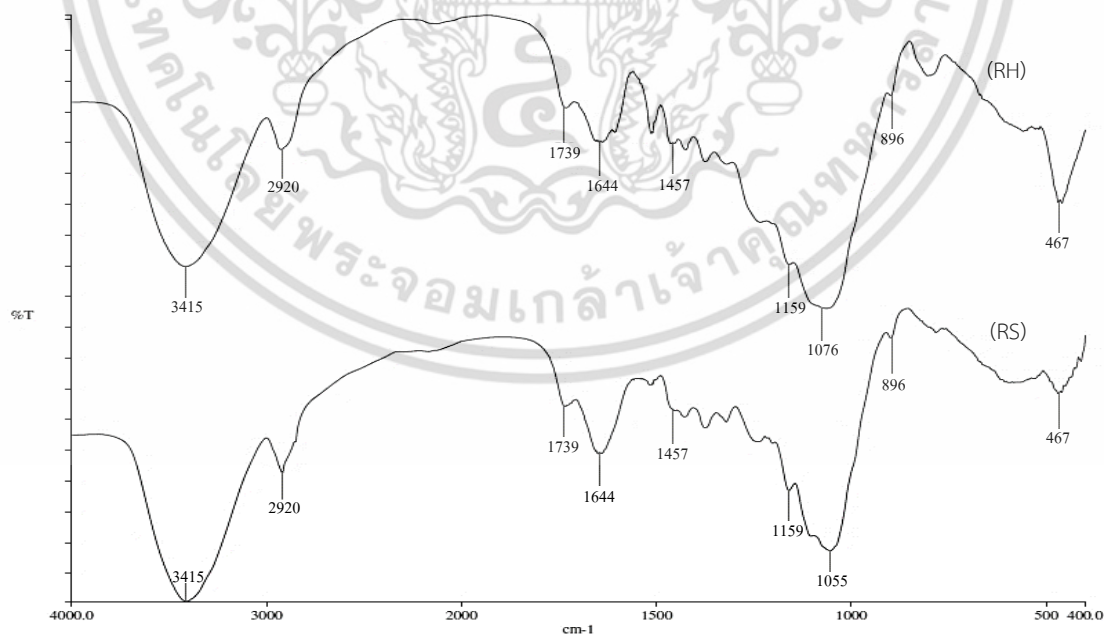
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

(ก) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง



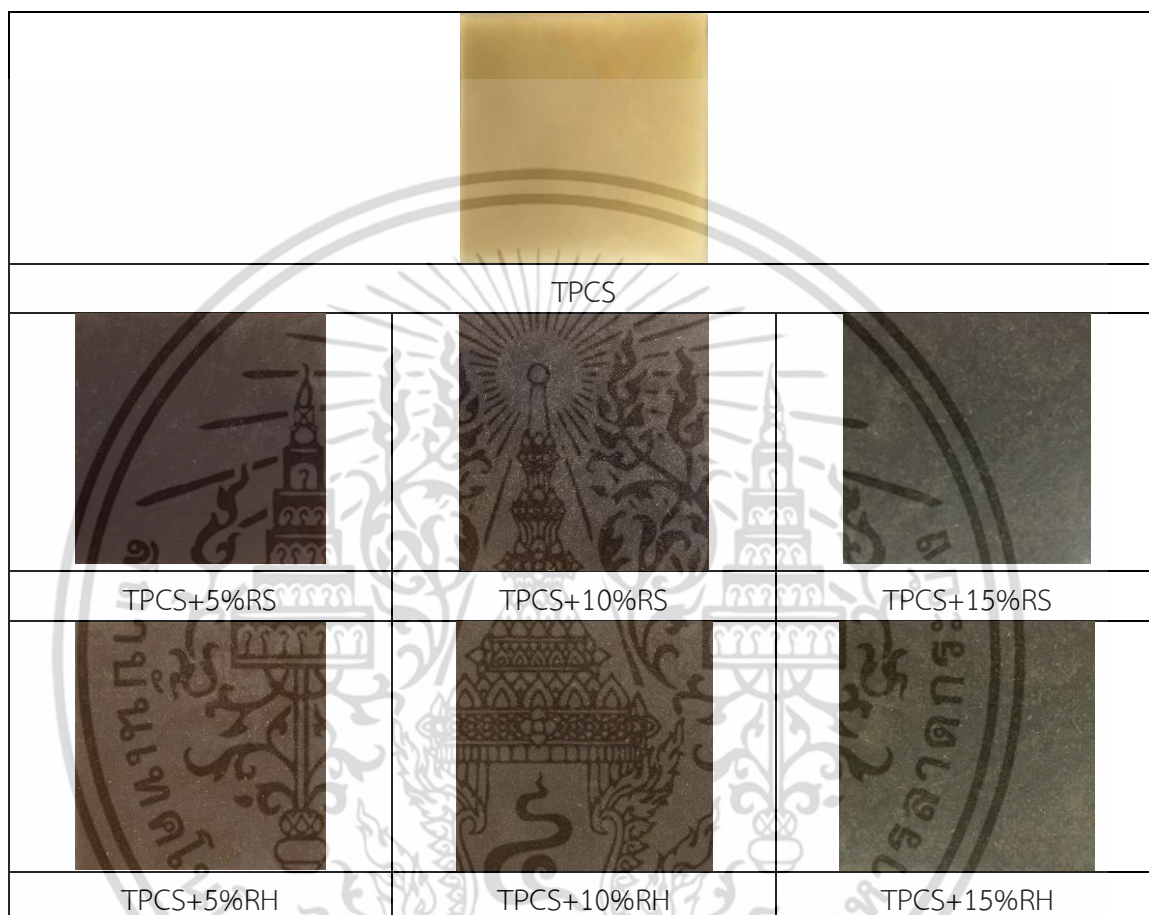
(ข) อินฟราเรดสเปกตรัมของฟางข้าว (RS) และแกลบ (RH)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ลักษณะชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และเกลบในอัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของฟางข้าว (L/D ratio)

	ความยาว (L)	ความกว้าง (D)	L/D ratio
1	215.90	205.50	1.05
2	166.20	79.89	2.08
3	313.00	60.67	5.16
4	475.90	97.51	4.88
5	204.80	75.77	2.70
6	179.10	76.55	2.34
7	106.80	63.82	1.67
8	96.34	64.51	1.49
9	179.20	43.22	4.15
10	150.30	32.63	4.61
11	111.40	46.69	2.39
12	394.90	41.66	9.48
13	183.70	115.50	1.59
14	114.30	31.37	3.64
15	126.20	44.50	2.84
16	145.50	24.47	5.95
17	84.43	41.64	2.03
18	100.40	61.81	1.62
19	100.40	66.05	1.52
20	119.10	42.76	2.79
21	153.50	110.20	1.39
22	1160	64.79	1.79
23	76.55	41.32	1.85
24	77.11	51.48	1.50
25	136.80	95.90	1.43
26	276.90	108.30	2.56
27	154.40	36.07	4.28
28	188.10	84.73	2.22
29	132.50	42.14	3.14
30	73.76	24.25	3.04
	165.12±92.91	65.86±36.90	2.91±1.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของแกลบ (L/D ratio)

	ความยาว (L)	ความกว้าง (D)	L/D ratio
1	362.20	259.50	1.40
2	151.80	75.61	2.01
3	133.60	67.05	1.99
4	226.30	166.80	1.36
5	117.80	115.20	1.02
6	141.60	128.60	1.10
7	156.50	88.49	1.77
8	124.10	83.16	1.49
9	207.30	102.50	2.02
10	176.60	123.90	1.43
11	275.00	153.30	1.79
12	225.10	140.40	1.60
13	188.80	151.70	1.24
14	143.90	115.40	1.25
15	326.60	202.80	1.61
16	171.40	113.00	1.52
17	155.30	73.93	2.10
18	196.90	146.00	1.35
19	130.70	68.06	1.92
20	91.30	76.74	1.19
21	107.20	29.48	3.64
22	137.60	65.62	2.10
23	117.10	33.58	3.49
24	68.06	58.71	1.16
25	101.30	70.08	1.45
26	117.60	33.53	3.51
27	157.40	103.50	1.52
28	93.86	83.52	1.12
29	132.80	123.20	1.08
30	98.77	83.37	1.18
	161.15±67.73	104.56±50.57	1.71±0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์  $93\pm 1\%$  ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ฟางข้าว และแกลบในอัตราส่วนต่างๆ

วันที่	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น						
	TPCS	TPCS+5%RS	TPCS+10%RS	TPCS+15%RS	TPCS+5%RH	TPCS+10%RH	TPCS+15%RH
0	0	0	0	0	0	0	0
1	9.79±0.63	7.74±0.51	6.96±0.47	5.99±0.87	7.26±0.87	6.94±0.90	5.94±0.45
2	16.86±0.28	13.65±0.97	12.60±0.37	11.26±1.32	12.99±0.72	12.40±0.74	10.96±1.21
3	25.48±0.70	23.61±1.78	22.75±1.02	20.91±1.23	23.69±1.42	19.03±1.62	18.47±1.40
4	35.34±0.31	33.84±1.36	30.96±0.98	29.26±1.30	32.18±1.44	30.04±1.07	26.97±1.68
5	40.02±0.28	39.56±1.60	35.30±1.42	34.58±1.73	37.15±1.04	34.53±1.72	32.51±2.44
6	45.34±0.50	43.09±0.93	40.62±0.48	38.60±1.28	43.32±0.89	39.47±0.88	36.55±1.78
7	49.72±1.70	47.82±1.26	45.66±1.30	43.67±1.56	47.95±2.37	44.61±2.87	40.90±2.25
8	53.51±1.40	51.07±1.00	48.50±1.52	47.16±1.77	51.16±2.37	47.34±2.09	43.84±2.09
9	60.08±1.29	57.19±0.80	51.67±1.40	49.99±1.38	54.83±2.13	51.72±1.82	47.38±1.67
10	65.31±0.72	62.95±1.05	55.54±1.37	53.25±0.99	57.56±1.48	54.38±1.33	51.27±1.55
11	68.58±1.09	66.26±1.25	59.43±1.66	57.46±1.66	62.41±2.26	59.06±1.77	55.25±2.18
12	70.76±1.69	67.01±0.94	61.71±2.07	58.41±1.60	64.76±2.95	60.72±1.96	56.43±2.01
13	75.43±0.69	72.45±1.27	65.65±1.52	61.60±1.77	68.56±2.64	64.44±1.47	59.09±1.38
14	78.69±1.78	75.10±1.21	67.90±1.74	64.63±1.83	70.78±3.08	67.01±2.01	62.12±1.77
15	81.67±1.79	75.96±1.07	69.77±2.12	66.16±1.77	73.08±3.25	68.65±2.02	63.51±1.76

## ภาคผนวก จ

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ฟางข้าว และแกลบ

### ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ตัวอย่าง	Stress at maximum load (MPa)
TPCS	1.31±0.13
TPCS+5%RS	3.04±0.13
TPCS+10%RS	3.56±0.15
TPCS+15%RS	4.05±0.34
TPCS+5%RH	3.15±0.02
TPCS+10%RH	3.67±0.03
TPCS+15%RH	5.58±0.53

### มอดุลัส

ตัวอย่าง	Young's modulus (MPa)
TPCS	2.95±0.26
TPCS+5%RS	13.45±1.24
TPCS+10%RS	19.74±1.90
TPCS+15%RS	53.65±1.48
TPCS+5%RH	14.53±0.60
TPCS+10%RH	34.30±0.44
TPCS+15%RH	55.29±1.18

### ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ตัวอย่าง	Strain at maximum load (%)
TPCS	262.77±4.79
TPCS+5%RS	116.57±4.62
TPCS+10%RS	68.21±0.27
TPCS+15%RS	56.14±2.67
TPCS+5%RH	101.89±6.58
TPCS+10%RH	63.77±2.26
TPCS+15%RH	50.22±6.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลหลังทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินเป็นเวลา 7 วัน ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว และแกลบ

### ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ตัวอย่าง	Stress at maximum load (MPa)
TPCS	0.62±0.10
TPCS+5%RS	0.75±0.03
TPCS+10%RS	0.80±0.07
TPCS+15%RS	0.88±0.05
TPCS+5%RH	0.79±0.07
TPCS+10%RH	0.89±0.05
TPCS+15%RH	0.94±0.07

### มอดุลัส

ตัวอย่าง	Young's modulus (MPa)
TPCS	0.32±0.12
TPCS+5%RS	0.75±0.03
TPCS+10%RS	0.89±0.07
TPCS+15%RS	1.02±0.16
TPCS+5%RH	0.81±0.08
TPCS+10%RH	0.92±0.06
TPCS+15%RH	1.10±0.55

### ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

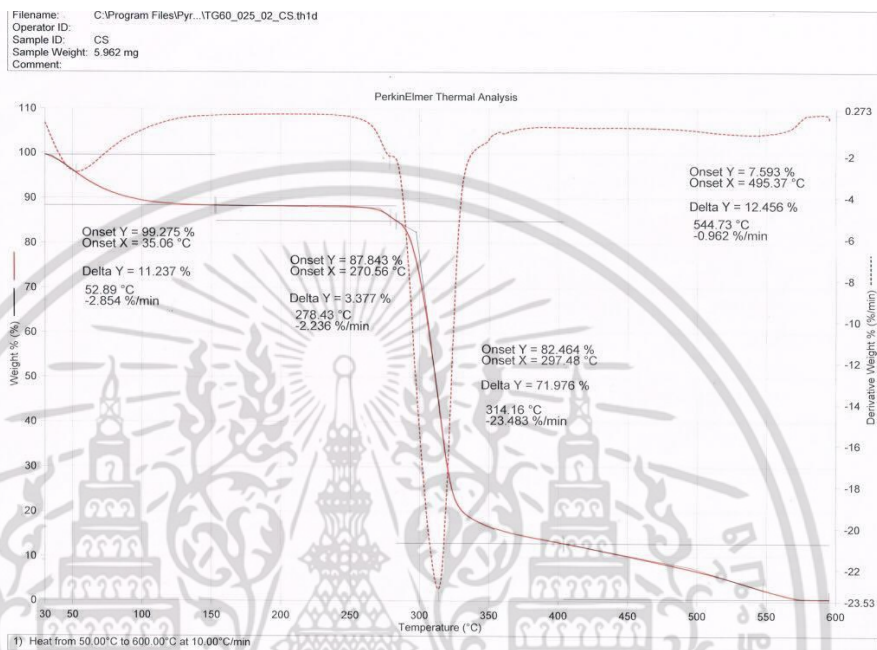
ตัวอย่าง	Strain at maximum load (%)
TPCS	74.21±1.08
TPCS+5%RS	63.14±0.02
TPCS+10%RS	50.16±2.13
TPCS+15%RS	47.88±1.24
TPCS+5%RH	56.37±3.87
TPCS+10%RH	47.71±1.65
TPCS+15%RH	40.89±0.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

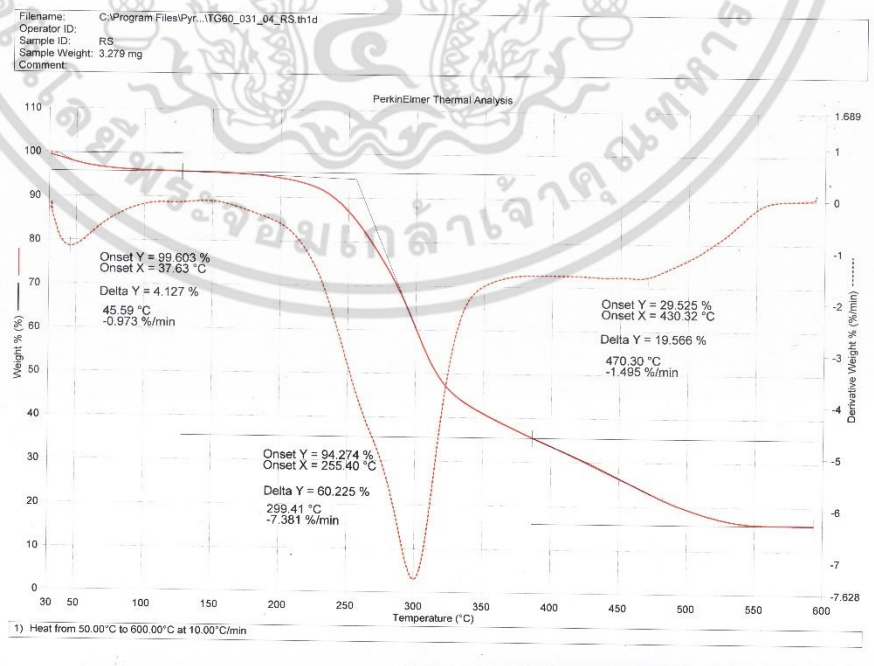
## ภาคผนวก ข

TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ

(ก) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง

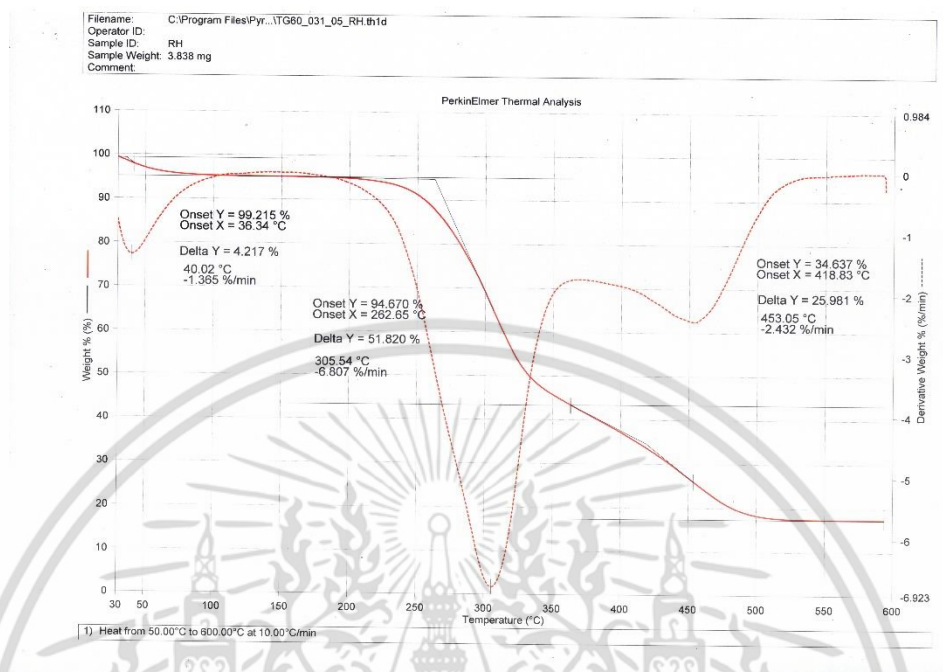


(ข) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟางข้าว

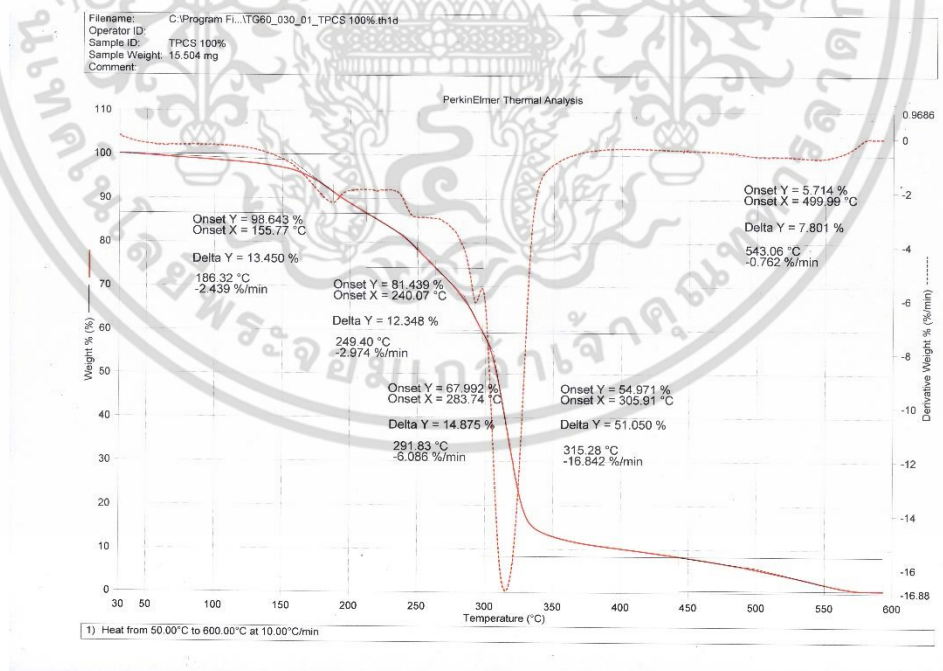


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (ค) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของแกลบ

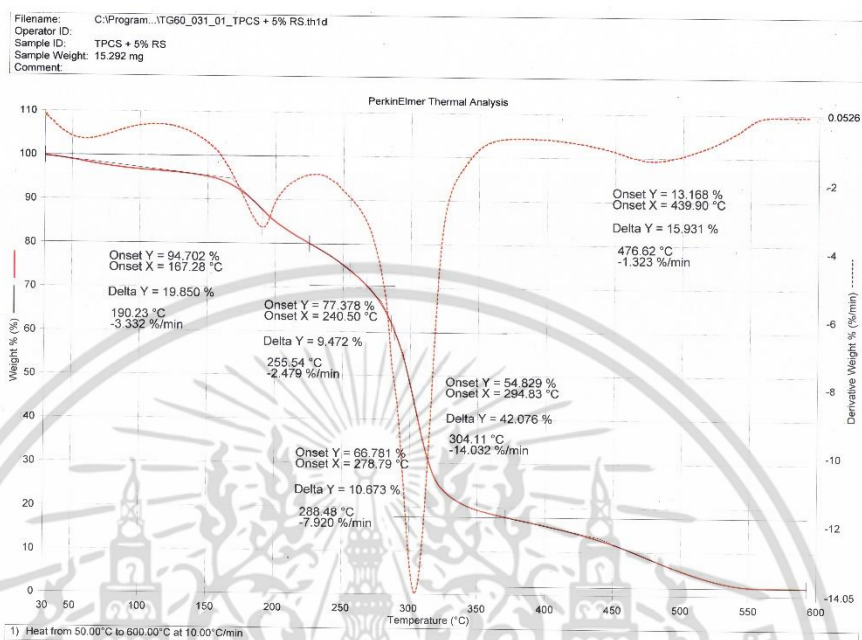


## (ง) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

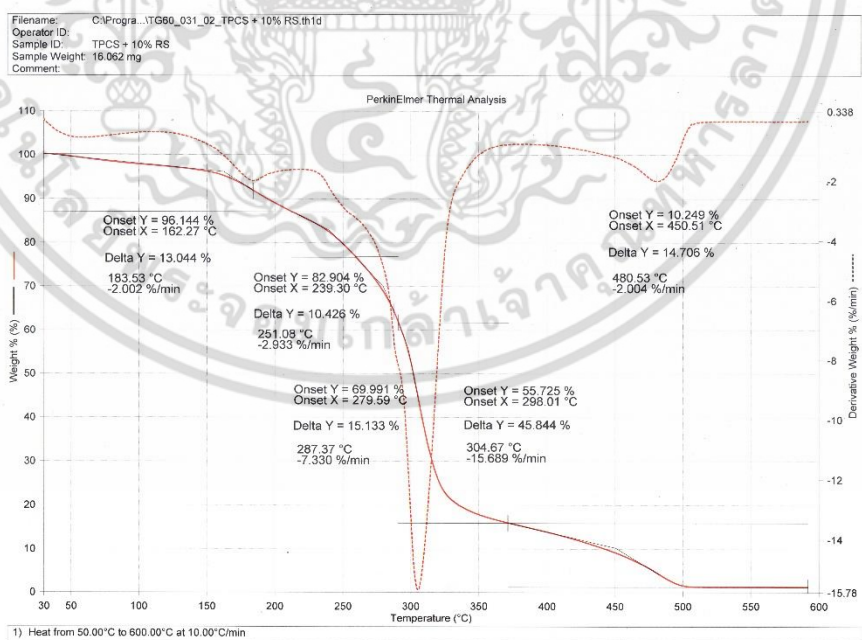


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยฟางข้าว 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

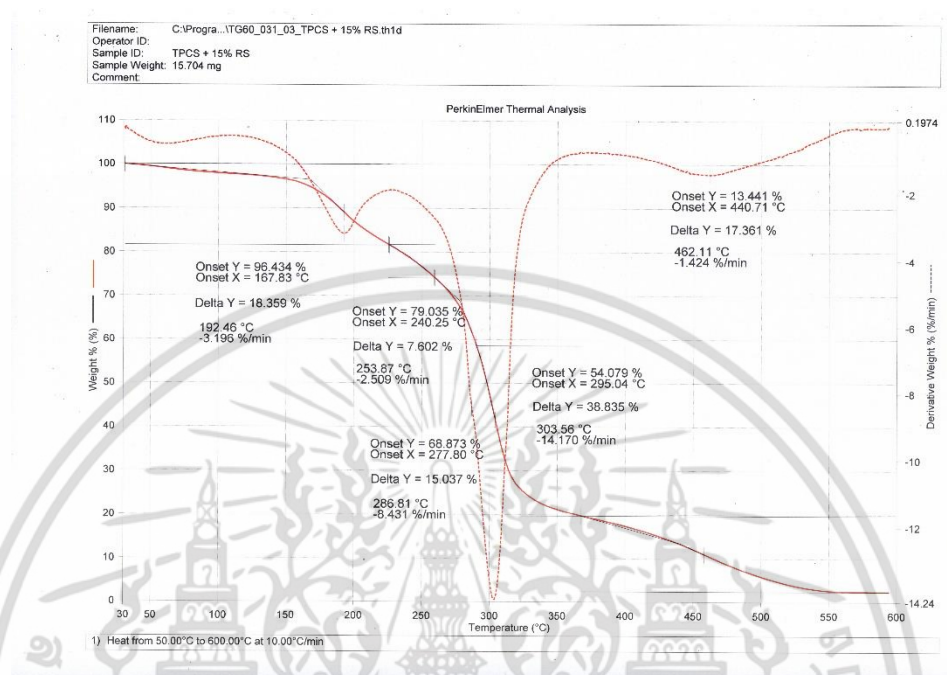


(ข) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยฟางข้าว 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

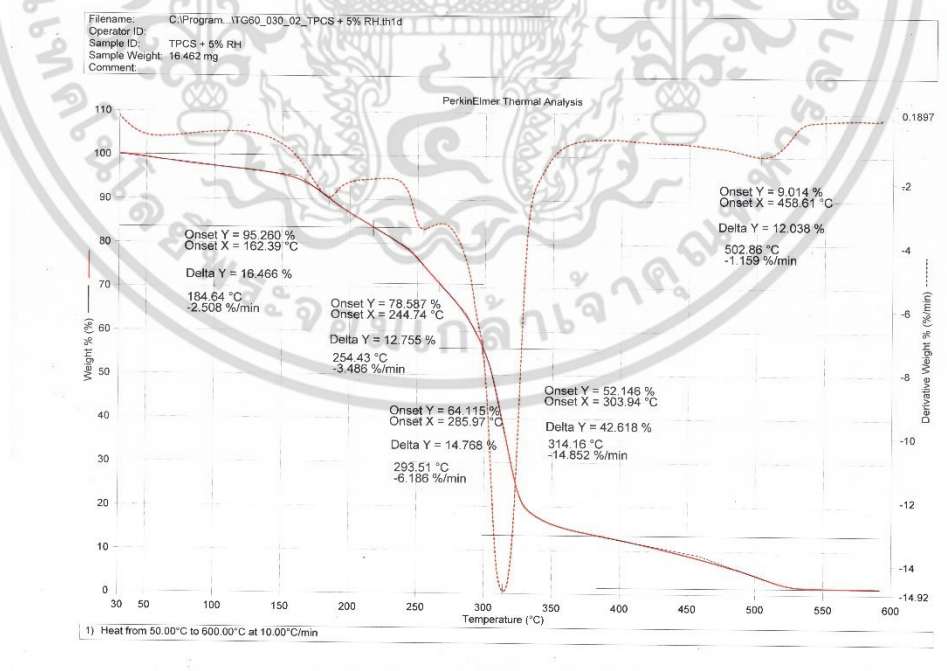


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ช) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยฟางข้าว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

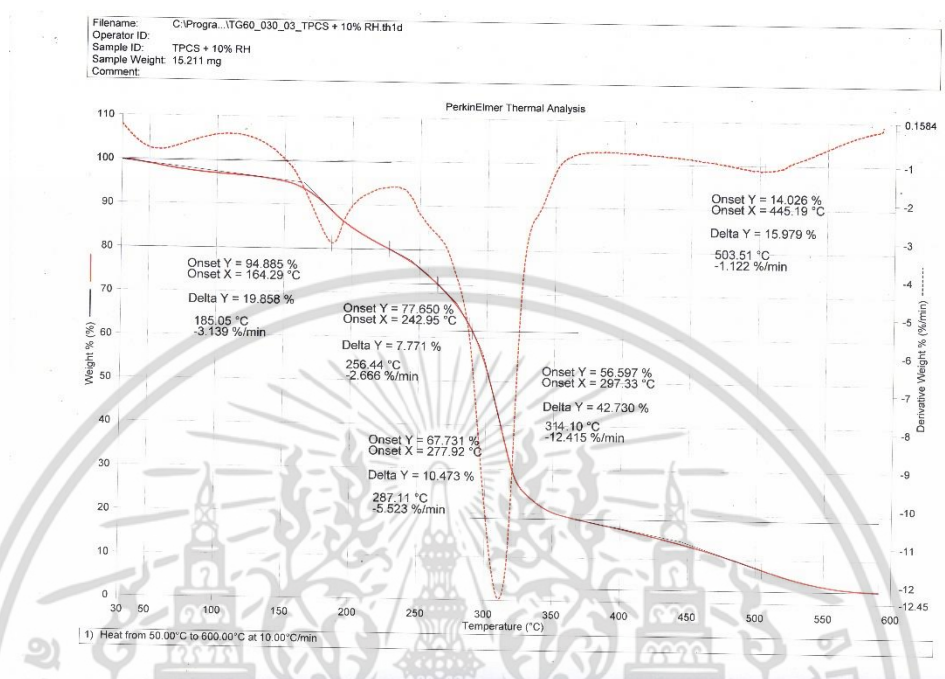


(ช) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

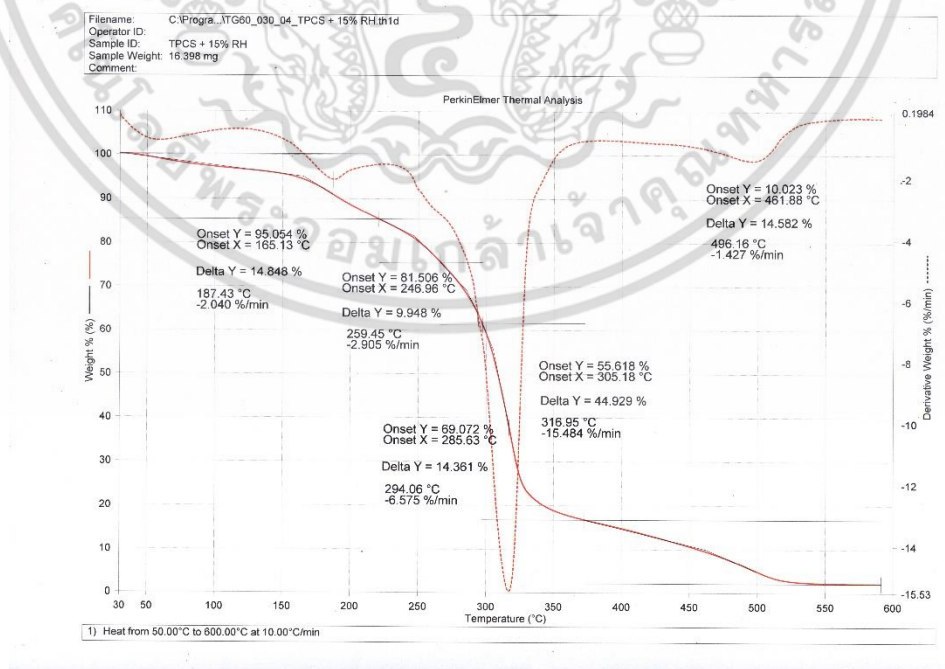


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฉ) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยกลีบ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



(ญ) TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยกลีบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้