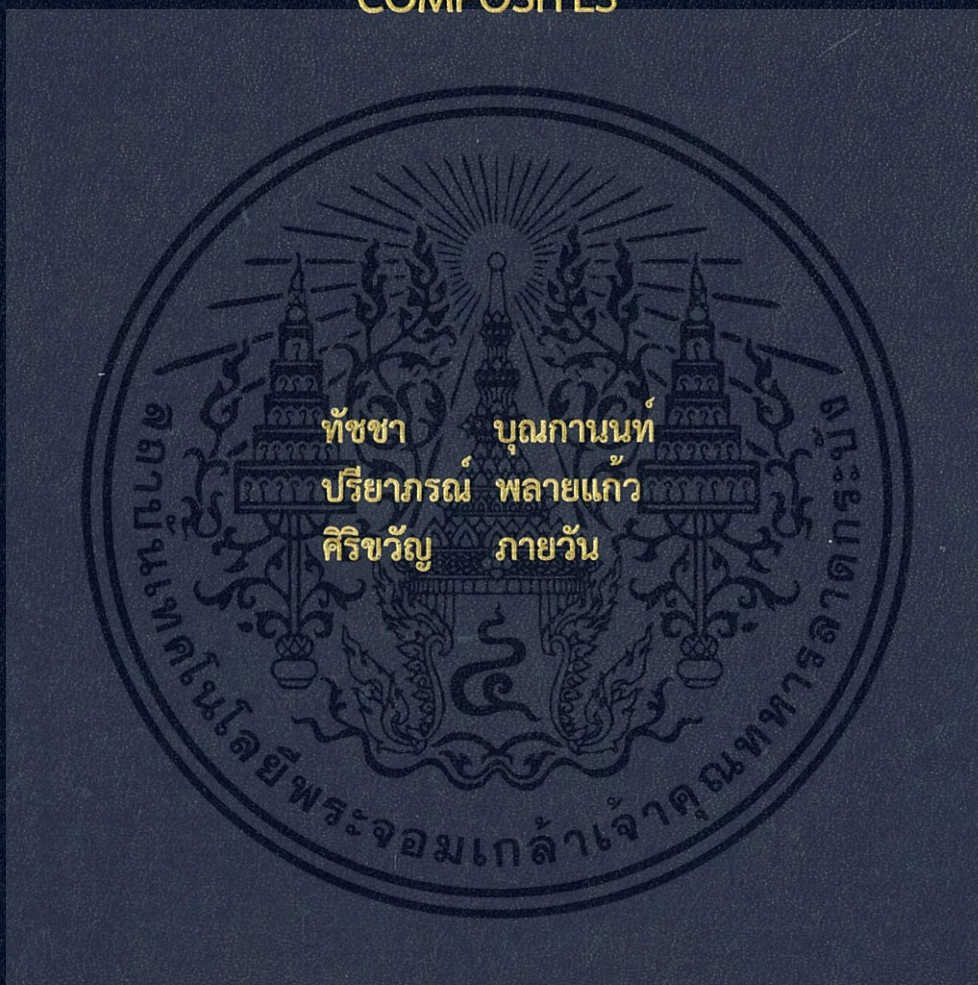


ผลของชนิดขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต  
เทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย

EFFECT OF SAWDUST TYPES ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC CORN STARCH/SAWDUST  
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

ผลของชนิดขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอลิท  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย

EFFECT OF SAWDUST TYPES ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC CORN STARCH/SAWDUST  
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF SAWDUST TYPES ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC CORN STARCH/SAWDUST  
COMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ผลของชนิดขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติก  
สตาร์ชจากแป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย

Effect of sawdust types on properties of thermoplastic  
corn starch/sawdust composites

ชื่อนักศึกษา

นางสาว ทัชชา บุนกานนท์ รหัสนักศึกษา 57050418

นางสาว ปรียาภรณ์ พลอยแก้ว รหัสนักศึกษา 57050454

นางสาว ศิริขวัญ ภายวัน รหัสนักศึกษา 57050518

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

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

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของชนิดขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกคอมพอลิธสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย Effect of sawdust types on properties of thermoplastic corn starch/sawdust composites
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ทัชชา บุนกานนท์ รหัสนักศึกษา 57050418 นางสาว ปรียาภรณ์ พลายแก้ว รหัสนักศึกษา 57050454 นางสาว ศิริขวัญ ภายวัน รหัสนักศึกษา 57050518
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากคอมพอลิธเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด (Thermoplastic corn starch, TPCS) ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดและเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด โดยศึกษาผลของส่วนเสริมแรงของชนิดขี้เลื่อยไม้เนื้ออ่อน (Softwood sawdust, SS) ได้แก่ ไม้สัก (Teak wood, *Tectona grandis* L.f.) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood sawdust, HS) ได้แก่ ไม้แดง (Iron wood, *Xylic xylocarpa*) ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr มีขนาด 100-200 เมช จากการทดสอบ FT-IR สเปกตรัมที่แสดงการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนใหม่ระหว่างแป้ง และขี้เลื่อย การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS มีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่า SS และปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น การศึกษาสัณฐานวิทยาเมื่อผสมขี้เลื่อยใน TPCS พบว่าพื้นผิวค่อนข้างเรียบ มีการกระจายตัวดี และเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ของแป้ง จากการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้น พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS มีการดูดซับความชื้นลดลงเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น โดย TPCS เสริมแรงด้วย SS มีการดูดซับความชื้นน้อยกว่า HS จากสมบัติเชิงกล พบว่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น โดย TPCS เสริมแรงด้วย HS มีสมบัติเชิงกลดีกว่า SS ส่วนสมบัติเชิงกลหลังการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยมีแนวโน้มสูงกว่า TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ โดย TPCS เสริมแรงด้วย SS มีแนวโน้มการย่อยสลายช้ากว่า HS จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS มีแนวโน้มอุณหภูมิสลายตัวของแป้งคงที่ ดังนั้น TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย HS ที่ปริมาณ 30 phr มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และสมบัติเชิงกล

**คำสำคัญ :** ขี้เลื่อย แป้งข้าวโพด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

<b>Thesis Title</b>	Effect of sawdust types on properties of thermoplastic corn starch/sawdust composites		
<b>Student</b>	Miss Thadcha Boonganon	Student ID 57050418	
	Miss Preeyapon Paikaew	Student ID 57050454	
	Miss Sirikhwan Phaiwan	Student ID 57050518	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2017		
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Jutarat Prachayawarakorn		

### Abstract

This special project aimed to study and improve properties of biodegradable polymer prepared from thermoplastic corn starch (TPCS). TPCS was compounded by an internal mixer and molded by a compression molding machine. Then, TPCS was modified by softwood sawdust (SS) i.e. Teak wood (*Tectona grandis L.f.*) and hardwood sawdust (HS) i.e. Iron wood (*Xylic xylocarpa*) with difference contents of 0 10 20 and 30 phr by weight and the particle size of 100-200 mesh. The results showed that the IR absorption bands of O-H stretching and O-H bending vibration shifted to lower wavenumber, indicating of new hydrogen bond formation. From x-ray diffraction study, it was observed that crystallinity of HS was higher than SS and the amount of crystallinity improved when the contents of sawdust increased. For morphology, the addition of sawdust into TPCS showed smooth surface, good distribution and phase compatibility. In addition, water uptake of TPCS reinforced by SS and HS decreased water when the sawdust contents increased. TPCS reinforced by SS showed lower water absorption than HS. For mechanical properties, it was found that stress at maximum load and Young's modulus increased when the sawdust contents increased. TPCS reinforced by HS showed better mechanical properties than SS. In addition, tensile properties after soil burial test of TPCS modified by the sawdust was higher than those without the sawdust, the TPCS reinforced by SS degraded slower than HS. For thermal properties, TPCS reinforced by SS and HS caused no change in the decomposition temperature of starch. Thus, the TPCS modified by HS with contents of 30 phr by the TPCS weight showed the best overall based on crystallinity and mechanical properties.

**Keywords :** Sawdust, Corn starch, Thermoplastic starch

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณทุกท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ ที่เป็นอาจารย์ให้คำปรึกษา ดูแลอย่างใกล้ชิด และให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่อง รวมถึงตรวจแก้โครงการพิเศษเล่มนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือรวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ และสอนเทคนิคต่างๆเกี่ยวกับเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ทัชชา บุณกานนท์  
ปรียาภรณ์ พลายแก้ว  
ศิริขวัญ ภายวัน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้นวัตกรรมเพื่อโลก .....	4
2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ .....	5
2.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้.....	7
2.3.1 การใช้งานทางการแพทย์.....	7
2.3.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม .....	7
2.3.3 फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร.....	7
2.3.4 ถุงสำหรับใส่ของ .....	7
2.3.5 फिल्म และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร.....	7
2.3.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค .....	8
2.3.7 โฟมเม็ดกันกระแทก.....	8
2.4 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	8
2.5 เคมีและสมบัติของแป้ง.....	8
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง .....	9
2.5.1.1 อะไมโลส (Amylose) .....	9
2.5.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin).....	10
2.5.2 ไขมัน (Lipid).....	11
2.5.3 โปรตีน (Protein).....	11
2.5.4 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) .....	12
2.5.5 เถ้า และสารอนินทรีย์อื่นๆ (Ash & Inorganic components).....	12
2.5.6 ความชื้น (Moisture) .....	12
2.6 โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....	12
2.7 สมบัติของแป้ง.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1	กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)	12
2.7.2	การเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้ง (Gelatinization)	13
2.7.3	การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)	14
2.7.4	ความหนืด	14
2.8	แป้งข้าวโพด	14
2.8.1	กระบวนการผลิตแป้งข้าวโพด	15
2.9	ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and wood fiber)	17
2.9.1	หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้	17
2.9.2	องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อสาร	18
2.9.2.1	เซลลูโลส (Cellulose)	18
2.9.2.2	เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	19
2.9.2.3	ลิกนิน (Lignin)	20
2.9.2.4	สารแทรก (Extractives)	20
2.9.3	ไม้สัก	21
2.9.4	ไม้แดง	22
2.10	พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)	23
2.10.1	กลีเซอรอล (Glycerol)	23
2.11	สารหล่อลื่น (Lubricants)	24
2.11.1	แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate)	24
2.12	การผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)	25
2.13	การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression mold)	26
2.14	การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	26
2.14.1	การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน	26
2.14.2	การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป	27
2.14.3	การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	27
2.14.4	การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด	28
2.14.5	การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	28
2.14.6	การทดสอบโดยการฝังดิน	28
2.14.7	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	28
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>		<b>33</b>
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ	34
3.3	การทดลอง	36
3.3.1	การเตรียมซีลี้อย	36
3.3.2	การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพด	36
3.3.3	การปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยซีลี้อย	36

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	37
3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน .....	37
3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	38
3.4.3 การทดสอบสัมฐานวิทยา.....	39
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	39
3.4.5 การดูดซับความชื้น.....	39
3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	39
3.4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....</b>	<b>41</b>
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน.....	42
4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	44
4.3 สัมฐานวิทยา .....	47
4.4 การดูดซับความชื้น.....	50
4.5 สมบัติเชิงกล.....	52
4.6 การย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	54
4.7 สมบัติทางความร้อน.....	58
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>61</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	62
เอกสารอ้างอิง .....	63
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	73
ภาคผนวก ง .....	76
ภาคผนวก จ.....	77
ภาคผนวก ฉ.....	78
ภาคผนวก ช.....	79
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	83

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน .....	9
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของ อะไมโลสกับไอโอดีน .....	10
2.3 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ.....	13
2.4 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวโพด .....	15
2.5 สมบัติของแป้งข้าวโพด .....	16
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อน.....	18
2.7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีกลีเซอรอล.....	23
3.1 องค์ประกอบของแป้งข้าวโพด .....	33
3.2 อัตราส่วนของแป้งข้าวโพด กลีเซอรอล แมกนีเซียมสเตียเรท และซีลีอ์ที่ใช้ในการเตรียม คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	37
3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกคอมพอสิตเทอร์ชที่เตรียมได้....	38
4.1 แสดงผลการทดลองอัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอล.....	41
4.2 ปริมาณผลึกของ TPCS เสริมแรงด้วยอนุภาคซีลีอ์ .....	46
4.3 สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติ เชิงกลก่อนฝังดิน.....	57
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และน้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วย ซีลีอ์ และเสริมแรงด้วยซีลีอ์ SS ในปริมาณต่างกัน .....	59
4.5 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และน้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยซีลีอ์ SS และเสริมแรงด้วยซีลีอ์ HS .....	60
ตารางแสดงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของ SS.....	74
ตารางแสดงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของ HS.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะไมโลส..... 9
2.2	โครงสร้างของอะไมโลเพคติน..... 11
2.3	ไม้เนื้ออ่อน..... 17
2.4	ไม้เนื้อแข็ง..... 17
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส..... 19
2.6	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส..... 19
2.7	โครงสร้างของลิกนิน ..... 20
2.8	ไม้สัก ..... 21
2.9	ไม้แดง..... 22
2.10	โครงสร้างของกลีเซอรอล ..... 23
2.11	เครื่องผสมแบบปิด ..... 25
2.12	เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน..... 26
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัย ..... 35
3.2	ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่ใช้ทดสอบ ..... 38
4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ในปริมาณต่างๆ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 phr..... 42
4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ในปริมาณต่างๆ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 phr..... 42
4.3	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้ง และซีลี้อย..... 43
4.4	ดิฟแฟรกโทแกรมของแป้งข้าวโพด..... 44
4.5	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) SS และ (ข) HS..... 44
4.6	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS/10/SS (ค) TPCS/20/SS และ (ง) TPCS/30/SS ..... 45
4.7	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS/10/HS (ค) TPCS/20/HS และ (ง) TPCS/30/HS..... 45
4.8	สัณฐานวิทยาของ TPCS (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 1500 เท่า..... 47
4.9	สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจาก SS ขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10 (ค-ง) 20 (จ-ฉ) 30 ที่กำลังขยาย 150 และ 1500 เท่า..... 48
4.10	สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจาก HS ขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10 (ค-ง) 20 (จ-ฉ) 30 ที่กำลังขยาย 150 และ 1500 เท่า..... 49
4.11	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr..... 50
4.12	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr..... 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13	สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ที่ปริมาณต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด .....	53
4.14	สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด .....	55
4.15	สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด .....	56
4.16	เทอร์โมแกรมของ TPCS เสริมแรงด้วย SS โดยใช้อนุภาคขี้เลื่อย (100-200 เมช) ที่มีปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG .....	58
4.17	เทอร์โมแกรมของ TPCS เสริมแรงด้วย HS โดยใช้อนุภาคขี้เลื่อย (100-200 เมช) ที่มีปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG .....	59
(ก.1)	ลักษณะชิ้นงานของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างกัน .....	68
(ข.1)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS .....	69
(ข.2)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/10/SS .....	69
(ข.3)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/20/SS .....	70
(ข.4)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/30/SS .....	70
(ข.5)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/10/HS .....	71
(ข.6)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/20/HS .....	71
(ข.7)	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/30/HS .....	72
(ค.1)	สัณฐานวิทยาของ SS ที่มีขนาดอนุภาค 100-200 เมช พื้นที่ผิวกำลังขยาย 85 เท่า .....	73
(ค.2)	สัณฐานวิทยาของ HS ที่มีขนาดอนุภาค 100-200 เมช พื้นที่ผิวกำลังขยาย 85 เท่า .....	73
(ข.1)	TGA และ DTG ของ TPCS .....	79
(ข.2)	TGA และ DTG ของ TPCS/10/SS .....	79
(ข.3)	TGA และ DTG ของ TPCS/20/SS .....	80
(ข.4)	TGA และ DTG ของ TPCS/30/SS .....	80
(ข.5)	TGA และ DTG ของ TPCS/10/HS .....	81
(ข.6)	TGA และ DTG ของ TPCS/20/HS .....	81
(ข.7)	TGA และ DTG ของ TPCS/30/HS .....	82

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPS	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ
TPCS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด
CS	แป้งข้าวโพด
SS	ซีลียไม้นิ่มอ่อน
HS	ซีลียไม้นิ่มแข็ง
TPCS/10/SS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มอ่อน 10 phr
TPCS/20/SS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มอ่อน 20 phr
TPCS/30/SS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มอ่อน 30 phr
TPCS/10/HS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มแข็ง 10 phr
TPCS/20/HS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มแข็ง 20 phr
TPCS/30/HS	คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของซีลียไม้นิ่มแข็ง 30 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาของการใช้พลาสติกเริ่มมีผู้ให้ความสนใจมากขึ้น ทั้งนี้เพราะพลาสติกสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก ทนทานต่อสารเคมี มีความคงทนต่อการย่อยสลายใช้เวลานานร้อยปีกว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วน นำไปเผาจะได้ก๊าซที่เป็นพิษ และมีความร้อนสูง ถ้านำไปทิ้งในมหาสมุทรอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล [1] ปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีปริมาณมากถ้าไม่มีการใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้มาทดแทนอาจทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกสูงขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสลายตัวยาก ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมนาน ยากต่อการกำจัด โดยมีวิธีการต่างๆ ในการกำจัดขยะพลาสติกทั้ง เช่น โดยการฝังกลบเป็นวิธีที่สะดวก แต่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เพราะพลาสติกย่อยสลายได้ยาก ถูกทับถมอยู่ในดิน และนับวันยังมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการใช้พลาสติก ส่วนการเผาขยะพลาสติกก่อให้เกิดมลภาวะ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนรุนแรงขึ้นเป็นอันตรายต่อร่างกาย และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การกำจัดพลาสติกโดยขาดการจัดการที่ดีอาจก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาได้ [2]

แนวทางการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพลาสติกในปัจจุบัน คือ การลดการใช้ (Reduce) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) และการรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งทั้ง 3 แนวทางนี้ส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกลดลงและเป็นการยืดอายุการใช้งานของพลาสติกให้ยาวนาน อีกแนวทางการแก้ไข คือ การใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) ซึ่งสามารถแก้ปัญหามลภาวะของขยะพลาสติกลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม และภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย [2]

การใช้พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) แทนพลาสติกสังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้จะสามารถลดปัญหาขยะพลาสติกลง โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ (Renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) น้ำ (H<sub>2</sub>O) เกลือต่างๆ และชีวมวล (Biomass) ได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ [1] วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิด เช่น แป้ง (Starch) ข้าวโพด (Corn) โปรตีนจากถั่ว (Protein from bean) เป็นต้น และในบรรดาวัสดุธรรมชาติต่างๆ แป้งนับว่าเหมาะสมที่สุดเพราะมีจำนวนมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส หาง่าย และราคาถูกสามารถหาได้จากพืชชนิดต่างๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่งมันสำปะหลัง เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการนำแป้งมาผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในรูปสารตัวเติม (Filler) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ซึ่งหมายถึงพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหรือวัสดุที่สามารถหลอมตัว และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้โดยการใช้ความร้อนและความดันสูง [3]

ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ TPS คือ ชิ้นงานที่ได้จากแป้งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี ดูดความชื้นสูง และมีความว่องไวต่อน้ำมาก เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของ TPS นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก และใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การดัดแปรโครงสร้างทางเคมี (Chemical modification) หรือการผสมทางกายภาพระหว่าง TPS กับพอลิเมอร์และเส้นใยชนิดอื่นๆ เพื่อให้มีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากการค้นพบและพัฒนากระบวนการใหม่ๆ ทำให้มีราคาต่ำและมีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น [4]

แป้งมีหลายชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งถั่วเขียว และแป้งข้าวโพด จัดได้ว่าเป็นแป้งที่มีมากที่สุดในโลก ผลิตจากเมล็ดข้าวโพดโดยการบดแห้ง (Dry milling) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวเหลืองนวล ผิวสัมผัสแป้งเนียน ลื่นมือเมื่อทำให้สุกมีความชื้น ใส ไม่คั้นตัวง่าย หลังจากพักให้เย็นแป้งจะอยู่ตัวจับเป็นก้อนแข็งร่วน เป็นมันวาวเหมาะกับอาหารที่ต้องการความชื้นอยู่ตัว มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าอะไมโลเพคตินทำให้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง [1]

แนวทางการปรับปรุงสมบัติ TPS สามารถทำได้โดยใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ และสามารถย่อยสลายได้ เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ป่าน ปอกระเจา เส้นใยไม้ เส้นใยฝ้าย เป็นต้น ชี้เลื่อยเป็นเส้นใยไม้จากวัสดุธรรมชาติที่หาง่ายมีราคาถูก สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วอนุภาคหรือเส้นใยทางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากมีความแข็งแรง และความหนาแน่นต่ำ โดยชี้เลื่อยแบ่งออกเป็นชี้เลื่อยจากไม้เนื้ออ่อน (Softwood, SS) เช่น ไม้สัก ไม้พะยอม ไม้ตะบูนขาว เป็นต้น และชี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood, HS) เช่น ไม้แดง ไม้มะค่าโมง ไม้เคี่ยม เป็นต้น [3]

ไม้สัก (Teak wood, *Tectona grandis* L.f.) เป็นไม้เนื้ออ่อน พรรณไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ผิวเปลือกลำต้นสีน้ำตาล เป็นใบเลี้ยงเดี่ยวเนื้อใบหนาสาบคายสีเขียวเข้ม ใบมีลักษณะกลมใหญ่ขนาดกว้างออกดอกเป็นช่อตามบริเวณปลายกิ่ง ไม้สักมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ประมาณ 45-55, 25-30 และ 30-38 เปอร์เซ็นต์ [5-7]

ไม้แดง (Iron wood, *Xylia xylocarpa*) เป็นไม้เนื้อแข็ง ไม้ยืนต้นผลัดใบขนาดใหญ่ ใบเป็นช่อแบบขนนก ก้านใบยาวรูปไข่ ปลายใบแหลมมน เนื้อไม้สีแดงหรือน้ำตาลแดง เสี้ยนเป็นลูกคลื่น เนื้อละเอียดพอประมาณแข็งแรง เหนียว และทนทานมาก ไม้แดงมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ประมาณ 40-55, 24-40 และ 18-25 เปอร์เซ็นต์ [6-7]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสมบัติเชิงกล และการดูดซับความชื้นของ TPS สามารถปรับปรุงสมบัติได้โดยใช้เส้นใยจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย [4] เส้นใยป่าน [8] นอกจากนี้เส้นใยไม้หรือชี้เลื่อย (Sawdust) ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สามารถนำมาปรับปรุงสมบัติของ TPS ได้ โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งทำวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยชี้เลื่อยไม้มะค่า (*Ormosia*) พบว่ามีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น และการดูดซับความชื้นลดลง โดยชี้เลื่อยที่ปริมาณ 20 phr ขนาดน้อยกว่า 100 เมช มีสมบัติดีที่สุด [3] และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังแอสซิเทต เมื่อเติมชี้เลื่อยไม้สะเดา (*Neem* wood) พบว่าสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น การดูดซับความชื้นลดลง และเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดทำการศึกษากการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์โม่พลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด (Thermoplastic corn starch, TPCS) โดยการเสริมแรงด้วย ไม้เนื้ออ่อน (Softwood sawdust, SS) ได้แก่ ไม้สัก และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood sawdust, SS) ได้แก่ ไม้แดง ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ เนื่องจากไม้เนื้ออ่อนมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่สามารถเข้ากันได้กับแป้งข้าวโพด โดยคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และการดูดซับความชื้นลดลง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมคอมพอลิเมอร์โม่พลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด (TPCS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของไม้เนื้ออ่อน และเนื้อแข็งเป็นส่วนเสริมแรงโดยกระบวนการกดอัด
- 2) เพื่อตรวจวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้ไม้เนื้ออ่อนในปริมาณต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียม TPCS โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 2) ศึกษาปริมาณไม้เนื้ออ่อน 0 10 20 และ 30 phr เพื่อหาปริมาณไม้เนื้ออ่อนที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติของ TPCS ที่เตรียมได้ดีขึ้น
- 3) ศึกษาชนิดของไม้เนื้ออ่อนจากไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ ไม้สัก และไม้เนื้อแข็ง ได้แก่ ไม้แดง ที่ทำให้สมบัติของ TPCS ดีขึ้น
- 4) เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สันฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อนของ TPCS ที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จาก TPCS ที่ปรับปรุงโดยใช้ไม้เนื้ออ่อน
- 2) ช่วยลดการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก ลดปริมาณขยะเพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้นวัตกรรมเพื่อโลก

ประชากรที่เพิ่มขึ้นมากกว่าอดีต ทรัพยากรธรรมชาติจึงลดลงอย่างรวดเร็ว มนุษย์จึงต้องคิดค้นและพัฒนาหาสิ่งทีนำมาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งสิ่งที่ได้ออกมา คือ “พลาสติก” แต่ด้วยคุณสมบัติที่ทนทาน มีอายุการใช้งานนานเป็นร้อยปีของพลาสติก กลับสร้างปัญหาใหญ่ นั่นคือ ขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นมาแทนเพราะการเผาทำลาย และการย่อยสลายพลาสติกก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์จึงต้องหาทางแก้ไขปัญหาล่าช้านี้ ซึ่งพลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด

ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ดังนี้ [10]

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

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้ เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย

- BPS Japan (1994) – Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

- DIN FNK103.2 (1993) – A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods.

วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน

- CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass.

วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่มีการย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับคำว่า การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation) ย่อมาจาก biotic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุเป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สมีเทน และน้ำ [11]

## 2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่าย ภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง [11]

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ [11]

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสง และความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัย และพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น ไกลโคไฮโดรเลส (Glycohydrolase) ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลต์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [11]

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้เอนโดเอนไซม์ (Endo-enzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบเอ็กโซเอนไซม์ (Exo-enzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุ และมวลชีวภาพ (Biomass) [11]

\*มวลชีวภาพ หมายถึง มวลรวมของสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิต และเติบโตของสิ่งมีชีวิตซึ่งรวมถึงพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

นอกจากนี้ยัง พบว่ามีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics; EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝน และแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลาย และการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม คำว่าพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green Plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

### 2.3.1 การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยด้วยยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัด และฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย [12]

### 2.3.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง [12]

### 2.3.3 फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรงช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุ และสารอาหารบริเวณหน้าดิน ซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า [12]

### 2.3.4 ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติก และฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูง และยังไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยก และทำความสะอาดรวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุง และฟิล์มในบางโอกาส [12]

### 2.3.5 ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์ม และถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่าง เช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลีได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ต้นต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บ และทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูป และอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้ [12]

### 2.3.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้าย และขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้ได้อย่างสะดวก และประหยัดเชื้อเพลิงแต่ปัญหา คือ พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก และใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนา การผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้ง และพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำ และย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน และสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว [12]

## 2.4 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้ง (Starch) เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีราคาถูกได้มาจากพืช และมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ตัวอย่างก็ตาม อุณหภูมิหลอม (Melting temperature) ของแป้งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Degradation temperature) ทำให้แป้งไม่ไหม้ในระหว่างขึ้นรูป ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแป้งไปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticiser) เข้าไปเพื่อทำลายอันตรกิริยาของโมเลกุลแป้งภายใต้ความร้อน และแรงเฉือน กระบวนการนี้รู้จักกันในชื่อเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) พลาสติกไซเซอร์ที่มีการใช้ทั่วไปในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น น้ำ (Water) กลีเซอรอล (Glycerol) ไกลคอล (Glycol) ซอบิทอล (Sorbital) ยูเรีย (Urea) ฟอร์มาไมด์ (Formamide) [13]

## 2.5 เคมีและสมบัติของแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ [14]

### 2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง

โดยทั่วไปเม็ดแป้ง (Starch granule) จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมี โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส สารอนินทรีย์อื่นๆ และน้ำในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพืช

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งมีแอนโอเมอริกคาร์บอน (Anomeric carbon (C1)) ซึ่งไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้น แต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่งรีดิวซ์ (Reducing end) 1 ตำแหน่งโมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักตามขนาดโมเลกุล และลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็ก และมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่ และมีกิ่งก้านสาขามากมาย

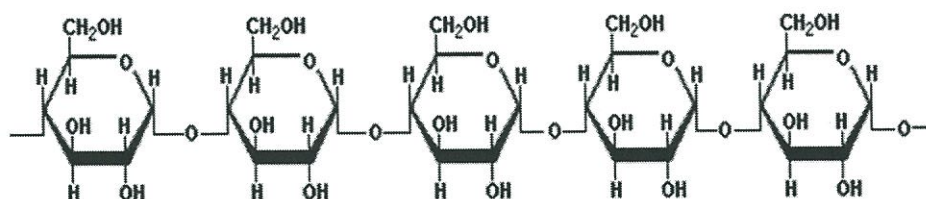
นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคตินเรียกว่า “Intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลส และอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [14]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. มีความข้นหนืดมาก และใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดง หรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้น และแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้น และแผ่นแข็ง

#### 2.5.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000–6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1, 4-glycosidic linkage) ดังรูปที่ 2.1 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้ในปริมาณเล็กน้อย [14]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากราก และหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ จะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า คือ อยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีองค์การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization; DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพด และแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมาก มีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง [14]

**ตารางที่ 2.2** ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [1]

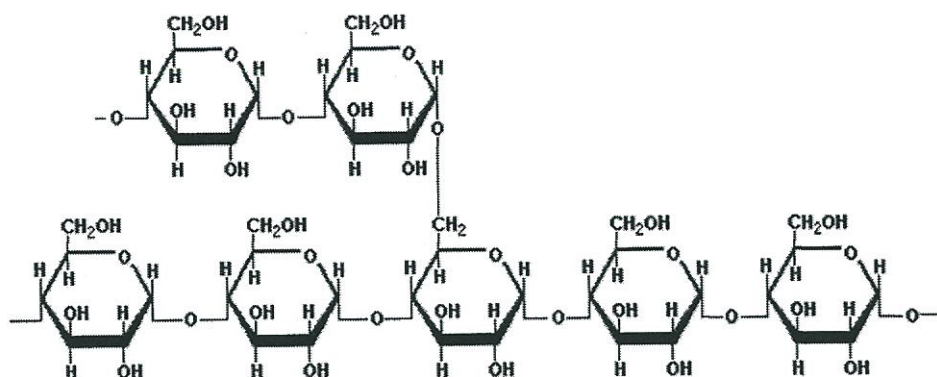
ความยาว	จำนวนรอบเกลียว	สี
12	2	ไม่มีสี
12-15	2	น้ำตาล
20-30	3-5	แดง
35-40	6-7	ม่วง
>45	9	ฟ้า

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล (Butanol) กรดไขมัน (Fatty acid) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ฟีนอล (Phenol) และไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำโดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์

อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคส เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง (ตารางที่ 2.2) ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง

### 2.5.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1, 4-glycosidic linkage) และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,6 ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1, 6-glycosidic linkage)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [14]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งอะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียวจึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

### 2.5.2 ไขมัน (Lipid)

ไขมันที่สกัดได้จากเม็ดแป้งอาจเป็นไขมันที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง หรืออาจมาจากเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ และมาจับอยู่กับเม็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง แป้งจากเอนโดสเปิร์มของธัญพืชมีลักษณะเฉพาะ คือ มีไขมันเป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (Integral components) ในขณะที่เม็ดแป้งจากมันฝรั่ง เม็ดถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชไม่พบ (Integral lipids) ไขมันที่จับอยู่กับเม็ดแป้งนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ไขมันที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น จากเมมเบรน และสเฟียร์โรโซม ซึ่งจับอยู่กับเม็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยไขมันพวกไตรกรีเซอไรด์ ไตเอซิลไกลโคไลปิด และฟอสโฟไลปิดระหว่างการเจริญของเมล็ดข้าวจะเกิดการย่อยสลายไลปิดบางส่วนได้กรดไขมัน และโมโนเอซิลกลีเซอไรด์ในขณะที่สกัดแป้ง แม้ว่าเม็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อย แต่กรดไขมัน และโมโนเอซิลไลปิดเหล่านี้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเม็ดแป้งได้ จึงเรียกไลปิดส่วนนี้ว่าไขมันบนพื้นผิวแป้ง (Starch surface lipids) ส่วนไลปิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้งอย่างแท้จริงจะพบอยู่ภายในเม็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลี พบว่าเป็นไลปิดประเภทไลโซฟอสโฟไลปิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโอต และข้าวโพดพบว่า เป็นกรดไขมันประมาณ 30-60% แป้งข้าวเหนียว ข้าวโพดเหนียว ข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลีเหนียวซึ่งมีอะไมโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณไลปิดต่ำมากเช่นกัน และแป้งจากข้าวเหล่านี้เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะไมโลสสูงก็จะพบไลปิดในปริมาณมากด้วย [14]

### 2.5.3 โปรตีน (Protein)

ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาทีนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง ซี และกลีซินของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป [1]



พองตัวจะคำนวณในรูปน้ำหนักตะกอนที่ได้หลังจากการเหวี่ยงต่อน้ำหนักแป้งแห้งจริงที่หักน้ำหนักแป้งที่ละลายแล้ว ความสามารถในการละลายเป็นน้ำหนักของแป้งที่ละลายน้ำได้ และวิเคราะห์ได้โดยตรงจากการนำส่วนใสไปทำให้แห้ง และชั่ง [1]

### 2.7.2 การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxy group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งจัดเรียงตัวอยู่ในรูปของโมเชลล์ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงน้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งพองตัว ส่งผลให้ส่วนผสมน้ำแป้งมีความหนืด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน โดยอุณหภูมิที่ละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด โดยแป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาตินในเซชันต่ำกว่าอุณหภูมิแป้งจากธัญพืช

ตารางที่ 2.3 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ [15]

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน (°C)
แป้งมันฝรั่ง	56-67
แป้งข้าวสาลี	58-64
แป้งมันสำปะหลัง	58-70
แป้งมันเทศ	58-72
แป้งท้าวยายม่อม	62-70
แป้งข้าวโพด	62-73
แป้งข้าวเจ้า	68-78
แป้งข้าวฟ่าง	68-78

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ

1. ระยะที่หนึ่ง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเชลล์ยืดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนสังเกตเห็นได้ เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง และโครงสร้างแบบที่เกิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งขึ้นจนถึงอุณหภูมิเริ่มเจลาตินในเซชันจะเริ่มเข้าสู่ระยะที่สอง

2. ระยะที่สอง เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเชลล์จะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากขึ้น และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

3. ระยะที่สาม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปอีก รูปร่างของเม็ดแป้งไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจล [1,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสารละลายแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กลงจะกระจายหลุดออกมาทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติที่แข็งแรงโดยโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเจลเหนียวคล้ายฟิล์ม หรือผลึกเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาภายนอก เรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระ และมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดเบสของสารละลาย พบว่าแป้งจะเกิดการคืนตัวได้เร็วที่สุดในช่วง pH 5-7 หากช่วง pH สูงหรือต่ำกว่านี้การคืนตัวจะช้าลง นอกจากนี้ยังมีผลจากปริมาณ ขนาดของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน กล่าวคือ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงจากการวิจัย พบว่าอะไมโลเพคตินจะเกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินต่างกันจึง ทำให้เกิดการคืนตัวที่แตกต่างกันตามไปด้วย [1]

### 2.7.4 ความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ และเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว และมีความหนืดมากขึ้น พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามชนิด และสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลง หรือคงที่ขึ้นกับชนิดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด ในขณะที่แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีจะมีความหนืดต่ำที่สุด การที่แป้งมีความหนืดสูง เนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง หรือโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลาย และละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง ชนิดของแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง [16]

## 2.8 แป้งข้าวโพด

แป้งข้าวโพดจัดได้ว่าเป็นแป้งที่มีมากที่สุดในโลก ผลิตจากข้าวโพด (Corn หรือ Maize) ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L. อยู่ในวงศ์ Gramineae มีต้นกำเนิดในทวีปอเมริกาแล้วกระจายไปยังทวีปแอฟริกา อินเดีย ออสเตรเลีย และประเทศในยุโรปที่มีอากาศอบอุ่น ข้าวโพดมีหลายพันธุ์ เช่น หัวแข็ง (Dent) หัวบุบ (Flint) ปอป (Pop) แป้ง (Flour) หวาน (Sweet) และข้าวเหนียว (Waxy) ข้าวโพดมีองค์ประกอบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.4 [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวโพด [18]

องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวโพด	ร้อยละ
ความชื้น	18.5
แป้ง	55.5
โปรตีน	8.2
ไขมัน	3.0
เส้นใย	2.4
เถ้า	1.5
น้ำตาล	5.1
ส่วนที่เหลือ	5.8

### 2.8.1 กระบวนการผลิตแป้งข้าวโพด

ในการแปรรูปข้าวโพดนั้นใช้เมล็ดข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ ทำการโม่ได้ 2 แบบ คือ โม่แห้ง และโม่ น้ำ ในการโม่แห้งนั้น สามารถทำความสะอาดได้เพียงการแยกร่อนขนาด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น ฟลาวร์ (Corn flour) ที่ยังมีโปรตีน และเกลือแร่สูง เหมาะสำหรับใช้ประกอบอาหาร ส่วนที่ใช้ใน อุตสาหกรรมเคมี และการผลิตสารให้ความหวาน (Glucose/Fructose syrup) จะต้องใช้สตาร์ช ข้าวโพด (Corn starch) เป็นวัตถุดิบ

ขั้นตอนแรกในกระบวนการผลิตแป้งข้าวโพดมีดังนี้ การทำความสะอาดเมล็ดข้าวโพด โดยแยกสิ่งเจือปน เช่น เมล็ดข้าวโพดหัก หรือ ฝุ่นผงออก แล้วนำมาแช่น้ำ (Steeping) ปกติจะมีการพ่นควันทามะถันเผา (SO<sub>2</sub>) ผสมลงในน้ำที่แช่น้ำ นี้ได้สารละลายกรดซัลฟูริก อุณหภูมิของน้ำแช่ ประมาณ 50 องศาเซลเซียส แช่ในสารละลายเป็นเวลา 36-50 ชั่วโมง เพื่อให้เปลือกเมล็ดอ่อนนุ่ม และทำลายโครงสร้างโปรตีนในเอนโดสเปอรัม หลังจากนั้นปล่อยน้ำที่แช่ข้าวโพดออกมาจะได้ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต คือ น้ำแช่ข้าวโพด (Corn steep liquor) ซึ่งมีโปรตีน และเกลือแร่สูง เมื่อนำไปต้มระเหยน้ำออกจะเป็นวัตถุดิบที่นำไปใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ได้

เมล็ดข้าวโพดที่แช่แล้วมีความชื้นประมาณ 50% ถูกส่งต่อไปบดหยาบ เอาเปลือกชั้นนอกออก แล้วผ่านไปยังถังแช่น้ำ (Flotation chamber) เพื่อแยกคัพพะออก คัพพะซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของถัง มีใบพัดกวาดออกมา ส่วนที่เหลือจมอยู่ด้านล่างแล้วมีใบพัดกวาดออก

ในปัจจุบันมีการใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าถังแช่น้ำ (Flotation chamber) สารแขวนลอยแป้งจะถูกป้อนขึ้นด้านบน เกิดการหมุนวน ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fiber) จะถูกปล่อยออกทางด้านบนของถัง และสารแขวนลอยที่เหลือจะตกลงด้านล่างเมล็ด (Germ) ที่ได้นำมาล้างเพื่อกำจัดส่วนของเอนโดสเปอรัมที่ติดอยู่ แล้วบีบน้ำออกจากเมล็ด โดยใช้เครื่องอัดบีบ (Screw press) จะเหลือน้ำประมาณ 50% ทำให้แห้งแล้วสกัดน้ำมันออกจากเมล็ด โดยใช้สารละลายซึ่งจะได้น้ำมันค่อนข้างต่ำประมาณ 1% หรือสกัดน้ำมันโดยใช้เครื่องอัดบีบ ซึ่งจะได้เป็นก้อนแห้งแข็ง (Oil cake) ที่มีน้ำมันประมาณ 6% นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเลี้ยงสัตว์

เมื่อผ่านขั้นตอนการบดหยาบ และแยกเมล็ดออกแล้ว ในน้ำแป้งยังมีเส้นใย แป้ง และโปรตีนนำ ส่วนนี้ไปบดละเอียดได้แป้ง และกลูเตนที่มีขนาดเล็ก แต่เยื่อใยที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าจึงสามารถแยก ออกได้โดยตะแกรงขนาดต่างๆ เส้นใยที่แยกได้ นำมาล้าง และกำจัดน้ำออก โดยใช้เครื่องอัดบีบ นำไปใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์

หลังจากนั้นแยกกลูเตนออกจากแป้ง โดยใช้เครื่องเหวี่ยงประสิทธิภาพสูง (Separator) จะได้แป้งในรูปสารแขวนลอยเข้มข้นที่มีส่วนของกลูเตนปนอยู่เล็กน้อย แยกกลูเตนออกโดยใช้ ไฮโดรไซโครนในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำสะอาดเพื่อล้างแป้ง ซึ่งเป็นจุดเดียวในกระบวนการผลิตที่ใช้น้ำ สะอาด สารแขวนลอยแป้งที่ได้จะมีความหนาแน่น 22 องศาโบเม (Degree Baumé) มีโปรตีน 0.3% นำไปกำจัดน้ำโดยใช้เครื่องเหวี่ยง (Dewatering centrifugal) [17]

ตารางที่ 2.5 สมบัติของแป้งข้าวโพด [1]

สมบัติ	แป้งข้าวโพด
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	3-26
อะไมโลส (%)	28
ขนาดของอะมิโลส (Degree of polymerization)	800
อะไมโลเพคติน (%)	72
โปรตีน (%)	10.0
ไขมัน (%)	4.4
เส้นใย (%)	2.2
เถ้า (%)	1.2
อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature, °C)	79.18
ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, RVU)	217.13
ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity, RVU)	195.21
ความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity, RVU)	145.67
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลที่ไนซ์ (Onset temperature, °C)	49
อุณหภูมิสุดท้ายเกิดเจลที่ไนซ์ (Conclusion temperature, °C)	67

การใช้แป้งข้าวโพดในหลากหลายอุตสาหกรรม ดังนี้

1. ทางเภสัชกรรม ใช้ในการสร้างเนื้อเจล ทำยาเม็ด เพื่อให้เม็ดที่ตอกออกมามีความแข็งแรง ไม่แตก
2. ทางอาหาร ใช้เพื่อต้องการให้ส่วนผสมข้น หรือจับตัวกัน
3. ทางอุตสาหกรรมหนัก ใช้เป็นกาวที่ต้องระวังในการขึ้นรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประโยชน์ทางอาหาร

1. เป็นวัตถุดิบในการใส่หน้าเค้ก
2. ใช้ทำลาบทอด หรือหมูก้อนทอด
3. เป็นส่วนผสมในวนิลาชอส ทำให้ส่วนผสมขึ้น
4. เป็นส่วนผสมในการทอดเนื้อสัตว์ เช่น ไก่ ปลา

## 2.9 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and wood fiber)

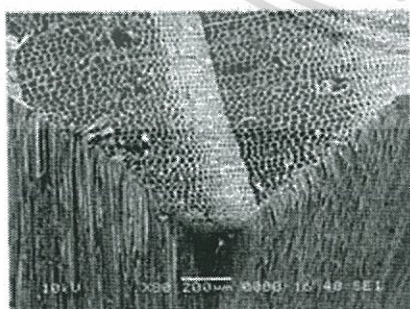
ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างมากสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหารให้ความร้อน และผลิตไอน้ำซึ่งอาจใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย นอกจากนี้ไม้ยังใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องตกแต่งได้อีกมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อให้เกิดเศษไม้ (Wood flake) หรือขี้เลื่อย (Sawdust) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเส้นใยไม้ [19]

### 2.9.1 หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้

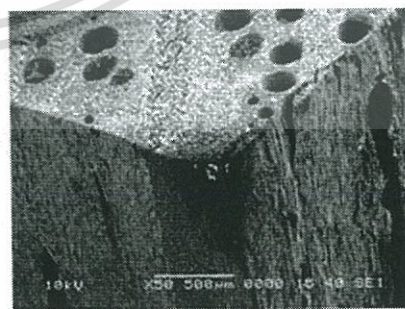
ไม้ทางการค้าอาศัยวิชาการทางพฤกษศาสตร์เป็นรากฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้พวกสน (Coniferae) ที่มีลักษณะใบเรียวยาวเล็ก (Needle leaves) ผลมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Cone) ต้นไม้พวกสนส่วนมากขึ้นในที่สูง มีอากาศเย็นในประเทศที่มีอากาศหนาว (Temperate regions) ลักษณะโครงสร้างของไม้เนื้ออ่อนแตกต่างจากไม้เนื้อแข็งอย่างชัดเจน และมีความเหมาะสมในการใช้งานก่อสร้างได้ ถึงแม้เนื้อไม้ของไม้สนหลายชนิดค่อนข้างอ่อน แต่ง่ายต่อการไสตัดแต่ง มีน้ำหนักเบา และแข็งพอสำหรับใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไปได้

2. ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้ที่มีใบกว้าง (Broad leaved trees) ซึ่งเป็นไม้จำนวนมากที่มีอยู่ในป่าไม้ของประเทศไทย ไม้ที่เป็นของไทยส่วนมาก หรือทั้งหมดที่เป็นการค้าเป็นไม้เนื้อแข็งมีจำนวนหลายสิบชนิด ลักษณะโครงสร้างของไม้เนื้อแข็งมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าไม้เนื้ออ่อน และมีลักษณะแตกต่างระหว่างไม้เนื้อแข็งด้วยกันเองมาก คุณสมบัติของไม้เนื้อแข็งมีความแตกต่างระหว่างพวกไม้เนื้อแข็งด้วยกันทั้งในด้านความแข็งแรงของการรับน้ำ และความแข็งของเนื้อไม้อย่างกว้างขวาง [20]



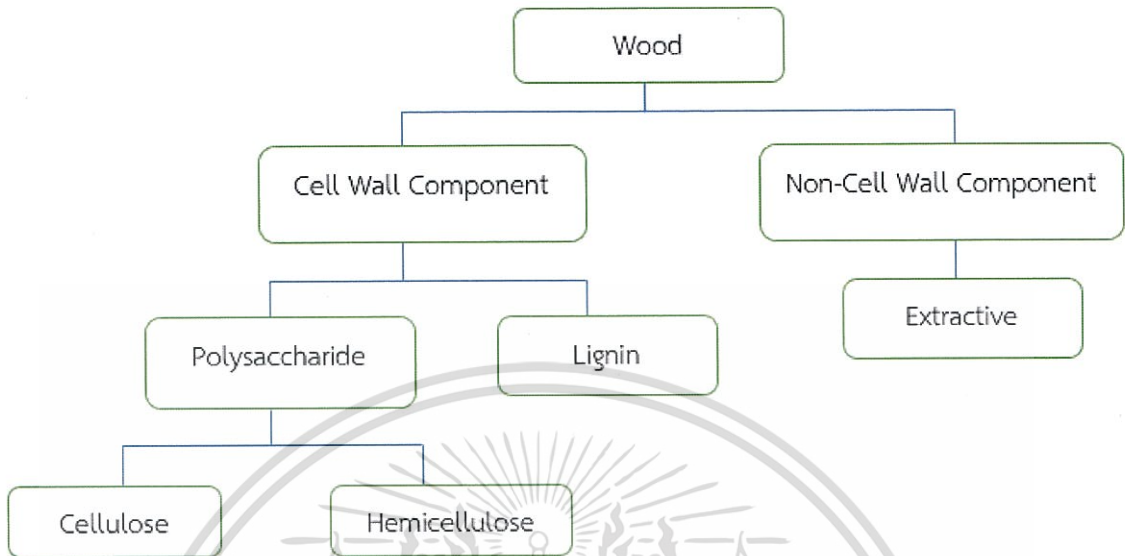
รูปที่ 2.3 ไม้เนื้ออ่อน [20]



รูปที่ 2.4 ไม้เนื้อแข็ง [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9.2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อสาร



ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อน [5,7]

องค์ประกอบทางเคมีร้อยละ หน่วย : ร้อยละ	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
เซลลูโลส	45-55	40-55
เฮมิเซลลูโลส	25-35	24-40
ลิกนิน	30-38	18-25

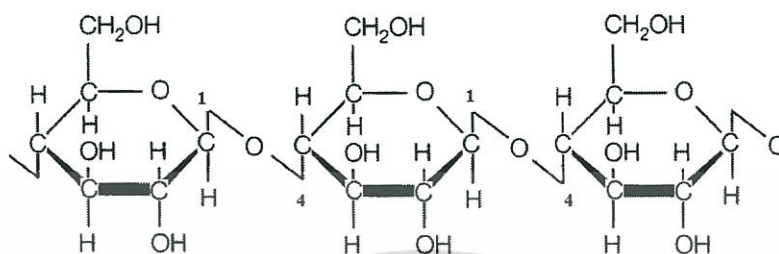
### 2.9.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดจากกลูโคสจำนวนประมาณ 50,000 โมเลกุล เชื่อมต่อกันเป็นโซ่ยาว และมีลักษณะคล้ายตาข่าย มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ เซลลูโลสจึงมีโครงสร้างเป็นเส้นใยพบในไม้และลำต้นพืชร้อยละ 50 มีสมบัติไม่ละลายน้ำ ย่อยสลายยาก กระทบอาหารคนเราไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ ยกเว้นในสัตว์ประเภทกินพืช เช่น วัว ควาย ม้า ซึ่งมีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้

เซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์ (Structural carbohydrate) ประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ โมเลกุลของกลูโคส (Glucose subunits) 1,000-10,000 โมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) 200,000-2,000,000 หน่วยย่อย พื้นฐาน (Basic subunit) คือ เซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล ต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -(1-4) ไกลโคซิดิก โดยที่ไม่มีการแตกแขนง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

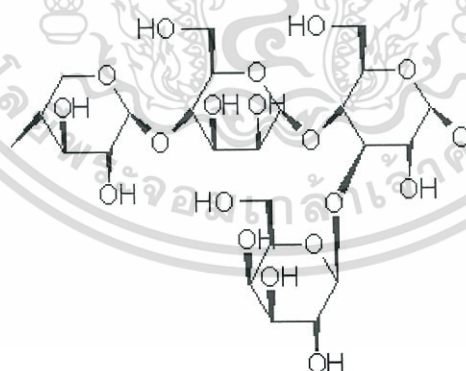
เซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ (Primary cell wall) ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และอย่างน้อย 14,000 โมเลกุลในผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิ (Secondary cell wall) โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาว และเรียงตัวขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช [21]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [21]

### 2.9.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยไซแลนซ์ (Xylans) ซึ่งมีน้ำตาลไซโลส (Xylose) แมนแนน (Mannans) ซึ่งมีน้ำตาลแมนโนส (Mannose) และกาแลคแทน (Galactans) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) นอกจากนี้ยังมีกลูโคแมนแนน ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลแมนโนสไซโลกลูแคนประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกลูโคส และแคลโลส (Callose) จัดเป็นเฮมิเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันแบบ  $\beta$ -1,3-glycosidic bond ซึ่งจะพบบริเวณปลายเซลล์ของท่ออาหาร (Sieve tubes) [21]

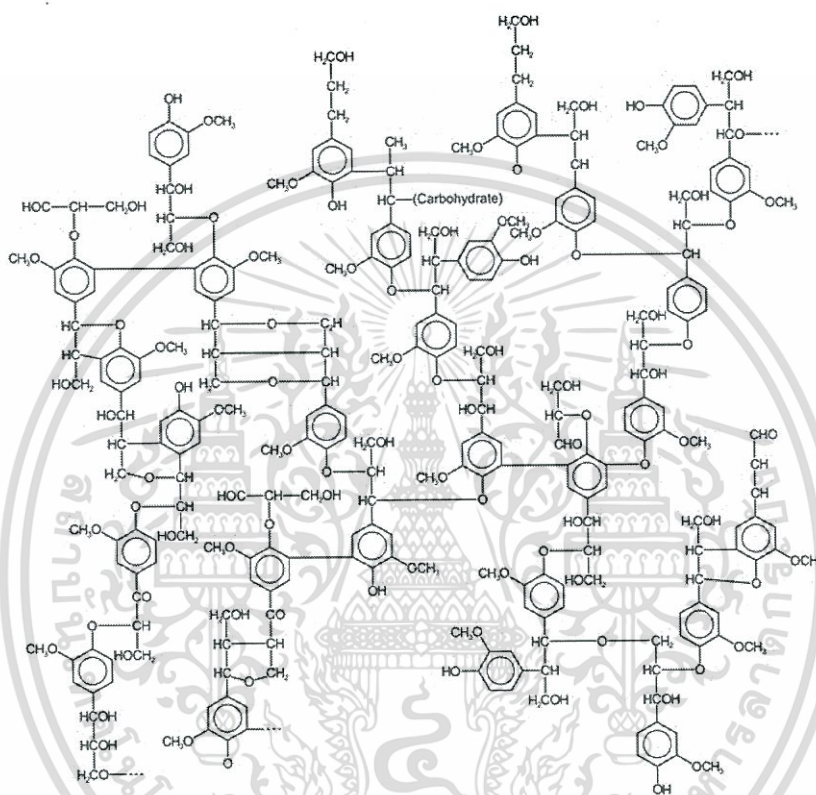


รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [21]

### 2.9.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน มีรากศัพท์มาจากคำว่า “Lignum” ในภาษาละติน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสามรองจากเซลลูโลส และไคติน ตามลำดับ ลิกนินประกอบด้วยโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนของพอลิเมอร์ที่มีหมู่อะโรมาติก และโครงสร้างมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง (Highly crosslinked) พบได้ในผนังเซลล์ของพืช

ลิกนิน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10,000 มีความไม่ชอบน้ำเนื่องจากมีโครงสร้างอะโรมาติกจำนวนมาก [22]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนิน [22]

### 2.9.2.4 สารแทรก (Extractives)

สารแทรก คือ สารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของโครงสร้างของผนังเซลล์อาจเป็นกรด หรือเป็นกลางมีตั้งแต่สารไอโซพรีนเทอร์พีนเฮดเตอโรไซคลิก กรดเรซินสารโพลีฟีนอลต่างๆ และอัลคาลอยด์ เป็นต้น และเป็นสารประกอบที่เป็นคุณสมบัติของพันธุ์ไม้แต่ละชนิด ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งที่แตกต่างกันออกไป สารประกอบเหล่านี้มีประมาณ 5-30% โดยมวล ซึ่งรวมไปถึงสารส่วนน้อย (Minor constituent) เป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดเถ้า อันได้แก่ สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟส และซิลิกา เป็นต้น สารพวกนี้มีประมาณ 0.1-3 เปอร์เซ็นต์โดยมวล การใช้ประโยชน์ของสารแทรกขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของสารนั้น เช่น สารแทรกจำพวกเทอร์พีนอาจใช้เป็นตัวทำละลาย ทำน้ำหอม ยา สบู่ กาว และใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ โพลีโนลใช้ในการฟอกหนัง และสังเคราะห์กาว และอัลคาลอยด์ส่วนใหญ่มีประโยชน์ทางเภสัชกรรม [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.3 ไม้สัก

ไม้สักเป็นไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ยืนต้น ผิวเปลือกลำต้นสีน้ำตาล ใบมีลักษณะกลมใหญ่และมีขนาดกว้าง ออกดอกเป็นช่อตามบริเวณปลายกิ่ง ไม้เนื้ออ่อนมีปริมาณเซลลูโลส 45-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25-35 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 30-38 เปอร์เซ็นต์ [5-7]

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Tectona grandis* L.f.

ชื่อวงศ์ : VERBENACEAE

ชื่ออื่น : เซปายี่ ปีฮือ ปายี่ เปื่อยี่

ลักษณะทั่วไป : ไม้ต้นขนาดใหญ่ ลำต้นตรง มีลำต้นสูงถึง 30 เมตร ผลัดใบในฤดูร้อน เปลือกเรียบ หรือแตกเป็นร่องตื้นเล็กๆ สีเทา โคนต้นมักเป็นพูต่างๆ ใบมีลักษณะเป็นใบเดี่ยว ต้นเล็กจะมีใบใหญ่มาก โคนใบมน ปลายใบแหลม ยาวประมาณ 25-30 เซนติเมตร กว้างเกือบเท่าความยาว เนื้อใบสากคายสีเขียวเข้ม ด้านหลังใบสีอ่อนกว่า ถ้าขยี้ใบสดจะมีสีแดงช้ำ และเปลี่ยนเป็นสีเขียวคล้ำ ดอกมีลักษณะเป็นช่อใหญ่หลวมๆ ตามปลายกิ่ง ดอกมีสีขาวนวล และมีขนาดเล็ก ผลแห้งเป็นกระเปาะค่อนข้างกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร เปลือกแข็งภายในโปร่งมีเมล็ด 1-3 เมล็ด

การกระจายและนิเวศวิทยา : พบทั่วไปตามป่าผลัดใบทางภาคเหนือที่ระดับความสูง 500 เมตร

ประโยชน์ : ไม้สักให้เนื้อไม้ที่ทนทาน สวยงามใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน ต่อเรือ ต่อรถ แกะสลักเครื่องมือสิกรรม ลักษณะเนื้อไม้สีเหลืองถึงสีน้ำตาลมีเส้นสีแก่แทรก เลื่อยไสกบตกแต่ง และชักเงาได้ง่าย แผลงไม่ชอบกัดแทะ [24]



รูปที่ 2.8 ไม้สัก [24]

#### 2.9.4 ไม้แดง

ไม้แดงเป็นไม้เนื้อแข็ง ไม้ยืนต้น ใบเป็นช่อขนนก ปลายใบแหลมมน มีเนื้อไม้สีแดง หรือน้ำตาลแดง เนื้อละเอียดพอประมาณแข็งแรง เหนียว และทนทาน ไม้เนื้อแข็งมีปริมาณเซลลูโลส 40-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 24-40 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 18-25 เปอร์เซ็นต์ [5-7]

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Xylixylocarpa*

ชื่อวงศ์ : MIMOSAEAE

ชื่ออื่น : ไควกร้อมคว้าย จะลาน จาลาน ตะกร้อมไปรน์ผ้าน เพี้ย สะกรอม

ลักษณะทั่วไป : ไม้ผลัดใบ มีขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีลำต้นสูงถึง 25 เมตร เมื่อสับเปลือกทิ้งไว้จะได้ชั้นสีแดง ยอดอ่อนมีขนสีเหลืองปกคลุม เปลือกเรียบ สีเทาอมแดง ใบเป็นช่อแบบขนนก 2 ชั้น แต่ละช่อมีใบย่อย 4-5 คู่ ใบย่อยรูปไข่ หรือรูปไข่แกมรูปขอบขนาน ปลายใบแหลมมน ดอกเป็นช่อเรียงแน่นบนช่อกลมเดี่ยวๆ หรือแตกกิ่งก้านเป็นกลุ่มๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละช่อประมาณ 1.4 เซนติเมตร ก้านช่อดอกมีขนปกคลุมประปราย ดอกย่อยมีขนาดเล็กมี 5 กลีบ สีเหลืองอ่อน ผลเป็นฝักแบนรูปขอบขนาน เรียว และโค้งงอที่ส่วนปลายยาว 7-10 เซนติเมตร สีน้ำตาลอมเทา แข็งผิวเรียบ และไม่มีก้าน เมื่อฝักแก่จะแตกออกเป็น 2 ซีก ผนังของฝักที่แตกมักจะม้วนบิดงอ เมล็ดแบน มีจำนวนหลายเมล็ด

การกระจายและนิเวศวิทยา : พบในป่าเบญจพรรณ และป่าเต็งรังทั่วไป ถ้าขึ้นบนพื้นที่ดินลึกหรือดินค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ เช่น ป่าเบญจพรรณหรือพื้นที่ราบใกล้น้ำ มักจะมีลำต้นตรง

ประโยชน์ : เนื้อไม้ แข็ง หนัก มีความทนทานสูง เสื่อ และตกแต่งได้ยาก เหมาะสำหรับการก่อสร้างที่ต้องการความมั่นคงแข็งแรง เช่น เสาบ้าน คาน เสาสะพาน คันไถ สมอเรือ ฯลฯ [25]



รูปที่ 2.9 ไม้แดง [25]

## 2.10 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

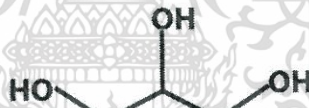
พลาสติไซเซอร์ ตามนิยาม IUPAC หมายถึง สารที่เข้าไปรวมกับพอลิเมอร์แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนต่อการใช้งาน และการยืดตัว สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่สำคัญคือ ต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์มโดยมีแรงระหว่างโมเลกุลทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรไม่มีสี กลิ่น รส และไม่ติดไฟ พลาสติไซเซอร์อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ระเหยได้ยาก สามารถผสมรวมตัวเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี โดยจะแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง สายโซ่พอลิเมอร์จึงเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

2. พลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ [23]

### 2.10.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (Glycerin) มีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีรสหวานเล็กน้อย กลีเซอรอล เป็นสารจำพวกพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรโมเลกุล คือ  $C_3H_8O_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล และมีชื่อทางเคมี คือ 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanenol) จากภาพโครงสร้างของกลีเซอรอล ดังรูป พบว่ากลีเซอรอลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่ง 2 หมู่เป็นไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่ [26]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกลีเซอรอล [26]

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีกลีเซอรอล [26]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรทางเคมี	$C_3H_8O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะและสี	ของเหลว ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9°C
จุดเดือด	290°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของกลีเซอรอล พบว่ากลีเซอรอลละลายได้ดีทั้งในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้งฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออลเอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิก ไดเอทิล เป็นต้น ดังนั้นการที่กลีเซอรอลละลายได้ในสารหลายประเภท จึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอาง เป็นต้น

## 2.11 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่น หมายถึง สารหรือวัสดุที่ใช้การหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมักอยู่ในลักษณะของของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี เป็นต้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารหล่อลื่นภายนอก (External Lubricants) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อลดความฝืดระหว่างผิวของพลาสติกกับผิวของโลหะ หรือวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร และแม่พิมพ์

2. สารหล่อลื่นภายใน (Internal Lubricants) เป็นสารที่ช่วยลดความฝืดภายในเนื้อพลาสติก นั่นคือ เป็นตัวช่วยลดความฝืดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์

สารหล่อลื่นบางชนิดมีคุณสมบัติอื่นอยู่ด้วย เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้พลาสติก หรือพลาสติกไฮเซอไรต์ได้ด้วย [23]

### 2.11.1 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate)

แมกนีเซียมสเตียเรท หรือเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) มีลักษณะเป็นผงสีขาว และเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรทางเคมี คือ  $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$  ซึ่งเป็นเกลือของกรดสเตียริก (Stearic acid) กับแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) แมกนีเซียมสเตียเรทมีจุดหลอมเหลวที่ 120 องศาเซลเซียส ไม่ละลายในน้ำ [27]

ประโยชน์ด้านต่างๆ มีดังนี้

1. ทางเภสัชกรรม ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในยาเม็ดที่ผ่านการอัด

2. ทางผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในเครื่องสำอาง

3. ทางอาหาร ทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อม หรือสารปลดปล่อยสีในอาหาร

## 2.12 การผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)

เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายในประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกอล์ฟจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ โดยใช้ น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ไม่มีการสูญเสียวัสดุ หรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาด และความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมลักษณะนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก [28]



รูปที่ 2.11 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [28]

## 2.13 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression mold)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และเครื่องจักรที่ใช้มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (Platen) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่นขึ้นกับการออกแบบ แผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัด และส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจักรสามารถตั้งอุณหภูมิ และควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิตได้ ส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (Cavity) สำหรับใส่วัสดุที่ต้องการขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับ สลัก (Pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วยล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ วัสดุจะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ และความร้อนจากแม่พิมพ์ส่งผลให้วัสดุเกิดการคงรูป [29]



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน [29]

## 2.14 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

### 2.14.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้ในการคำนวณหาหน้าหนักแห้ง สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

$C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้น ร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = C_d/C_i \times 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

#### 2.14.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไป ทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งในปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน [3]

#### 2.14.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

##### ก. การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้างนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ เมื่อนำมาล้าง และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

##### ข. การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งทิ้งไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไป และมีขนาดเล็กกลวง เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยัง พบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่า แป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือนมาตรวจสอบปริมาณไนโตรเจน พบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือ จุลินทรีย์เจริญเติบโต และสร้างโคโลนีบนพอลิเมอร์ จากนั้นย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

#### 2.14.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

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

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแ่งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้จุลินทรีย์ย่อยสลายแ่งจะเกิดรูที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด [3]

#### 2.14.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

2.14.5.1 การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่า ในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย ลักษณะอัสสัมฐานของพอลิเมอร์ลดลง โดยส่วนอัสสัมฐานจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก

2.14.5.2 การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่าย และรวดเร็ว ใช้การศึกษาการย่อยสลายแ่งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแ่ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแ่งก่อน และหลังการย่อยสลาย

#### 2.14.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลายๆ ตัวอย่าง ฝังลงในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ [1]

#### 2.14.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

วิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กัน โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer หรือ XRD

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law คือ  $2d\sin\theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยใช้เครื่องตรวจจับรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ผลการวิเคราะห์ของ XRD สามารถหาค่าประกอบของตัวอย่าง ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง [3]

## 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**2.15.1** **ปรารณา คำใส และคณะ** ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้มะค่า (Ormosia) ซึ่งซีลี้อยที่ศึกษามีขนาดมากกว่า 50 เมช ขนาด 50-100 เมช และขนาดน้อยกว่า 100 เมช และในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression molding) พบว่าการเพิ่มปริมาณซีลี้อยลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง โดยเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยที่มีขนาดน้อยกว่า 100 เมช และมีปริมาณซีลี้อย 20% มีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยที่สุด สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีขนาดของอนุภาคซีลี้อยลดลง และมีปริมาณของซีลี้อยเพิ่มขึ้น โดยเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยที่มีขนาดน้อยกว่า 100 เมช และมีปริมาณซีลี้อย 20% มีค่าแรงดึง ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกดสูงที่สุดสำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย และจากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยเกิดการย่อยสลายเร็วที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยขนาดน้อยกว่า 100 เมช และมีปริมาณ 20% ย่อยสลายได้ช้าที่สุด [3]

**2.15.2** **Prachayawarakorn J. และ Areeya H.** ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแอซิเทตจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้สะเดา (Neem) ซึ่งศึกษาซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 50 เมช 50-100 เมช 100-200 เมช และมากกว่า 200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression molding) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณหรือลดขนาดอนุภาคของซีลี้อย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของซีลี้อย และจากสัณฐานวิทยา พบว่าซีลี้อยที่ใส่ลงไปมีการกระจายตัว และมีความเข้ากันได้ดีในเมทริกซ์ของแป้ง นอกจากนี้การเติมซีลี้อยลงไปเป็นผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลทั้งสองชนิดมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น และมีสมบัติเชิงกลหลังการฝังดินมีแนวโน้มสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย [9]

**2.15.3** **Curvelo A. A. S. และคณะ** งานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยเซลลูโลสจากเยื่อกระดาษเป็น ส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สามารถเตรียมได้จากแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยฟอกขาวขนาดสั้น (16%w/w) เส้นใยที่ใส่ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากการศึกษานี้พบว่าคอมพอสิตที่ได้แสดงถึงการเพิ่มขึ้น 100% ของความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมากกว่า 50% ของโมดูลัส (Modulus) ส่วนอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีค่า  $T_g$  น้อยกว่าคอมพอสิตที่ผสมเส้นใย 16% สำหรับ TGA ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เกิดการหายไปของน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และคอมพอสิตเท่ากับ 30 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสดูดซับน้ำได้น้อยกว่าสตาโรล ส่วนการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์นั้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีความว่องไวต่อน้ำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การวิเคราะห์พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ตีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ [30]

**2.15.4 Kaushik A. และคณะ** ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนที่ผลิต โดยการสกัดฟางข้าวสาลีด้วยแรงดันไอน้ำ (Steam explosion) โดยเริ่มจากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนจากฟางข้าวสาลีโดยใช้แรงดันไอน้ำ จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดไฮโดรคลอริก และการใช้แรงเชิงกล เส้นใยขนาดนาโนถูกทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ โดยใช้เครื่องผสมแรงเฉือนสูง (High shear mixer) เพื่อกำหนดอัตราส่วนการเติมเส้นใย และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานออกมาในรูปของฟิล์มหล่อ (Cast film) เมื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่างๆ ของเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโน และฟิล์มนาโนคอมพอสิต พบว่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย และสมบัติในการต้านการซึมผ่านของน้ำดีขึ้น เมื่อมีการเติมเส้นใยลงไป 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อมีการเติมเส้นใยที่มากเกินไป ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเส้นใยเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดการกระจายตัวไม่ดี ซึ่งตรวจสอบได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยา นอกจากนี้การศึกษาศสมบัติทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น [31]

**2.15.5 Guimaraes J. L. และคณะ** งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิต และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบจากแป้งข้าวโพดที่ใช้เส้นใยกล้วย และเส้นใยอ้อยเป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้กลีเซอรอลทางการค้า (Commercial glycerol) และกลีเซอรินดิบ (Crude glycerin) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression molding) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กลีเซอรินดิบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นไบโอดีเซลแทนกลีเซอรอลทางการค้า พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผสมเส้นใยต่างชนิดกัน ในอัตราส่วนของแป้ง : พลาสติกไซเซอร์ : เส้นใย ชนิดของพลาสติกไซเซอร์ และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน จากการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) พบว่าแป้งข้าวโพดมีลักษณะผลึกแบบชนิด A (A-type) และพบว่าวัสดุประกอบมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ประมาณ 20-25% สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่มีอัตราส่วนของเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) ลดลง แต่มอดุลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนเส้นใยสูงสุดไม่เกิน 25% การใช้กลีเซอรินดิบเป็น พลาสติกไซเซอร์เปรียบเทียบกับกลีเซอรอล พบว่าสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากกลีเซอรินดิบเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างเส้นใยกับแป้งได้ดี นอกจากนี้พบว่าเส้นใยอ้อยให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยกล้วย จึงสรุปได้ว่าการทำวัสดุประกอบจากแป้งข้าวโพดนั้นสามารถใช้กลีเซอรินดิบแทนกลีเซอรอลได้ และให้สมบัติเชิงกลดีกว่า รวมทั้งเส้นใยอ้อยให้การเสริมแรงดีกว่าเส้นใยกล้วย ซึ่งไม่ควรใช้อัตราส่วนของเส้นใยเกิน 25% เพื่อคงความเหนียวของวัสดุไว้ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.15.6 Pachana K. และคณะ** การปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดมาจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิล ในอัตราส่วน 0 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression molding) เมื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเสริมแรง ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และภาพที่ได้จาก SEM แสดงถึงการยึดติดกันอย่างดีระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเซลลูโลส [33]

**2.15.7 Hwansanoet W.** ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่เสริมแรงด้วยเส้นใยในลอน เส้นใยพอลิเอสเทอร์ เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล และเส้นใยไหม จากการทดสอบสมบัติ พบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยที่เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และความสามารถในการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย จากผลการทดสอบ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายมีสมบัติโดยรวมดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดอื่น [34]

**2.15.8 Bettini S. H. P. และคณะ** ศึกษาสมบัติของคอมพอสิตจากพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยจากสน (Pine) โดยใช้พอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม (PP-g-MA) และใช้กรดไขมันชนิดดัดแปรเป็นสารหล่อลื่น ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากการศึกษาสมบัติ พบว่าคอมพอสิตพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยที่ไม่มีการเติม สารช่วยผสม และสารหล่อลื่นมีสมบัติเชิงกลลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยที่มีการเติมสารช่วยผสม และสารหล่อลื่นเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิพรอพิลีนและขี้เลื่อยไม่ดี เนื่องจากพอลิพรอพิลีนไม่มีขั้ว แต่ขี้เลื่อยมีขั้ว ทำให้การยึดติดกันระหว่างวัสดุทั้งสองไม่ดี นอกจากนี้การที่ค่าความแข็งแรงดึงลดลง อาจเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารช่วยผสม และสารหล่อลื่น ส่งผลให้สารทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพลดลง [35]

**2.15.9 Balakrishnan P. และคณะ** ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันฝรั่งเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนจากสับปะรดปริมาณ 0 1 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปขึ้นงานในรูปแผ่นฟิล์มขนาด 80 ไมโครเมตร ด้วยเทคนิคการเทหล่อ (Solution casting) จากการศึกษาสมบัติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) มีค่าลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis; DMA) พบว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรง และองศาของการเกี่ยวพัน (Degree of Entanglement) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสขนาดนาโนเพิ่มขึ้น แต่เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันฝรั่งเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนจากสับปะรดที่ปริมาณ 4% มีองค์การเกี่ยวพันลดลง เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของเส้นใย (Aggregation) สรุปได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันฝรั่งเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนจากสับปะรดที่ปริมาณ 3% ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด [36]

**2.15.10 Castillo L. และคณะ** ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และทัลคัม (Talc) เป็นสารตัวเติม ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นฟิล์มจากเทคนิคการกดอัด (Compression molding) มีอัตราส่วนในการใส่สารตัวเติม คือ 0 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง ผลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเติมทัลคัม เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ SEM พบว่าฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวเรียบ แต่ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เติมทัลคัมมีภาพตัดขวาง (Cross-section) ที่ไม่สม่ำเสมอแตกต่างจากฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเติมทัลคัม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณทัลคัมเป็นการเพิ่มวิภาคของส่วนแข็ง ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ยาก และอุณหภูมิคลายตัว (Relaxation temperature) มีค่าสูงขึ้น สำหรับภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงถึงการยึดติดกันอย่างดีระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติม เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเกิดอันตรกิริยากับ Si-OH ของทัลคัม และจากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วง 200-700 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเติมทัลคัมมีการดูดกลืนแสงในช่วง 270-300 นาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัมสูงกว่า 3% สามารถลดการดูดกลืนแสงได้ เนื่องจากสารตัวเติมปิดกั้นการส่องผ่านของแสงทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะทึบแสง จึงสรุปได้ว่า ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเติมทัลคัมสูงกว่า 3% เป็นการเพิ่มส่วนแข็งทำให้ฟิล์มมีสมบัติที่ดีขึ้น และลดการดูดกลืนแสงได้ [37]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งข้าวโพด (Corn starch) ตรา กระต่าย ผลิตโดย บริษัท คิงส์ มิลลิ่ง จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งข้าวโพด [1]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
อะไมโลส	28.0
อะไมโลเพคติน	72.0
โปรตีน	10.0
ไขมัน	4.4
เส้นใย	2.2
เถ้า	1.2

3.1.2 ซึ่เลื่อยไม้สัก และไม้แดง จากอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี

3.1.3 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดทางการค้า จากบริษัท Lab System

3.1.4 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) จากบริษัท รวมเคมี

3.1.5 น้ำมันซิลิโคน จากบริษัท Dow Corning Corporation

## 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Banbender รุ่น PL 2000/PL 2001

3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) : บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLP 20 AT

3.2.3 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing Machine; UTM) : บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) : FEI รุ่น QUANTA 250

3.2.5 เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT

3.2.6 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transfer Infrared Spectrophotometer; FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FT-IR spectrum GX

3.2.7 เครื่องบดละเอียด : Retsch รุ่น ZM 100

3.2.8 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ : CEAST รุ่น 6052

3.2.9 เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (g) : Precisa Instrument

3.2.10 ตู้อบ

3.2.11 เครื่องร่อนแยกขนาด

3.2.12 ตะแกรงร่อนขนาด 100 และ 200 เมช

3.2.13 แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร

3.2.14 ถังมือกันความร้อน

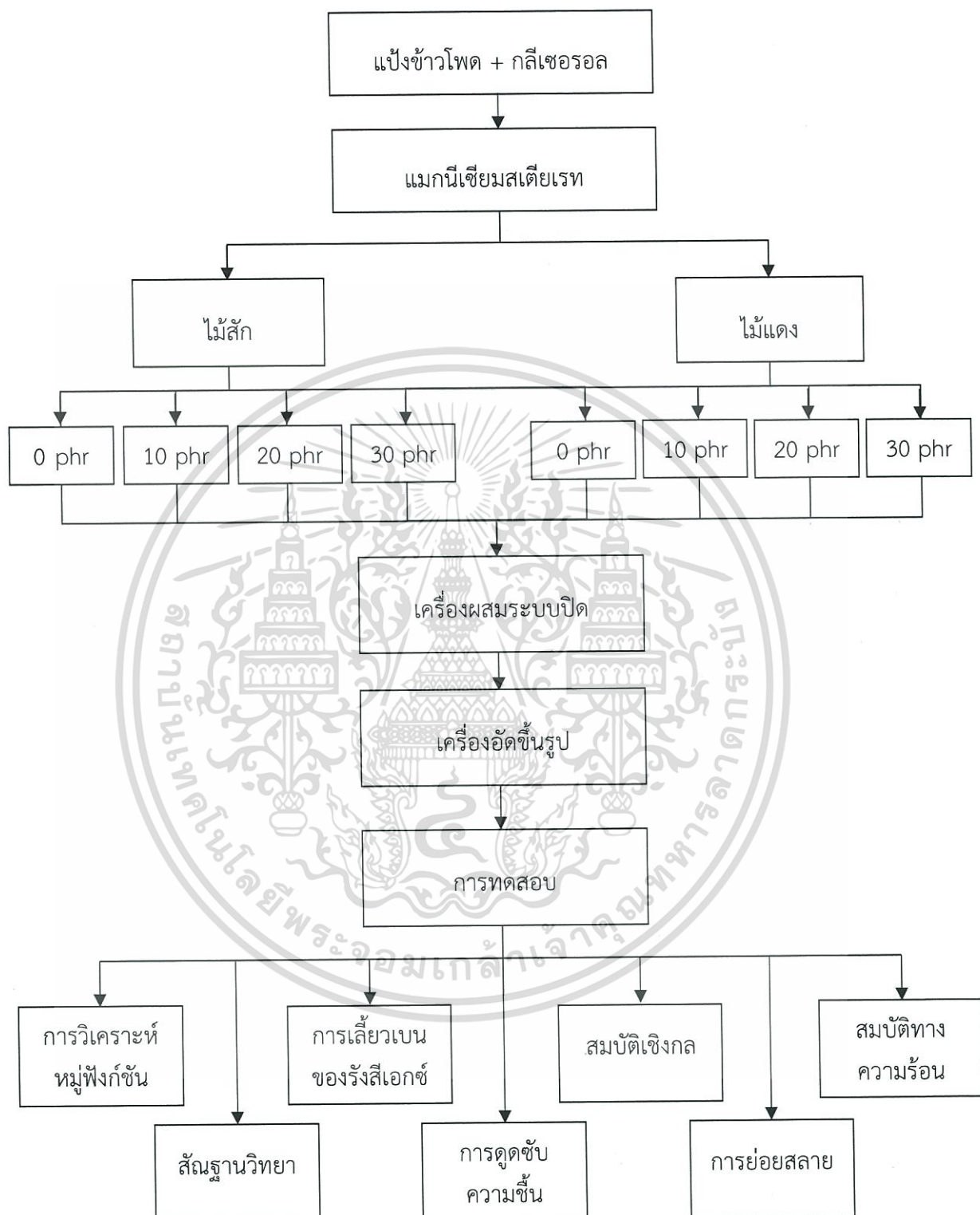
3.2.15 กล้องปิดสนิท

3.2.16 แผ่นใสถ่ายเอกสาร

3.2.17 ไมโครมิเตอร์

3.2.18 ถังชิปล๊อค

แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัยในโครงการพิเศษ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมซีลื้อย

1. นำซีลื้อยไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำซีลื้อยไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด และผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 และ 200 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 0.150-0.075 มิลลิเมตร ตามลำดับ
3. นำซีลื้อยที่ผ่านการแยกขนาดแล้วเก็บในถุงซิปล็อคเตรียมทำการผสมต่อไป

#### 3.3.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด

1. นำแป้งข้าวโพดหมักกับกลีเซอรอล เพื่อให้กลีเซอรอลซึมลงไปเนื้อแป้งเป็นเวลา 1 คืน โดยใช้ปริมาณแป้งข้าวโพดต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วน 60 : 40
2. นำส่วนผสมที่เตรียมได้มาชั่ง 50 กรัม นำมาผสมกับแมกนีเซียมสเตียเรท 2 phr
3. ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
4. ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้ววางแผ่นใส และทาน้ำมันซิลิโคนลงบนแผ่นใสด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ
5. วางเทอร์โมพลาสติกสตาโรซลงบนแม่พิมพ์ ประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากนั้นนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi จากนั้นหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
6. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.3.3 การปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยซีลื้อย

1. นำแป้งข้าวโพดหมักกับกลีเซอรอล เพื่อให้กลีเซอรอลซึมลงไปเนื้อแป้งเป็นเวลา 1 คืน โดยใช้ปริมาณแป้งข้าวโพดต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วน 60 : 40
2. นำส่วนผสมที่เตรียมได้มาชั่ง 50 กรัม นำมาผสมกับแมกนีเซียมสเตียเรท 2 phr
3. จากนั้นนำซีลื้อยที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 มาผสมในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งข้าวโพด กลีเซอรอล แมกนีเซียมสเตียเรท และซีลี้อยู่ที่ใช้ในการเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้งข้าวโพด (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	แมกนีเซียมสเตียเรท (กรัม)	ซีลี้อยู่ (กรัม)	
			SS	HS
60	40	2	-	-
60	40	2	10	-
60	40	2	20	-
60	40	2	30	-
60	40	2	-	10
60	40	2	-	20
60	40	2	-	30

4. วางคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงบนแม่พิมพ์ จากนั้นประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi จากนั้นหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

5. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์ และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^{-4}$  kg/cm<sup>2</sup> นาน 2 นาที จากนั้นนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์เพื่อนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

### 3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกคอมพอลิฮิสตาร์ชที่เตรียมได้

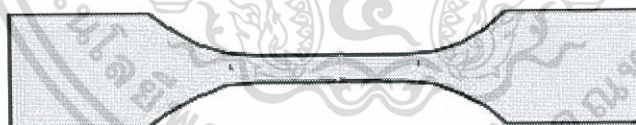
สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus)	ASTM D 638	MPa
ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์จำนวน 10 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์  $60 \pm 2$  เปอร์เซ็นต์ ตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 1 kN



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่ใช้ทดสอบ [38]

ค่าความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเค้น} = \frac{F}{A}$$

$$\text{ความเครียด} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\text{มอดุลัส} = \frac{F / A}{(L - L_0) / L_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )
	L	คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
	$L_0$	คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

### 3.4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานมาแช่ไนโตรเจนเหลว และหักชิ้นงานทันที จากนั้นนำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาภาคตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่างๆ เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคซีลี้อยู่ในแป้งข้าวโพด และรอยต่อระหว่างวัฏภาค นอกจากนี้ใช้ภาพถ่ายจาก SEM เพื่อหาค่าเฉลี่ยของ Aspect ratio (L/D ratio) ของซีลี้อยู่ทั้งสองชนิด

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis)

การศึกษาสมบัติทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer; TGA) โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 10–12 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50–600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.4.5 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส บันทึกรน้ำหนัก จากนั้นนำไปวางในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์ โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน

ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น

$W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ

$W_w$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

### 3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ฝังดินลึกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

### 3.4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆกัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมตัวอย่างที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร และขนาดของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ที่ใช้ในช่วง 5-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที โดยใช้  $\text{Cu-K}\alpha$  แล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้ช่วงเวลา (Step time) 5 นาที

เปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึก สามารถคำนวณได้จาก

$$X_{\text{cry}}(\%) = A_c / A_c + A_a \times 100$$

เมื่อ  $X_{\text{cry}}$  คือ เปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึก  
 $A_c$  คือ พื้นที่ใต้กราฟบริเวณที่เป็นผลึก  
 $A_a$  คือ พื้นที่ใต้กราฟบริเวณที่เป็นอสัณฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียม และศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์โพลิเอสเตอร์พลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด (TPCS) โดยการเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่โดยศึกษาชนิดซีลี้อยู่จากไม้เนื้ออ่อน (SS) ได้แก่ ไม้สัก และไม้เนื้อแข็ง (HS) ได้แก่ ไม้แดง โดยกำหนดอัตราส่วนของซีลี้อยู่ 0 10 20 และ 30 phr ขนาด 100-200 เมช โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 40 phr โดยน้ำหนัก ซึ่งมีลักษณะดีที่สุด (ตารางที่ 4.1) ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำคอมพอลิเมอร์โพลิเอสเตอร์พลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สันฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของ TPCS ที่เตรียมได้ให้ผลดังนี้

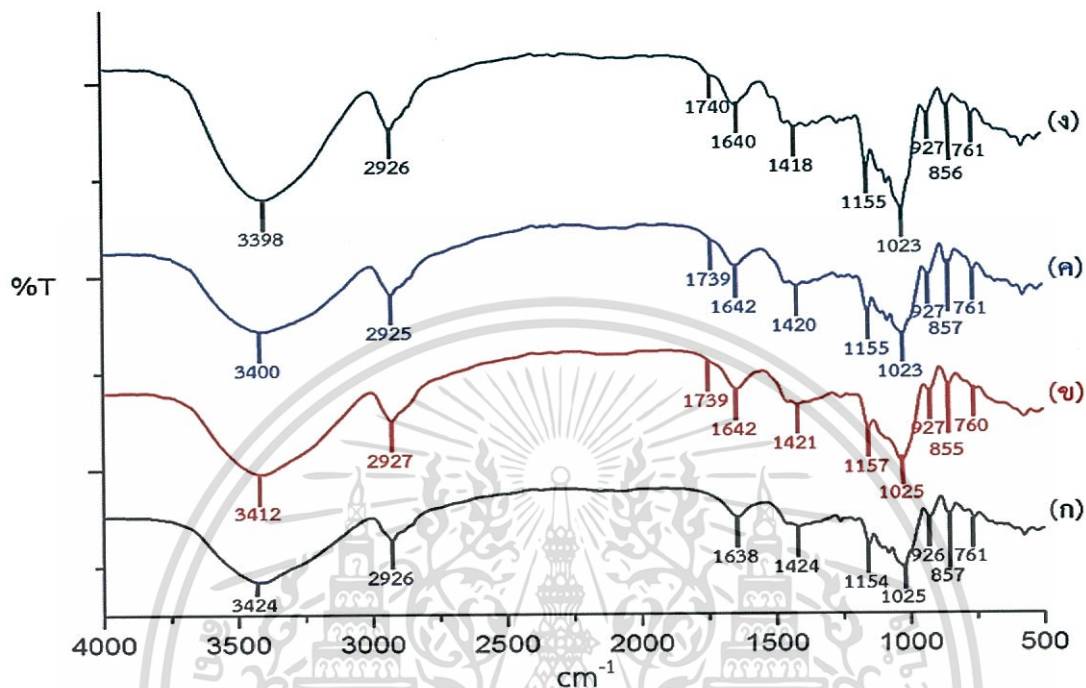
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองอัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอล

อัตราส่วน		ผลการทดลอง	
แป้งข้าวโพด (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	ก่อนอัดขึ้นรูป	หลังอัดขึ้นรูป
65	35	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	มีรอยแตก สีเหลืองเข้ม
60	40	เนื้อเดียวกัน	ไม่มีรอยแตก สีเหลืองอ่อน
55	45	เนื้อเดียวกัน	นิ่ม ไม่มีรอยแตก สีเหลืองอ่อน

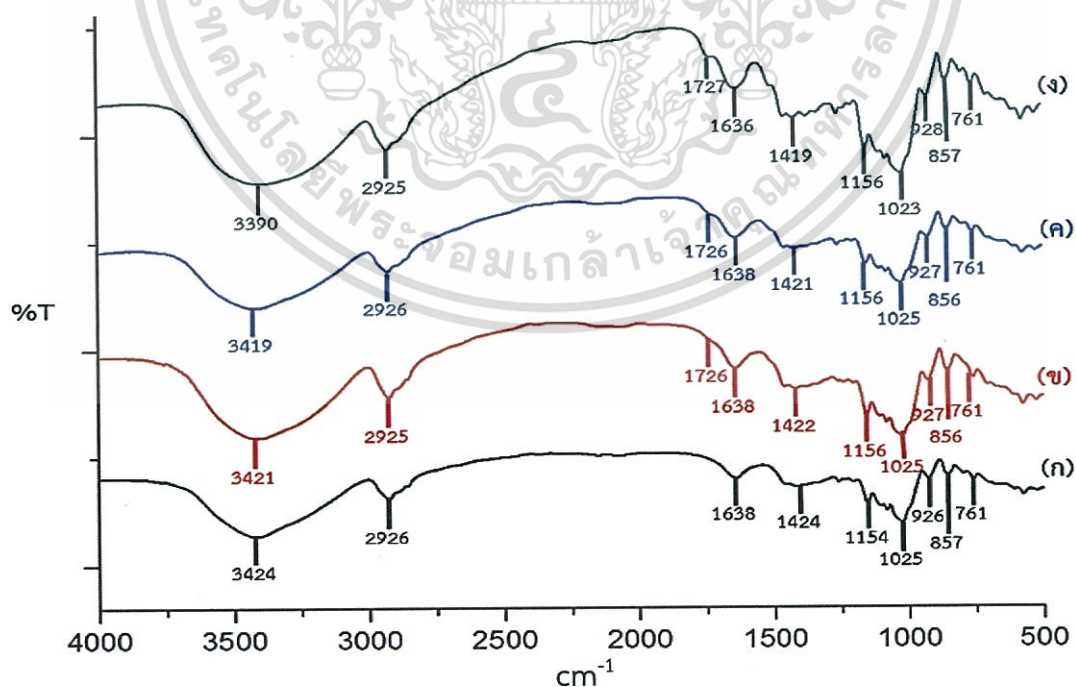
จากตารางที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลที่ 60 : 40 ขึ้นงานมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีรอยแตก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และให้ลักษณะโดยรวมดีที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แป้งข้าวโพดและกลีเซอรอลในอัตราส่วน 60 : 40

#### 4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของ TPCS โดยพิจารณาเปรียบเทียบส่วนเสริมแรง SS และ HS ในอัตราส่วน 0 10 20 และ 30 phr โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง FTIR แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ในปริมาณต่างๆ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 phr



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ในปริมาณต่างๆ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 และ (ง) 30 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

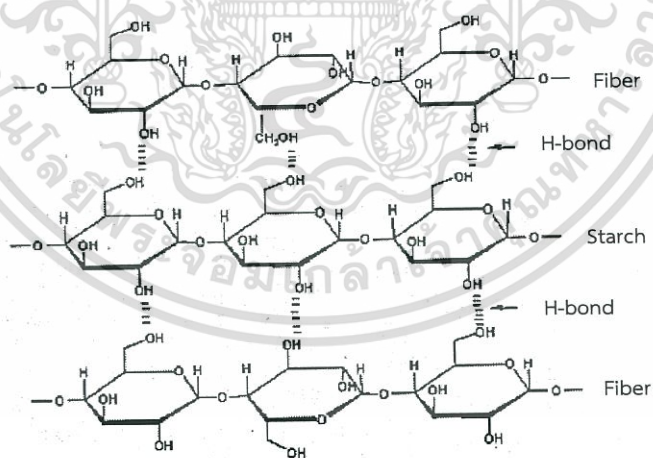
จากรูปที่ 4.1-4.2 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในอัตราส่วน 0 10 20 และ 30 phr ตามลำดับ โดยพีคในช่วง  $3600-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ O-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พีคในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  ของ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง พีคที่ประมาณ  $1740\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอสเทอร์ของโมเลกุลเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในอนุภาคซีลี้อย พีคที่ประมาณ  $1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ H-O-H stretching ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง พีคที่ประมาณ  $1420\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ O-H bending ของแป้ง พีคในช่วง  $1300-1000\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ C-O-C stretching ของแป้ง และพีคในช่วง  $1200-1000\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ C-O-H stretching ของแป้ง [40-41]

จากผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของ TPCS โดยพิจารณาเปรียบเทียบ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ที่มีชนิดและปริมาณที่ต่างกัน (รูปที่ 4.1-4.2) พบว่า

1. พีคในช่วง  $3600-3300\text{ cm}^{-1}$  และ  $1420\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending ในแป้งของ TPCS เมื่อผสมซีลี้อยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำให้พีคที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาทางเคมี โดยมีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้ง กลีเซอรอล และซีลี้อย [42]

2. พบพีคใหม่ที่ตำแหน่ง  $1740-1726\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอสเทอร์ของโมเลกุลเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในอนุภาคซีลี้อย [43]

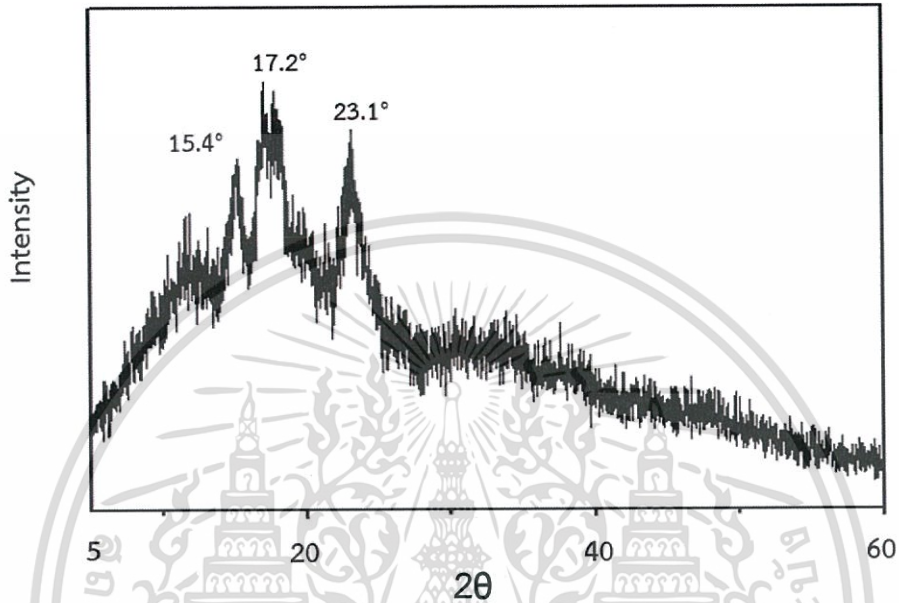
อันตรกิริยาที่คาดว่าเกิดขึ้นระหว่างแป้ง และเซลลูโลสที่มีในองค์ประกอบทางเคมีของซีลี้อย แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าเกิดขึ้นระหว่างแป้ง และซีลี้อย [9]

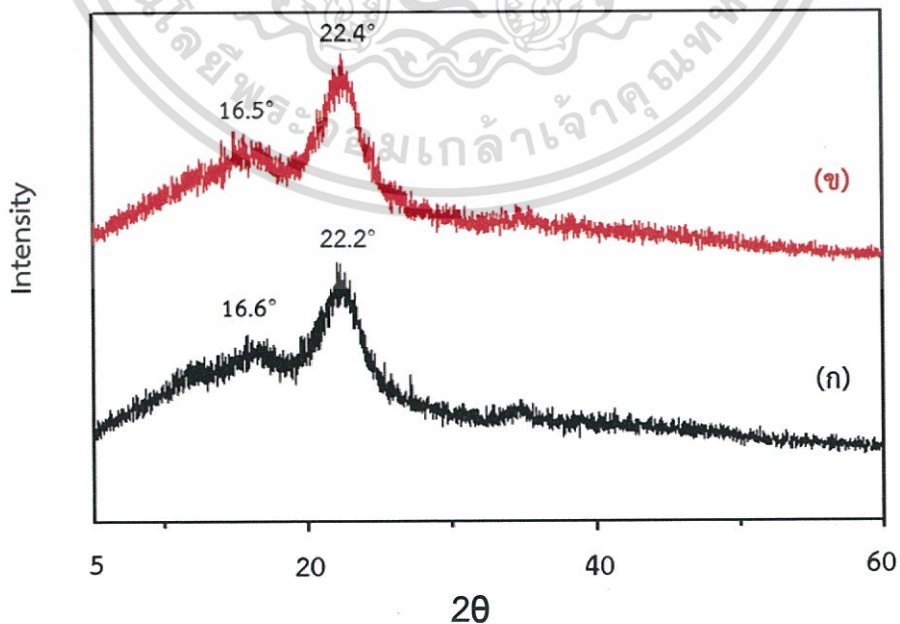
## 4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึกของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ขนาดของมุมตกกระทบในช่วง  $5-60^{\circ}$  ด้วยความเร็ว  $1^{\circ}/\text{นาที}$  ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟร็กโทแกรมของแป้งข้าวโพด

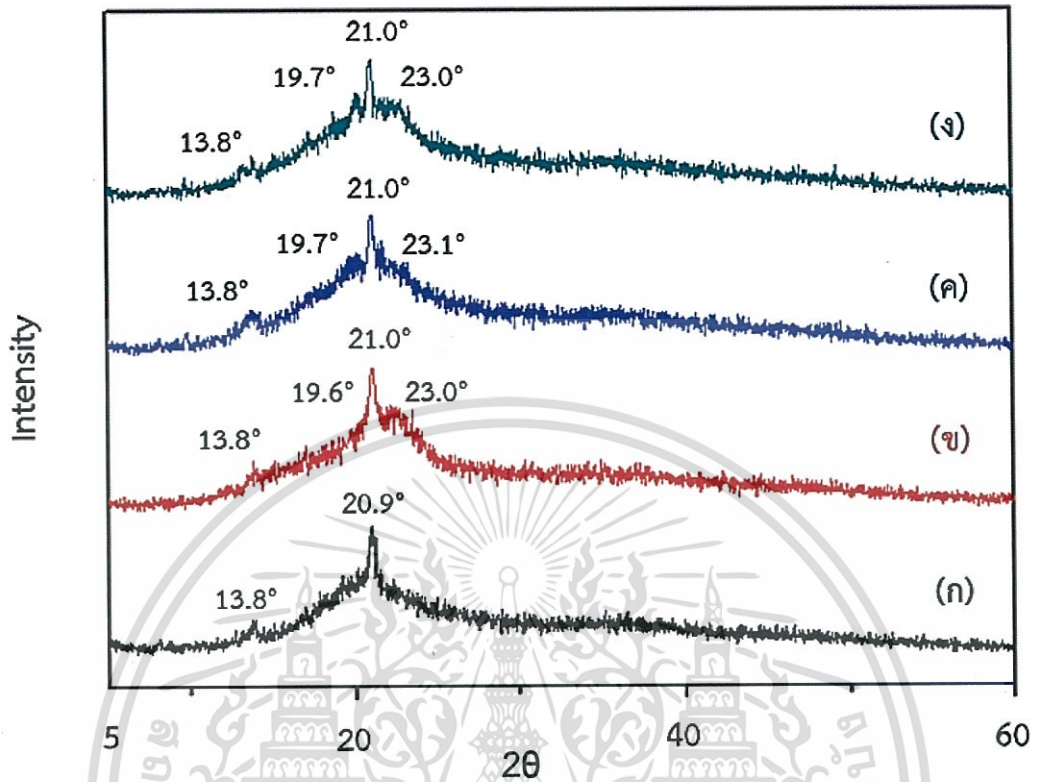
จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวโพด พบว่าโครงผลึกของแป้งข้าวโพดมีโครงสร้างผลึกแบบ A-type พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $15.4^{\circ}$   $17.2^{\circ}$  และ  $23.1^{\circ}$  ตามลำดับ [44]



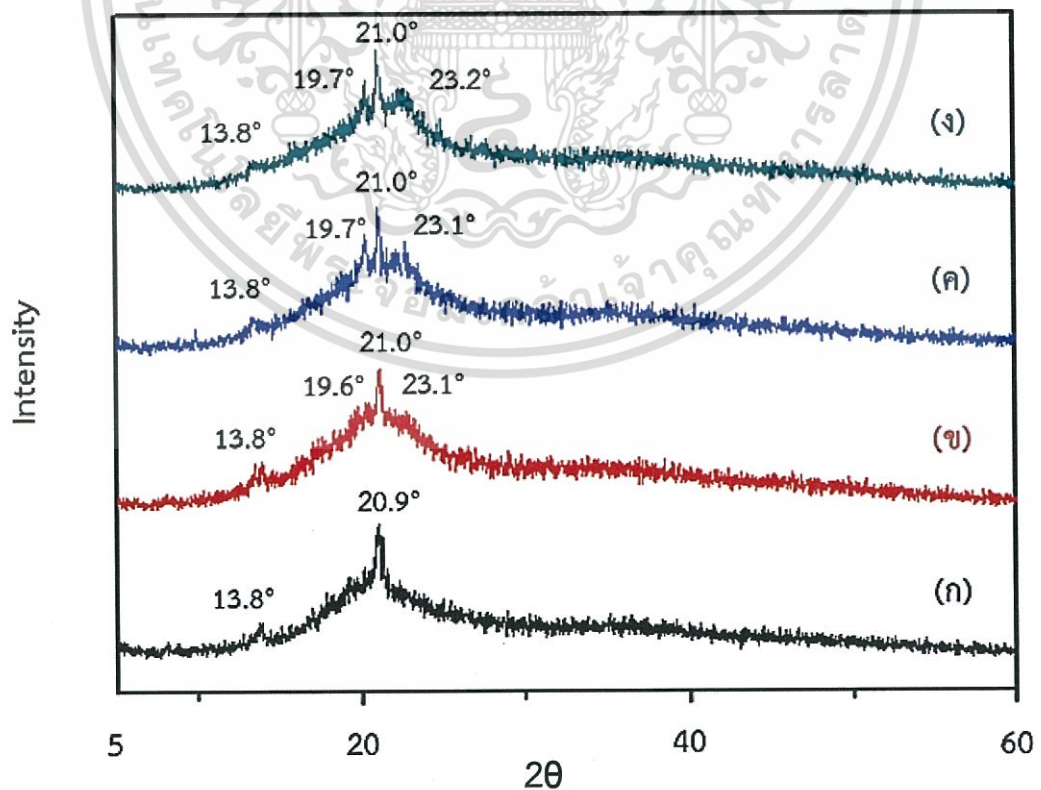
รูปที่ 4.5 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) SS และ (ข) HS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างของ SS และ HS พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $16.6^\circ$   $22.2^\circ$   $16.5^\circ$  และ  $22.4^\circ$  ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของ cellulose [45]



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS/10/SS (ค) TPCS/20/SS และ (ง) TPCS/30/SS



รูปที่ 4.7 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPCS (ข) TPCS/10/HS (ค) TPCS/20/HS และ (ง) TPCS/30/HS  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6-4.7 แสดงโครงสร้างผลึกของ TPCS พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $13.8^\circ$  และ  $20.9^\circ$  โดยพีคที่ทำมุม  $20.9^\circ$  มาจากองค์ประกอบของ TPCS ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ  $V_h$ -type ทั้งหมด ซึ่งเกิดจากการนำแป้งมาเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซออร์ เมื่อผ่านความร้อนและแรงเฉือน เพื่อขึ้นรูปเป็น TPCS ทำให้ผลึกของแป้งถูกทำลาย จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจาก A-type เป็น  $V_h$ -type และเมื่อทำการเติมซีลี้อย SS และ HS ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการซ้อนทับกันระหว่างโครงสร้างผลึก cellulose ของซีลี้อยกับโครงสร้างผลึกของ TPCS โดยที่โครงสร้างผลึก TPCS ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [8-9]

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของ TPCS เสริมแรงด้วยอนุภาคซีลี้อย

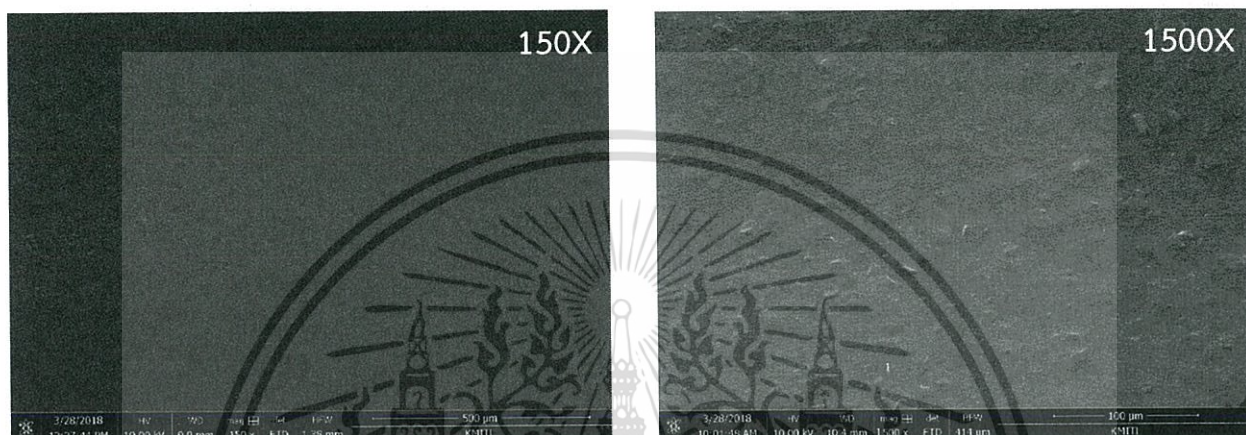
ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
TPCS	59.18
TPCS/10/SS	62.77
TPCS/20/SS	64.25
TPCS/30/SS	66.41
TPCS/10/HS	63.74
TPCS/20/HS	65.03
TPCS/30/HS	67.92

จากตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณผลึกของ TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อย SS และ HS ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีลี้อยมีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกมากกว่าแป้ง และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ชนิดของซีลี้อย พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS มีปริมาณผลึกมากกว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS เล็กน้อย เนื่องจาก HS มีปริมาณลิกนินที่น้อยกว่า SS (ตารางที่ 2.6)

และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของ TPCS ที่เสริมแรงด้วยซีลี้อย พบว่า TPCS/30/HS มีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ TPCS/30/SS, TPCS/20/HS, TPCS/20/SS, TPCS/10/HS, TPCS/10/SS และ TPCS ตามลำดับ

### 4.3 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีลี้อยในเมทริกซ์แป้งข้าวโพด โดยพิจารณาที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ขนาด 100-200 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับอนุภาคของ SS และ HS มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ  $1.67 \pm 0.49$  และ  $1.64 \pm 0.34$  ตามลำดับ (ภาคผนวก ค) ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของ TPCS (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.8 (ก)-(ข) ซึ่งแสดงภาคตัดขวางจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 150 และ 1500 เท่าของ TPCS โดยพบว่าที่กำลังขยาย 150 เท่า ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ แต่เมื่อใช้กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าพื้นผิวก่อนข้างเรียบและขรุขระเล็กน้อย แต่ไม่มีเม็ดแป้งที่ไม่หลอมเหลว



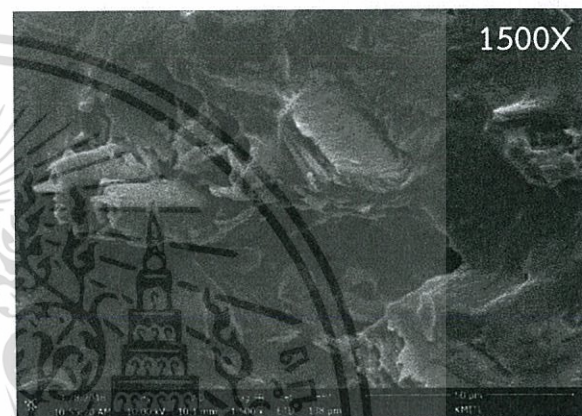
(ก) 10/SS



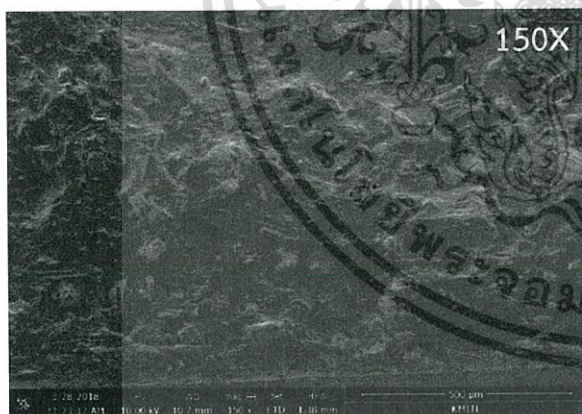
(ข) 10/SS



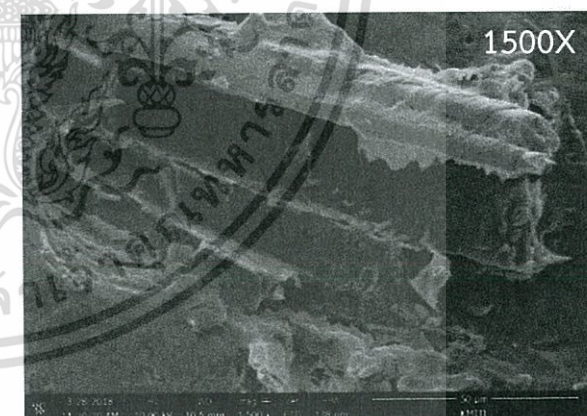
(ค) 20/SS



(ง) 20/SS



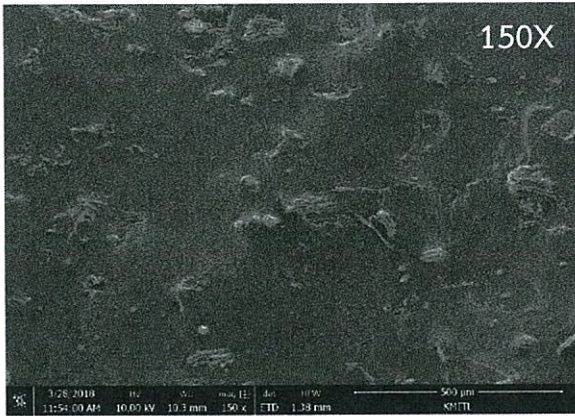
(จ) 30/SS



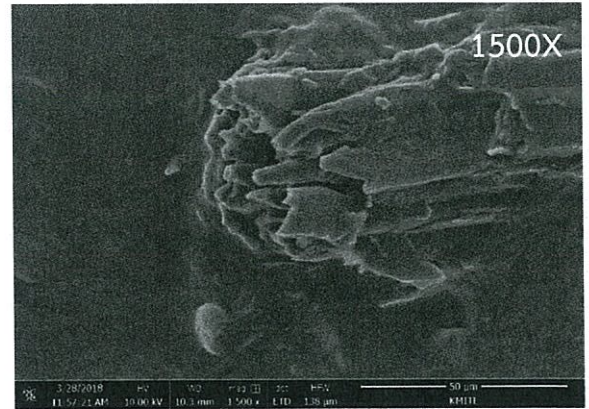
(ฉ) 30/SS

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่าง SS ขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10 (ค-ง) 20 (จ-ฉ) 30 phr ที่กำลังขยาย 150 และ 1500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



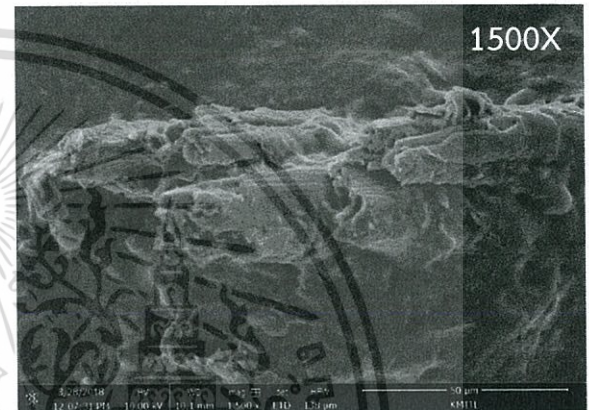
(ก) 10/HS



(ข) 10/HS



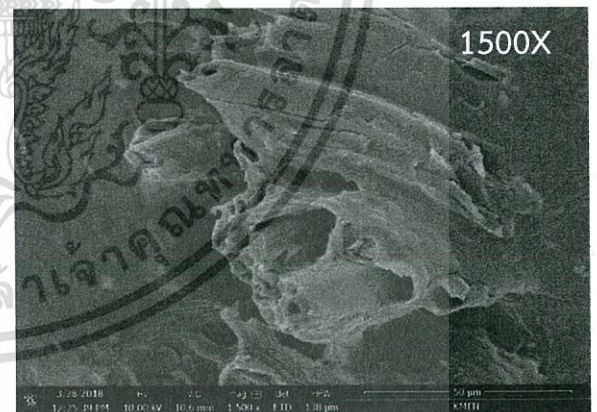
(ค) 20/HS



(ง) 20/HS



(จ) 30/HS



(ฉ) 30/HS

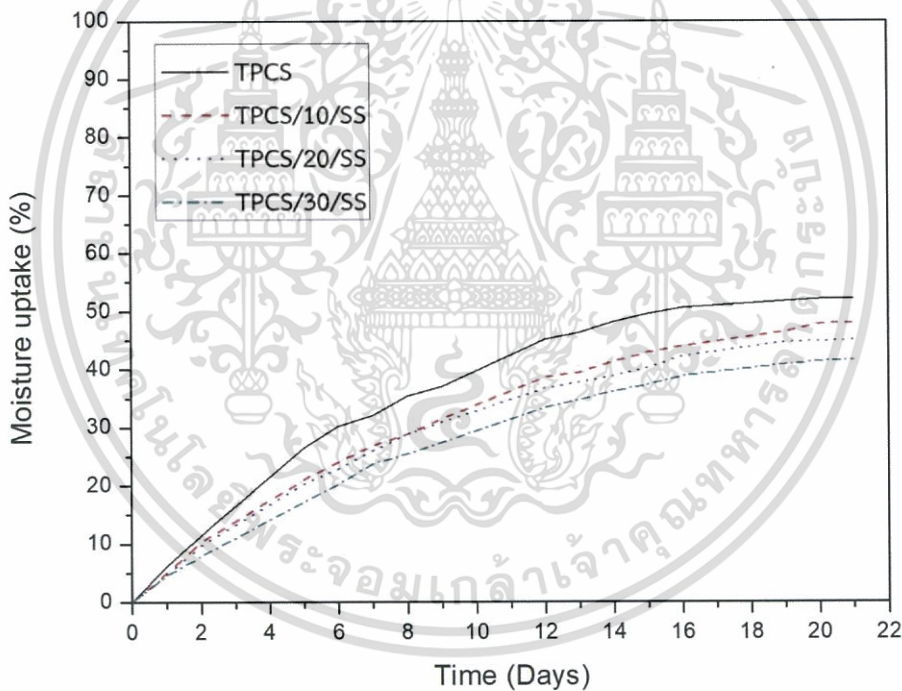
รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่าง HS ขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10 (ค-ง) 20 (จ-ฉ) 30 phr ที่กำลังขยาย 150 และ 1500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

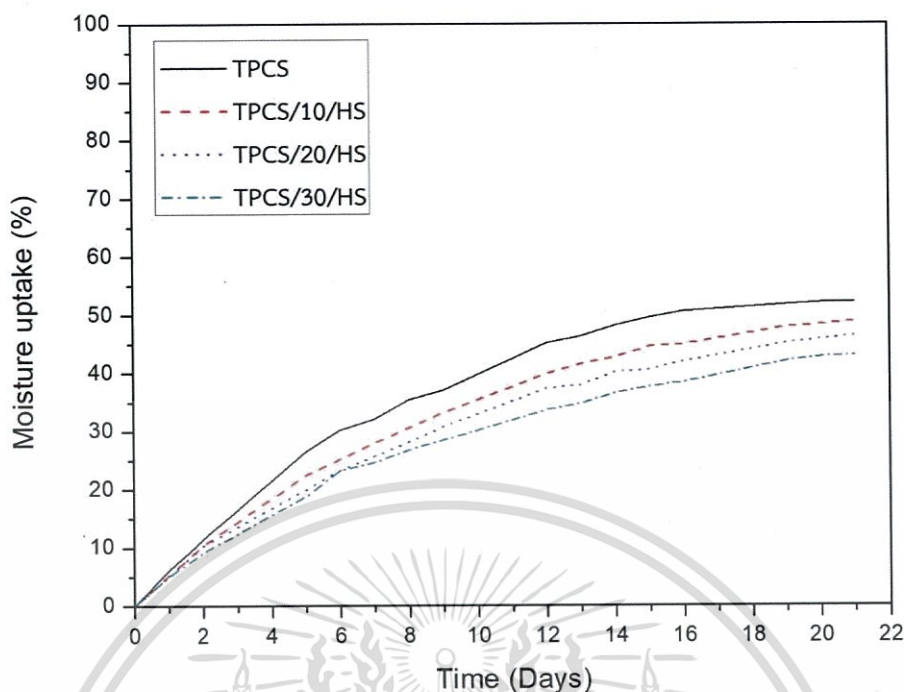
จากรูปที่ 4.9-4.10 ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยแสดงภาคตัดขวางของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีอียจาก SS และ HS ขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ เมื่อใช้กำลังขยาย 150 เท่า พบว่าซีลีอีย SS และ HS มีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แบ็ง และมีการฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแบ็งได้ เมื่อใช้กำลังขยาย 1500 เท่า สามารถมองเห็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ TPCS และซีลีอีย พบว่าซีลีอียมีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของ TPCS โดยสังเกตจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ไม่มีรอยแตก โดยพบว่าพื้นผิวของซีลีอียถูกปกคลุมด้วยวัฏภาคของแบ็ง (Surface wetting) เนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงความมีขั้วเหมือนกัน ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัฏภาค มีการยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น

#### 4.4 การดูดซับความชื้น

ผลของปริมาณซีลีอียจาก SS และ HS ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับความชื้นของ TPCS ที่อุณหภูมิ  $28 \pm 1$  °C ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$



รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr

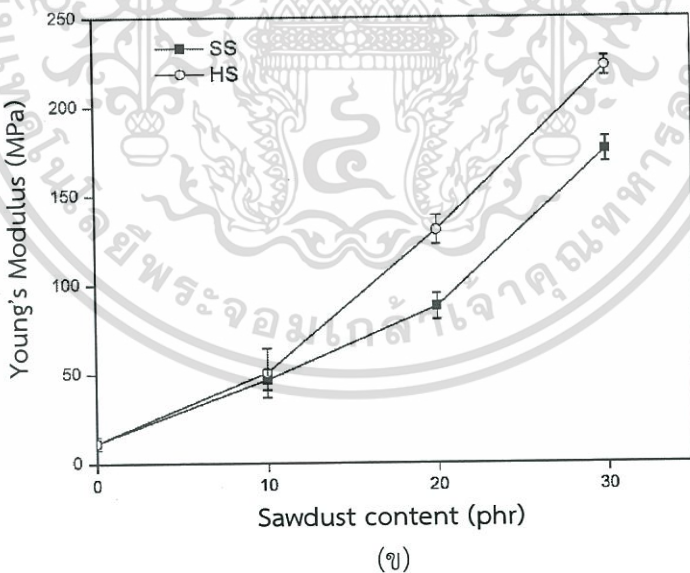
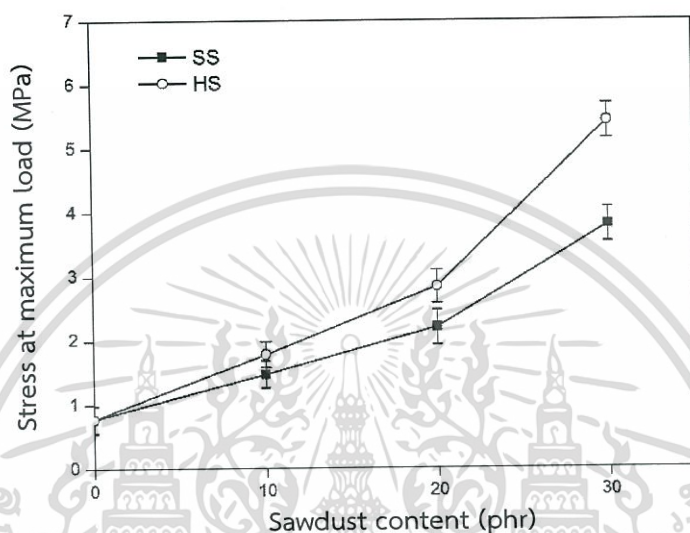
จากการทดสอบการดูดซับความชื้นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1\%$  ของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30 phr ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในทุกอัตราส่วนสามารถดูดซับความชื้นได้อย่างรวดเร็ว โดย TPCS ที่ไม่ได้ผสมด้วยซีลี้อยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นสูงสุด เนื่องจากโมเลกุลของแป้งข้าวโพดมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้ดูดซับความชื้นได้มาก และในช่วงหลังจาก 19 วันของการทดสอบ พบว่าการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มคงที่แล้วเริ่มมีราขึ้นที่ขึ้นงานในวันที่ 21 ของการทดสอบ สำหรับ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในทุกอัตราส่วนดูดซับความชื้นได้น้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของ TPCS นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลง จากการสร้างพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ลิกนินที่พบในอนุภาคของซีลี้อยมีความไม่มีขั้วมากกว่าแป้ง

จากผลการทดสอบของปริมาณซีลี้อยของ TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30 phr พบว่า สามารถดูดซับความชื้นได้น้อยลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแป้งข้าวโพดมีการดูดซับความชื้นมากกว่าซีลี้อย [46] และเมื่อเพิ่มปริมาณซีลี้อยมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง สรุปได้ว่า TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยที่ปริมาณ 30 phr มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด

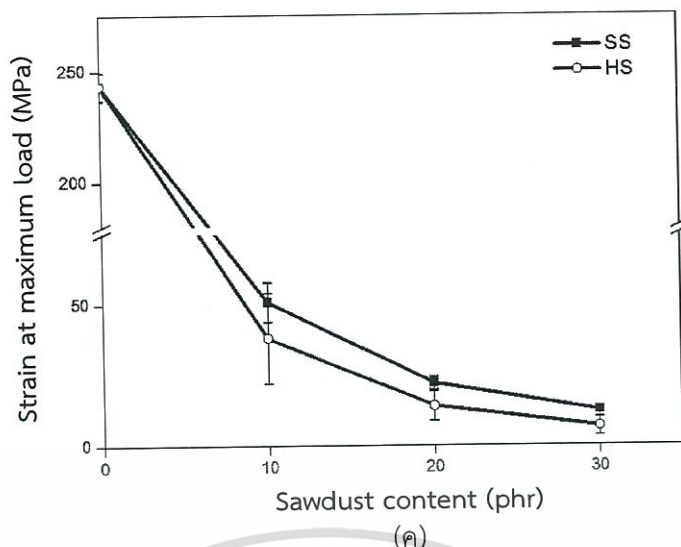
จากผลของชนิดซีลี้อย การทดสอบภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1\%$  ของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ตามลำดับ พบว่า SS มีความสามารถในการดูดซับความชื้นและให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่า HS เนื่องจาก SS มีปริมาณของลิกนินที่มากกว่า HS (ตารางที่ 2.6) ซึ่งทำให้มีความไม่มีขั้วมากกว่า HS [7]

#### 4.5 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด โดยพิจารณาจาก TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ซึ่งสัมพันธ์กับอนุภาคของ SS และ HS มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ  $1.67 \pm 0.49$  และ  $1.64 \pm 0.34$  ตามลำดับ (ภาคผนวก ค) โดยให้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ที่ปริมาณต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 4.13 (ก-ข) แสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr พบว่า ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณของขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้เลื่อยทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ TPCS สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งพีคที่ตำแหน่ง O-H stretching และ O-H bending มีการเลื่อนตำแหน่งไปยังเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.1-4.2) จากการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4.9-4.10) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัสดุขี้เลื่อยกับแป้ง นอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวโพดและขี้เลื่อย ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเป็นผลึกสูงขึ้น สอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD (รูปที่ 4.6-4.7) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Prachayawarakorn J. and Hanchana A. โดยพบว่า ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และความแข็งกดของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แอซิเทตจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณของขี้เลื่อยไม้สะเดา (Neem wood) เพิ่มขึ้น [9]

จากรูปที่ 4.13 (ค) แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด พบว่ามีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นเพราะมีขี้เลื่อยเข้าไปช่วยเสริมแรง ซึ่งสมบัติขององค์ประกอบภายในขี้เลื่อยมีความแข็ง และมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ จึงส่งผลให้ TPCS ที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยจาก SS และ HS มีความแข็งมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยึดตัวออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ TPCS ที่เสริมแรงด้วยซีลี้อย่าง SS และ HS พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS ให้ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงกว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS เนื่องจาก HS มีความเป็นผลึกมากกว่า SS โดยพิจารณาจากลิกนินใน HS ซึ่งเป็นส่วนอสัณฐานมีปริมาณน้อยกว่า SS (ตารางที่ 2.6) ส่งผลให้ TPCS เสริมแรงด้วย HS มีความแข็งมากกว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS

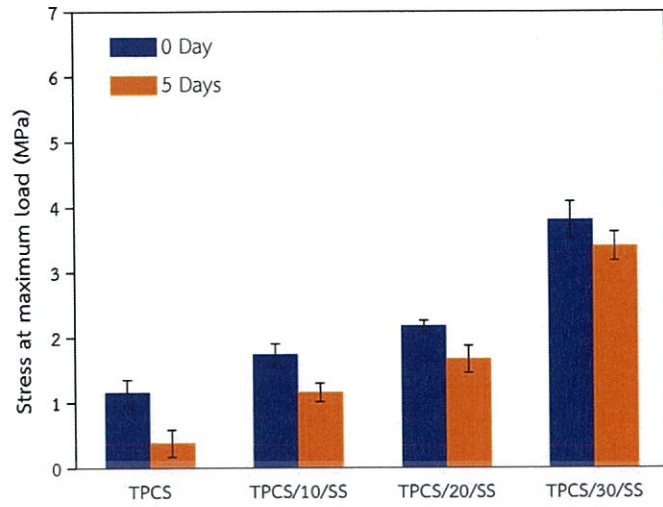
ดังนั้น สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อย่าง SS และ HS ในปริมาณที่ต่างกัน สรุปได้ว่า TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ในปริมาณ 30 phr มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยทำให้ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของ TPCS/30/HS มีค่าสูงสุด คือ 5.46 MPa และ 222.65 MPa ตามลำดับ

#### 4.6 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

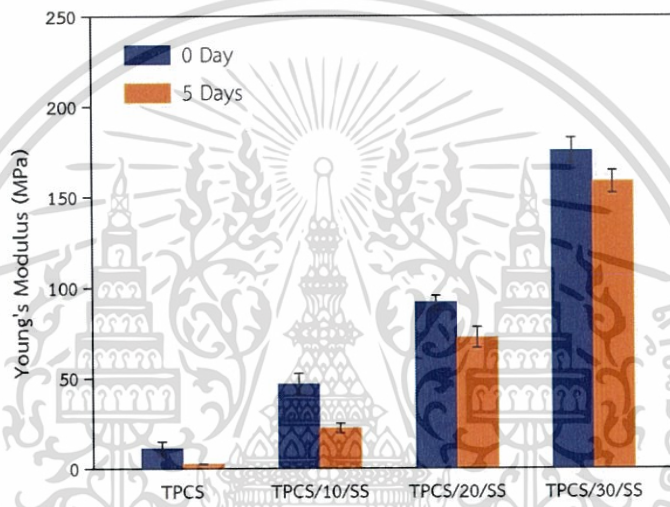
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยนำ TPCS สูตรต่างๆ มาฝังดินที่ความชื้น 5-10% โดยใช้ระยะเวลาในการฝังดิน 5 วัน แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด นำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงและไม่ได้เสริมแรงด้วย SS และ HS หลังฝังดิน พบว่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน (รูป 4.14-4.15) เนื่องจากชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานอ่อนและนิ่มตัว ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับชื้นในหัวข้อ 4.4 และงานวิจัยของ Prachayawarakorn J. and Hanchana A. นอกจากนี้ พบว่า TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยซีลีอามีสมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินต่ำที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวโพดว่องไวต่อความชื้นและสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าซีลีอ [9]

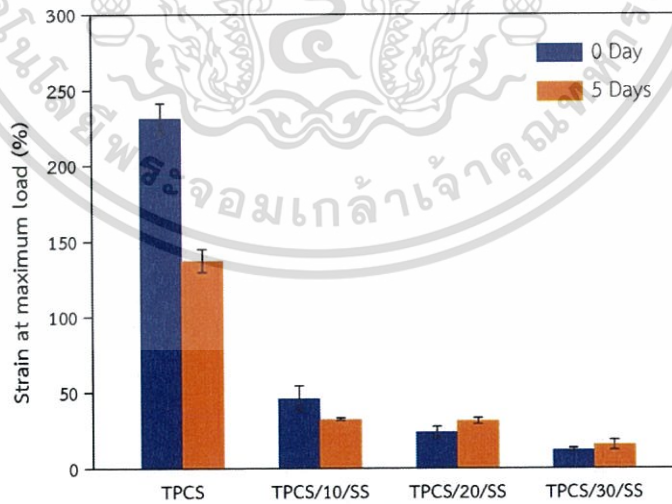
นอกจากนี้ยังพบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS มีแนวโน้มการย่อยสลายช้ากว่า HS โดยพิจารณาจากค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ที่ลดลงน้อยกว่า HS เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนฝังดิน (ตารางที่ 4.2) เนื่องจาก SS ประกอบด้วยลิกนินซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ในปริมาณที่มากกว่า HS (ตารางที่ 2.6) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS เสริมแรงด้วย HS



(ก)



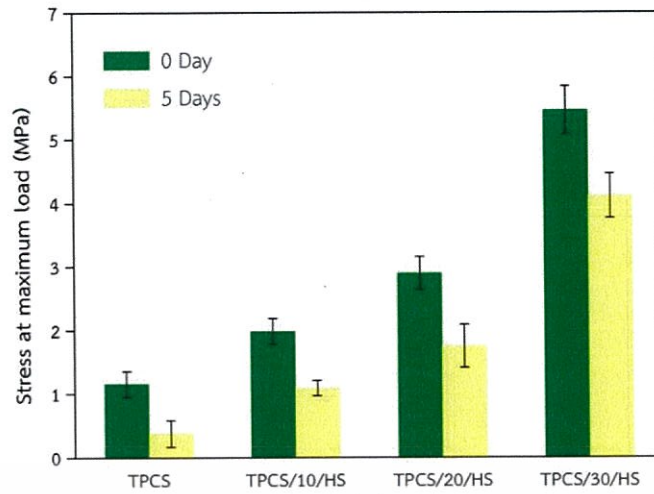
(ข)



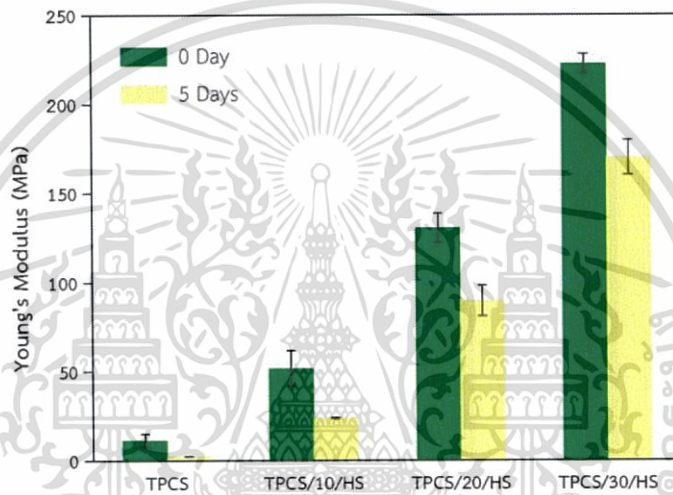
(ค)

รูปที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

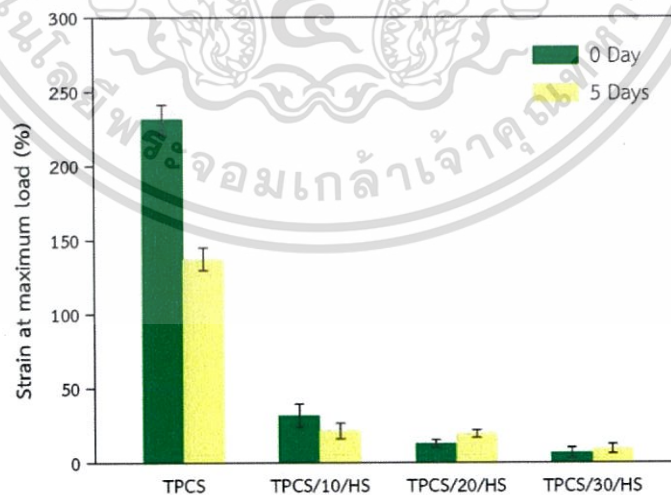
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย HS ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 0 10 20 และ 30 phr ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน

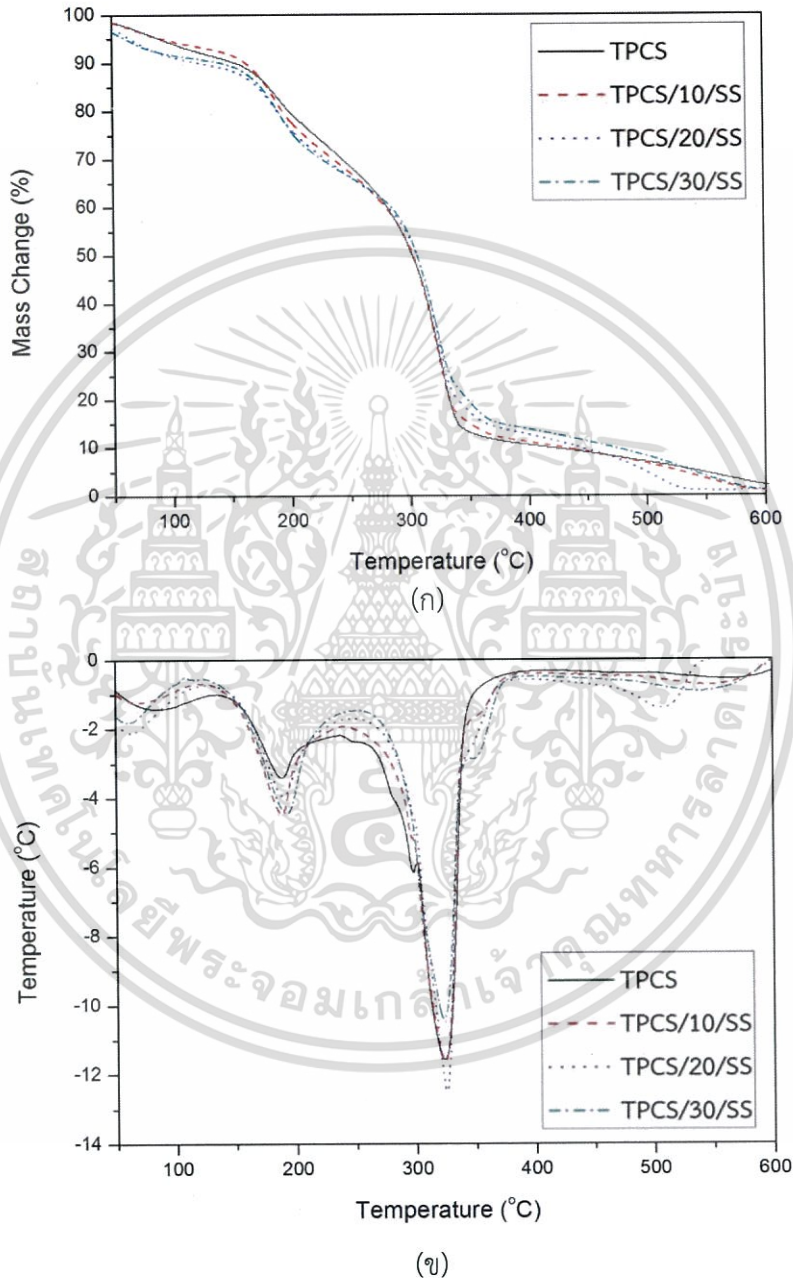
ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกลที่ลดลง (%)		
	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด
TPCS	67	79	41
TPCS/10/SS	33	52	30
TPCS/20/SS	23	21	31*
TPCS/30/SS	10	10	27*
TPCS/10/HS	45	54	33
TPCS/20/HS	40	31	54*
TPCS/30/HS	25	24	37*

หมายเหตุ \* หมายถึง มีค่าเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.3 พบว่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุดของ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงและเสริมแรงด้วยซีลี้อยมีค่าลดลง แต่ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุดของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณ 20 และ 30 phr มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะ TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยในปริมาณ 20 และ 30 phr มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้น้อยกว่า TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยในปริมาณ 0 และ 10 phr ดังนั้นชิ้นงานยังมีความคงตัวและมีความแข็งแรงก่อนเกิดการเสียหาย จึงถูกดึงยึดหลังฝังดินได้ดีกว่า TPCS เสริมแรงด้วยซีลี้อยในปริมาณ 0 และ 10 phr

#### 4.7 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน (Thermal properties ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature,  $T_d$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (% Weight loss) ของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyser, TGA) ได้ผลการทดลองดังนี้

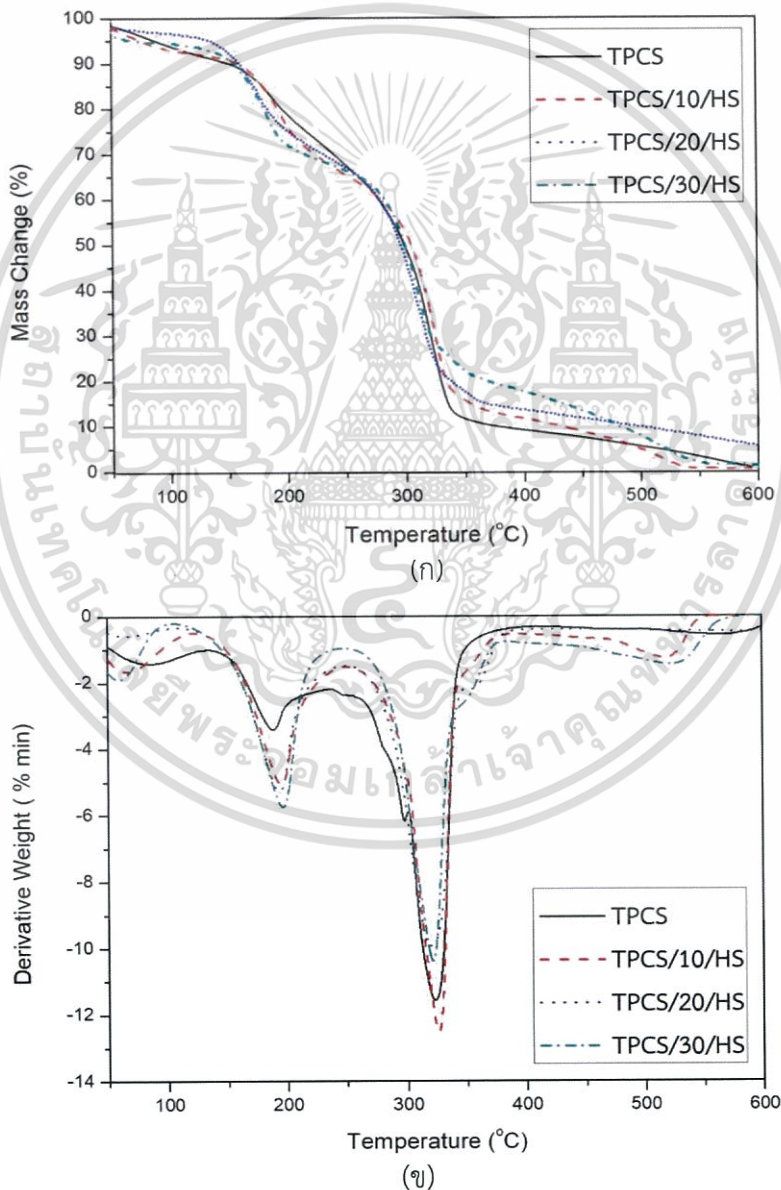


รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของ TPCS เสริมแรงด้วย SS โดยใช้อนุภาคซีลี้อยู่ (100–200 เมช) ที่มีปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยซีลี้อยและเสริมแรงด้วยซีลีอย SS ในปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )			น้ำหนักที่หายไปของแป้ง (phr)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอร์อล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ซีลีอย)	
0	188.6	323.0	-	47.7
10	188.0	323.7	358.4	35.3
20	189.6	324.7	357.8	34.0
30	191.6	322.5	357.8	32.2



รูปที่ 4.17 เทอร์โมแกรมของ TPCS เสริมแรงด้วย HS โดยใช้อนุภาคซีลีอย (100–200 เมช) ที่มีปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.5 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยซีลีออยและเสริมแรงด้วยซีลีออย HS

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			น้ำหนักที่หายไปของแป้ง (phr)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ซีลีออย)	
0	188.6	323.0	-	47.7
10	194.0	324.6	357.4	44.0
20	194.5	321.1	363.0	41.3
30	193.2	321.8	357.1	40.9

จากตารางที่ 4.3-4.4 และ รูปที่ 4.16-4.17 ตามลำดับ พบว่าเมื่อ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ตามลำดับ อุณหภูมิการสลายตัวจะปรากฏขึ้น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 188-194 องศาเซลเซียส [47] ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งประมาณ 323 องศาเซลเซียส [47] ช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ SS ประมาณ 358 องศาเซลเซียส และ HS ในช่วง 357-363 องศาเซลเซียส [49] โดยพบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งคงที่ เช่นเดียวกับการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยจากไม้สะเดา ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง [9] เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งใน TPCS ที่ไม่มีการผสมซีลีออย นอกจากนี้ปริมาณซีลีออยส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยพิจารณาที่ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีลีออยส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณแป้งที่ใช้ในทุกสูตรคงที่ ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกอสตาร์ทซ์ที่ดีขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของ TPCS โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30 phr โดยมีขนาด 100-200 เมช ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ  $1.67 \pm 0.49$  และ  $1.64 \pm 0.34$  ตามลำดับ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สเปกตรัมที่ได้ พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ทำให้พีกในช่วง  $3600-3300 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H stretching และในช่วง  $1420 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H bending จากแป้งและกลีเซอรอล เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้ง กลีเซอรอล และซีล้อยเพิ่มขึ้น เมื่อเติมซีล้อย SS และ HS ลงไป พบพีกใหม่ที่ตำแหน่ง  $1740-1726 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอสเทอร์ของโมเลกุลเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในอนุภาคซีล้อย

5.1.2 จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของซีล้อย พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS มีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่า SS เนื่องจาก HS มีปริมาณลิกนิน หรือส่วนที่เป็นอสัณฐานน้อยกว่า SS

5.1.3 จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า TPCS มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีล้อยจาก SS และ HS ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าซีล้อยกระจายตัวบนเมทริกซ์ของแป้ง และฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ มีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของแป้ง เนื่องจากแป้ง และซีล้อยมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงความมีขั้วเหมือนกัน ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัฏภาคได้ดี

5.1.4 จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณที่ต่างกันมีความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากซีล้อยมีความไม่มีขั้วมากกว่าแป้ง เมื่อเพิ่มปริมาณซีล้อยทำให้การดูดซับความชื้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีล้อย และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของซีล้อย พบว่า SS มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่า HS เนื่องจาก SS มีปริมาณลิกนินมากกว่า HS

5.1.5 จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณ 30 phr มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของซีล้อยในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS มีสมบัติเชิงกลสูงกว่า SS เนื่องจาก HS มีความเป็นผลึกมากกว่า SS ดังนั้น TPCS เสริมแรงด้วย HS จึงมีความแข็งแรงมากกว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS มีค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ก่อนการฝังดิน และพบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS มีแนวโน้มการย่อยสลายช้ากว่า HS เนื่องจาก SS มีปริมาณลิกนิน ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากกว่า HS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณซีลี้อยส่งผลให้น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง แสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนของ TPCS ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยซีลี้อย และพบว่า TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ส่งผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งคงที่

5.1.8 จากงานวิจัยนี้ พบว่า TPCS เสริมแรงด้วย HS ในปริมาณ 30 phr มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และสมบัติเชิงกล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาผลของซีลี้อยจากไม้ชนิดอื่นที่มีปริมาณลิกนินมากกว่าไม้สัก เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับความชื้น และการย่อยสลายโดยการฝังดินของ TPS ดีขึ้น

5.2.2 ศึกษากระบวนการขึ้นรูป TPS ด้วยวิธีอื่น เช่น การอัดรีดขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน TPS ที่หลากหลาย

5.2.3 ศึกษาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารที่มีฤทธิ์ต้านทานเชื้อรา เช่น ซิงค์บอเรต ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติในการต้านทานเชื้อราของ TPS

5.2.4 ศึกษาไม้ชนิดอื่นที่มีสารต้านทานเชื้อรา เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานเชื้อราของ TPS



## เอกสารอ้างอิง

- [1] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] กัญญาภรณ์ แทนเพชร, ขวัญชนก มโนภาพ และจินตมาศ สรรพทรัพย์ศิริ. 2557. “สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยกรดมาลิก และกรดซิตริก.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ปรรารถนา คำใส, ลัดดาวัลย์ เณรยอด และศันนีย์ เกตุอ่วม. 2556. “ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคซีลื้อยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] วรวรรณ พัฒนสิน. 2556. “การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน, ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Waliszewska, B. Zborowska, M. Pradzynski, W. and Robaszynska, M. 2007. *Wood structure and properties'06*. Zvolen : Arbora.
- [6] ระบบฐานข้อมูลทรัพยากรชีวภาพและภูมิปัญญาท้องถิ่นของชุมชน. 2555. ทรัพยากรชีวภาพพืช [Online]. Available : <http://www.bedo.or.th/lcbd/search.aspx?id=12412>. สืบค้นเมื่อวันที่ 1/ต.ค./60.
- [7] Pawongrat, R. 2015. “Pretreatment Processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes.” *Veridian E-Journal, Science and Technology of Silpakorn University*. 2(1) : 143-157.
- [8] Prachayawarakorn, J. Chaiwatyothin, S. Mueangta, S. and Hanchana, A. 2013. “Effect of jute kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites.” *Materials and Design*. 47 : 309-315.
- [9] Prachayawarakorn, J. and Hanchana A. 2016. “Effect of neem wood sawdust content on properties of biodegradable thermoplastic acetylated cassava starch/neem wood sawdust composites.” *Starch/Stärke*. 68 : 1-9.
- [10] ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2560. พลาสติกย่อยสลายได้นวัตกรรมเพื่อโลก. [Online]. Available : <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 1/ต.ค./60.
- [11] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). 2550. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้. [Online]. Available : [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html). สืบค้นเมื่อวันที่ 1/ต.ค./60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). 2550. การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้. [Online]. Available : [http://www.sub-kaona.com/index.php?option=com\\_content&view=section&id=6&Itemid=82](http://www.sub-kaona.com/index.php?option=com_content&view=section&id=6&Itemid=82). สืบค้นเมื่อวันที่ 1/ต.ค./60.
- [13] กษมา จารุกำจร. 2556. เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์. [Online]. Available : <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5550/2/Fulltext.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 5/ต.ค./60.
- [14] ศิริรจนา กันภัย. 2560. เคมีและสมบัติของแป้ง. [Online]. Available : [http://eu.lib.kmutt.ac.th/kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2\\_intro.htm](http://eu.lib.kmutt.ac.th/kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2_intro.htm). สืบค้นเมื่อวันที่ 5/ต.ค./60.
- [15] อัจจิมา สุทธิชูจิต. 2560. “สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งทำวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] คีนจันทร์ ณ นคร. 2552. “ผลของปริมาณอะไมโลสและสภาวะการผลิตต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาเร็กซ์ข้าวพรีเจลาติไนท์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [17] ร้านเคมีภัณฑ์. 2560. แป้งข้าวโพด. [Online]. Available : <https://www.chemipan.com/index>. สืบค้นเมื่อวันที่ 5/ต.ค./60.
- [18] Inglet, G. E. 1970. Corn: Culture, Processing, Products. Connecticut : The AVI.
- [19] ร้านไม้บูรพา. 2560. ไม้ และเส้นใยไม้. [Online]. Available : [http://www.buranapa.group.com/knowledge\\_chemical.php](http://www.buranapa.group.com/knowledge_chemical.php). สืบค้นเมื่อวันที่ 7/ต.ค./60.
- [20] เฟล็กซ์แพลนดีไฮด์. 2560. หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง. [Online]. Available : <http://www.baannatura.com/th/mat/content/detail/113.html>. สืบค้นเมื่อวันที่ 7/ต.ค./60.
- [21] Kataijar. 2560. ประเภทของคาร์โบไฮเดรต. [Online]. Available : <https://site.google.com/site/kataijar/kharbohident/prapheth-khxng-kharbohident?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>. สืบค้นเมื่อวันที่ 7/ต.ค./60.
- [22] ภัทรารุช มนต์วิเศษ. 2560. “พอลิเมอร์ชีวภาพ.” กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [23] ธรรมบุญ โปรดปราน และศุภศิลป์ มณีรัตน์. 2553. พลาสติกไซเซอร์. [Online]. Available : <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9176/1/381267.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 10/ต.ค./60.
- [24] สอนพฤกษศาสตร์สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์. 2560. ไม้สัก. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/nk40/nk/data/02/sak.htm>. สืบค้นเมื่อวันที่ 10/ต.ค./60.
- [25] สอนพฤกษศาสตร์สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์. 2560. ไม้แดง. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/nk40/nk/data/02/dang.htm>. สืบค้นเมื่อวันที่ 10/ต.ค./60.
- [26] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล : การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 23(2) : 141-142.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Wikipedia. 2560. **Magnesium stearate**. 2560. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium\\_stearate](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_stearate). สืบค้นเมื่อวันที่ 13/ต.ค./60.
- [28] Panyathai. 2560. **งานอัดฉีดพลาสติก**. [Online]. Available : [http://www.panyathaiplastic.com/index.php?option=com\\_content&view=article&catid=19:articlecap6&catid=1:category-captifycontent](http://www.panyathaiplastic.com/index.php?option=com_content&view=article&catid=19:articlecap6&catid=1:category-captifycontent). สืบค้นเมื่อวันที่ 13/ต.ค./60.
- [29] Rubber Intelligence Unit. 2560. **Compression moulding**. [Online]. Available : <http://rubber.oie.go.th/box/Article/21041/1>. สืบค้นเมื่อวันที่ 13/ต.ค./60.
- [30] Curvelo, A. A. S. Carvalho, A. J. F. and Agneli, J. A. M. 2001. "Thermoplastic starch-cellulosic fibres composites: preliminary results." *Carbohydrate Polymers*. 45 : 183-188.
- [31] Kaushik, A. Singh, M. and Verma, G. 2010. "Green nanocomposites based on thermoplastic starch and steam exploded cellulose nanofibrils from wheat straw." *Carbohydrate Polymers*. 82 : 337-345.
- [32] Guimaraes, J. L. Wypych, F. Saul, C. K. Ramos, L. P. and Satyanarayana, K. G. 2010. "Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil." *Carbohydrate Polymers*. 80 : 130-138.
- [33] Pachana, K. Wattanakornsiri, A. and Kaewpirom, S. 2012. "Physical Properties of Thermoplastic Glutinous Rice Starch Reinforced with Recycled Newspaper Cellulose Fibers." *Burapha Sci. J.* 17(1) : 13-23.
- [34] Hwansanoet W. 2553. "Properties of thermoplastic rice starch composite reinforced by different types of fibers." Master's thesis Technology of Polymer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [35] Bettini, S. H. P. Josefovich, M. P. P. M. Muñoz, P. A. R. Lotti, C. Mattoso, L. H. C. and Lotti, C. 2013. "Effect of lubricant on mechanical and rheological properties of compatibilized PP/sawdust composites." *Carbohydrate Polymers*. 94 : 800-806.
- [36] Balakrishnan, P. Sreekala, M. S. D. Kunaver, M. Huskic, M. and Thomas, S. 2017. "Morphology, Transport characteristics and viscoelastic polymer chainconfinement in nanocomposites based on thermoplastic potato starch and cellulose nanofibers from pineapple leaf." *Carbohydrate Polymers*. 169 : 176-188.
- [37] Castillo, L. García, M. A. Villar, M. Zaritzky, N. López, O. and Barbosa, S. 2015. "Talc Nanoparticles Influence on Thermoplastic Corn Starch Film Properties." *Procedia Materials Science*. 8 : 338-345.
- [38] Materials Testing System Manufacturer. 2017. **Effect of Specimen Geometry on Tensile Testing Results**. [Online]. Available : <https://www.admet.com/effect-specimen-geometry-tensile-testing-results/> . สืบค้นเมื่อวันที่ 16/ต.ค./60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] พัชรินทร์ โคตรสุวรรณ, พินทุอร พวงมาลี และพนิดา เจริญสุข. 2552. “ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [40] **Infrared Spectroscopy.** [Online] Available : <http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/Infrared.htm>. สืบค้นข้อมูล : 31/มี.ค./2561.
- [41] Bower, D. I. and Maddams, W. F. 1996. “**The vibrational spectroscopy of polymers.**” 2<sup>nd</sup>ed. Cambridge : Cambridge University Press.
- [42] Prachayawarakorn, J. and Pomdage, W. 2014. “Effect of carrageenan on properties of biodegradable thermoplastic cassava starch/low-density polyethylene composites reinforced by cotton fibers.” *Materials & Design*. 61 : 264–269.
- [43] Vinodhini, V. and Nilanjana, D. 2009. “Mechanism of Cr (VI) Biosorption by Neem Sawdust.” *Scientific Research*. 4(4) : 324-329.
- [44] Shi, R. Liu, Q. Ding, T. Han, Y. Zhang, L. Chan, D. and Tian, W. 2007. “Ageing of soft thermoplastic starch with high glycerol content.” *Applied Polymer Science*. 103 : 574-58
- [45] Chan, C. H. Chia, C. H. Zakaria, S. Ahmad, I. Dufresne, A. and Tshai, K. Y. 2015. “Low filler content cellulose nanocrystal and graphene oxide reinforced polylactic acid film composites” *Polymers Research Journal*. 9(1) : 165-177.
- [46] Teixeira, E. D. M. Lotti, C. Correa, A. C. Teodoro, K. B. R. Marconcini, J. M. and Mattoso, H. C. L. 2011. “Thermoplastic corn starch reinforced with cotton cellulose nanofibers.” *Applied Polymer Science*. 120(4) : 2428-2433.
- [47] Garcia, N. L. Ribba, L. Dufresne, A. Aranguren M. and Goyanes, S. 2011. “Effect of glycerol on the morphology of nanocomposites made from thermoplastic starch and starch nanocrystals.” *Carbohydrate Polymers*. 84(1) : 203-210.
- [48] Costa, F. J. O. G. Almeida, R. R. Lacerde, L. G. Carvalho-Filho M. A. S. Bannach, G. and Schnitzler, E. 2011. “Thermoanalytical study of native cassava starch and treated with hydrogen peroxide.” *Alim. Nutr.* 22(1) : 7-15.
- [49] Poletto, M. Zattera, A. J. Forte, M. M. C. and Santana, R. M. C. 2012. “Thermal decomposition of wood : Influence of wood components and cellulose crystallite size.” *Bioresource Technology*. 109 : 148-153.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

(ก.1) ลักษณะชิ้นงานของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างกัน

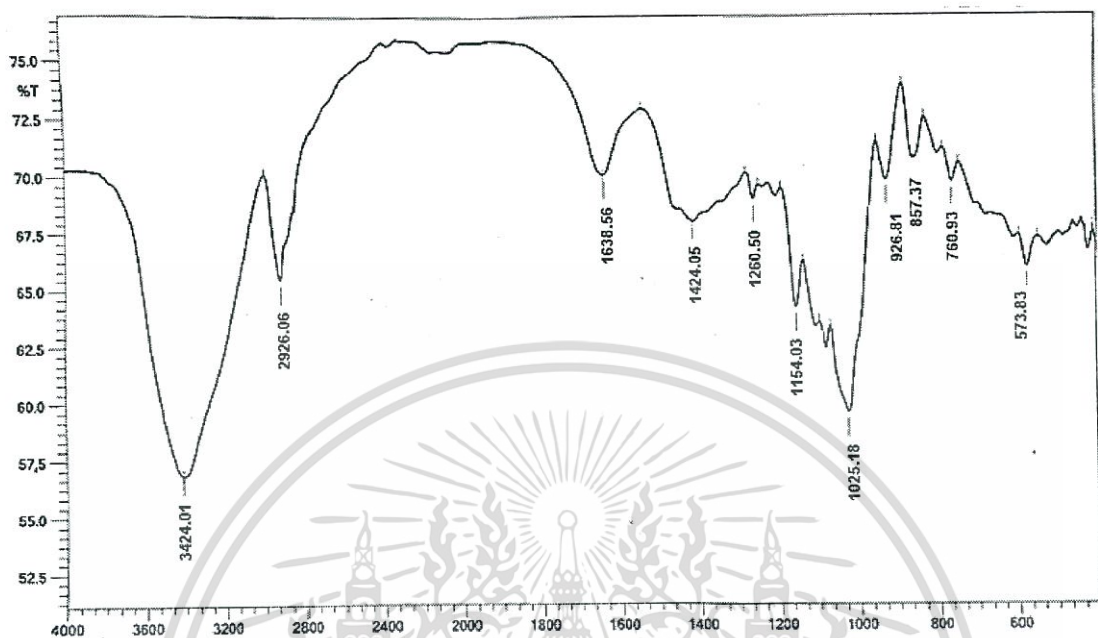


(ก) TPCS (ข) TPCS/10/SS (ค) TPCS/20/SS (ง) TPCS/30/SS (จ) TPCS/10/HS (ฉ) TPCS/20/HS  
(ช) TPCS/30/HS

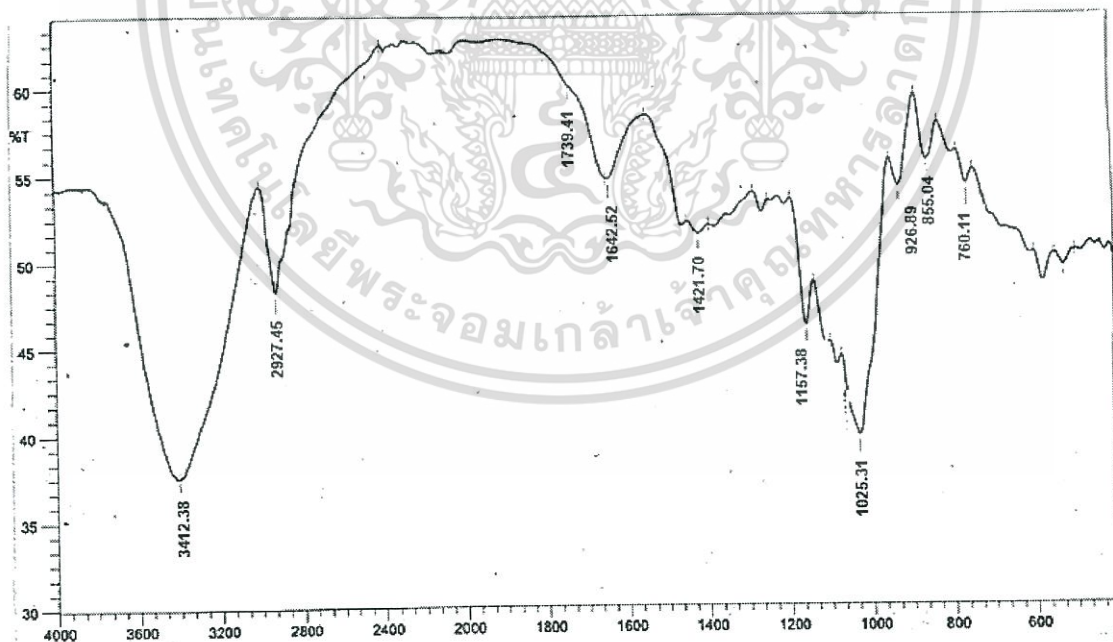
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

(ข.1) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS

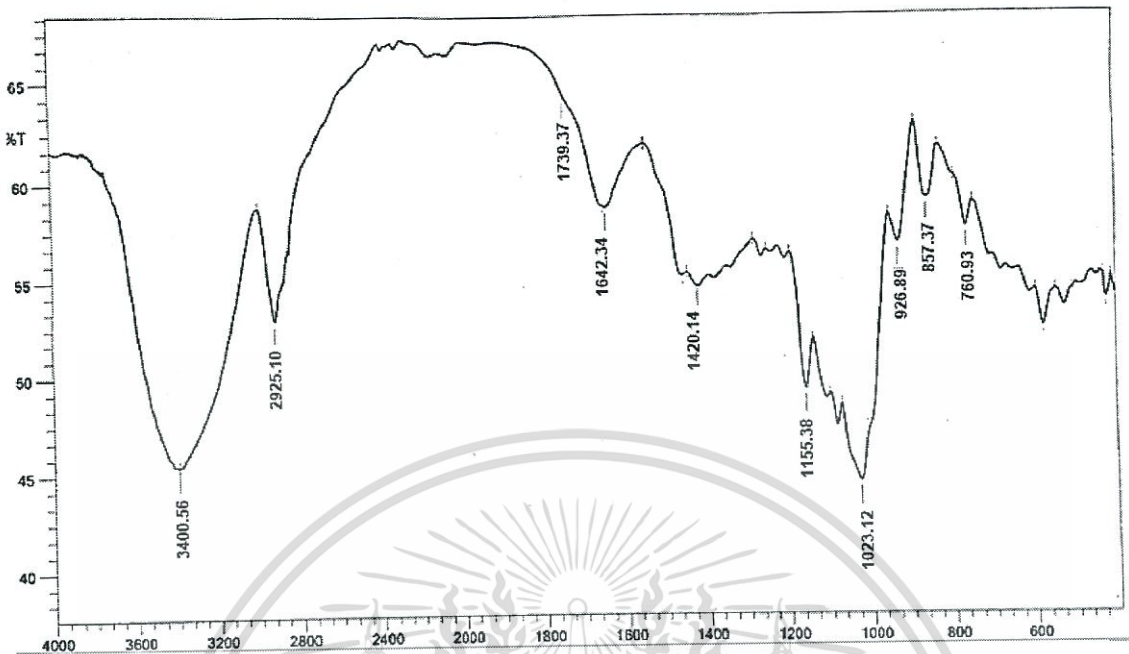


(ข.2) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/10/SS

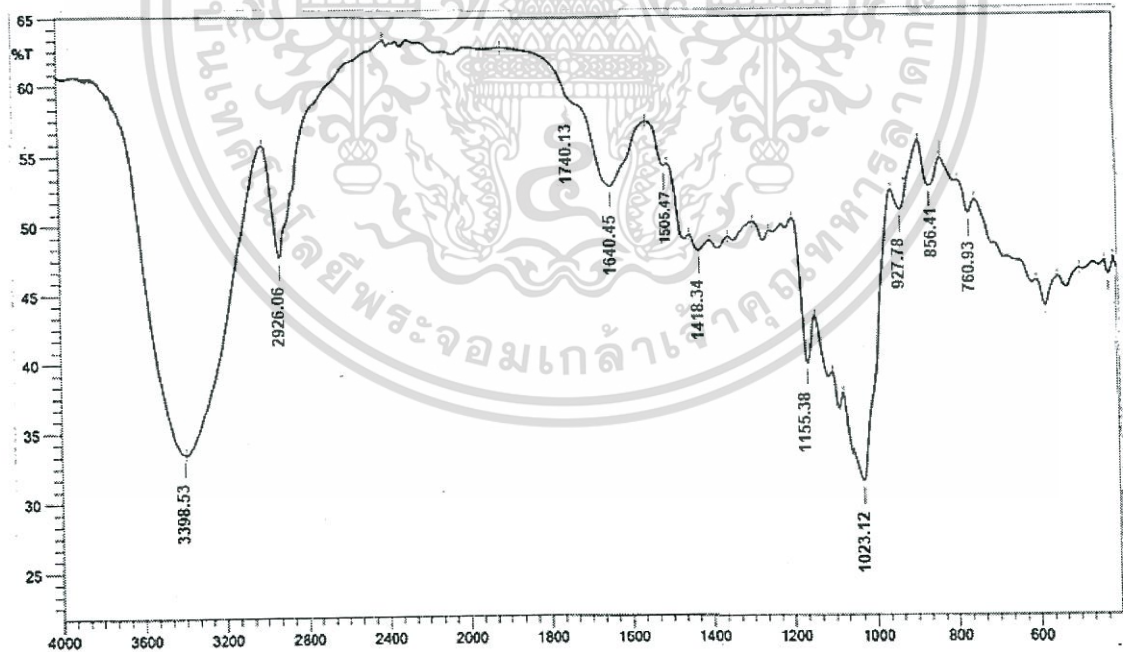


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข.3) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/20/SS

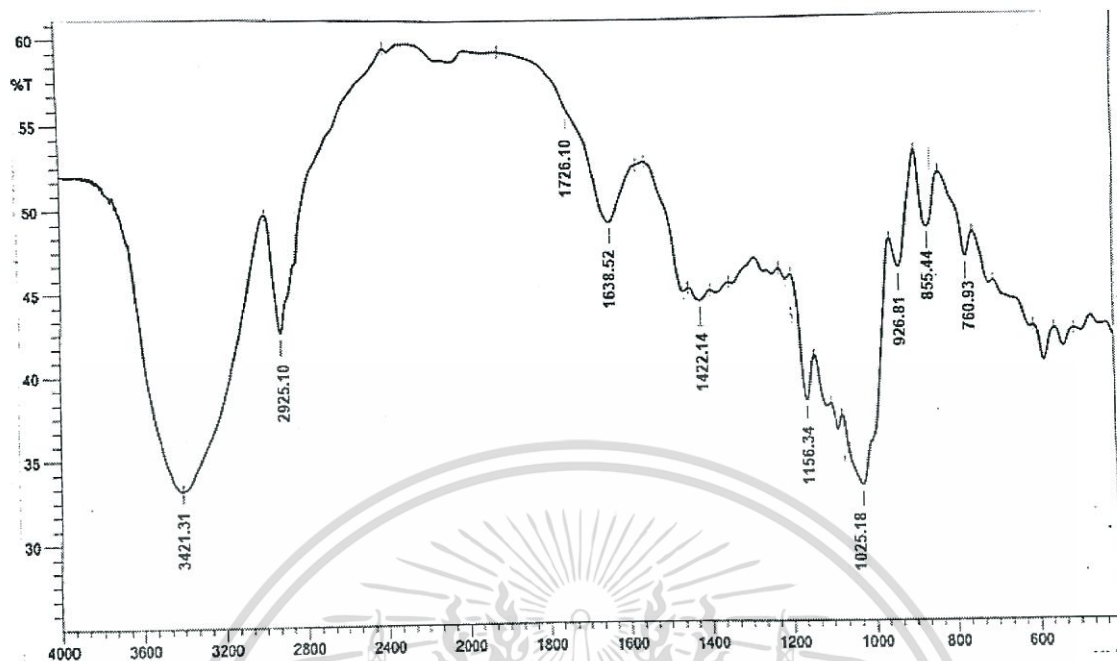


(ข.4) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/30/SS

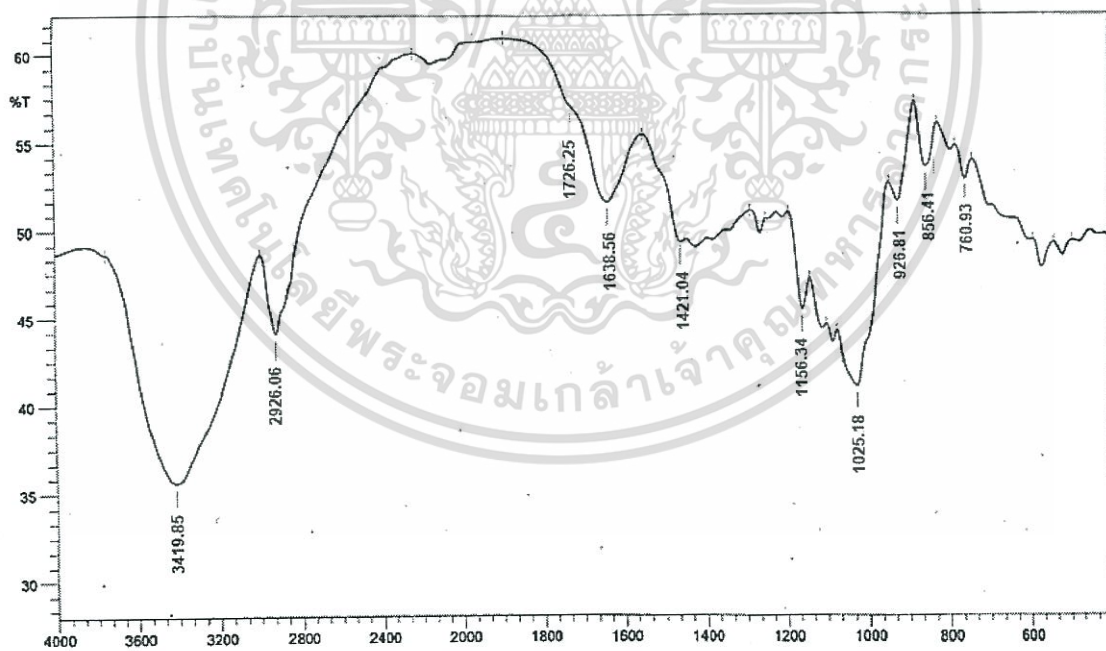


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข.5) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/10/HS

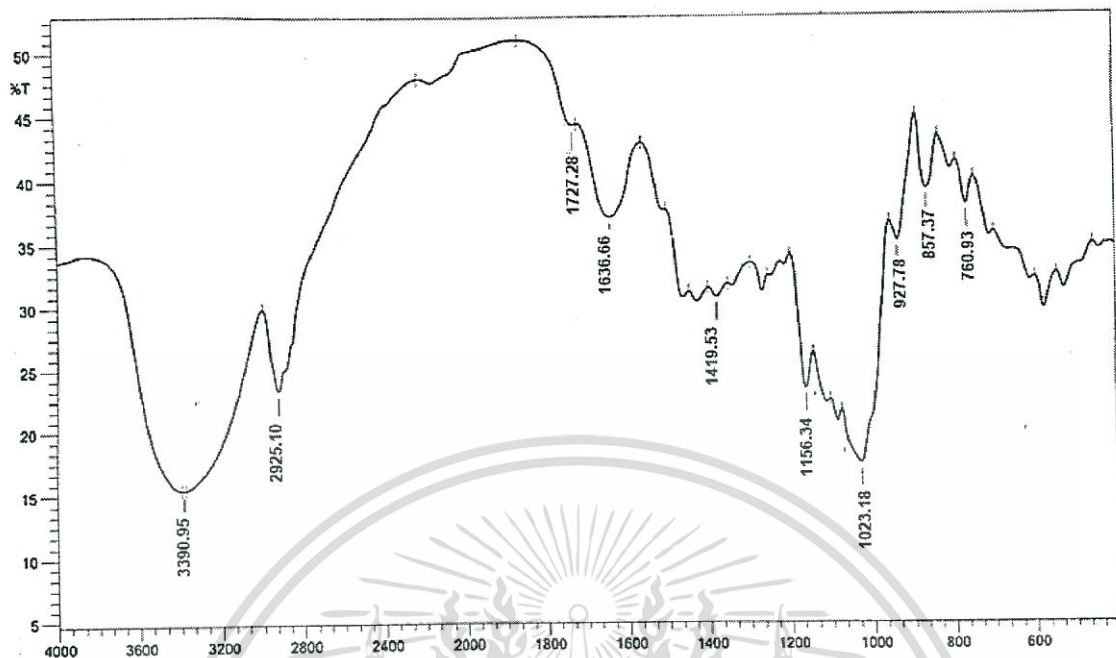


(ข.6) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/20/HS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข.7) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS/30/HS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

(ค.1) สัณฐานวิทยาของ SS ที่มีขนาดอนุภาค 100-200 ไมครอน พื้นผิวที่ฉีกกำลังขยาย 85 เท่า



(ค.2) สัณฐานวิทยาของ HS ที่มีขนาดอนุภาค 100-200 ไมครอน พื้นผิวที่ฉีกกำลังขยาย 85 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของ SS

	ความยาว (L)	ความกว้าง (D)	L/D ratio
1	172.70	90.58	1.91
2	177.80	76.84	2.31
3	165.50	96.20	1.72
4	137.10	121.90	1.12
5	172.10	99.33	1.73
6	177.00	95.94	1.84
7	160.30	97.88	1.64
8	158.90	119.80	1.33
9	163.10	116.70	1.40
10	138.50	124.10	1.12
11	154.70	133.10	1.16
12	158.40	104.00	1.52
13	151.30	86.05	1.76
14	187.90	82.83	2.27
15	145.40	110.00	1.32
16	127.90	115.50	1.11
17	197.90	75.97	2.60
18	187.90	91.61	2.05
19	153.00	135.20	1.13
20	199.10	65.86	3.02
21	174.10	93.53	1.86
22	106.30	95.39	1.11
23	171.80	111.50	1.54
24	183.60	116.30	1.58
25	172.90	111.50	1.55
26	184.30	109.20	1.69
27	144.10	130.40	1.11
28	148.40	114.00	1.30
29	166.10	82.58	2.01
30	183.90	80.13	2.30
	164.07±21.09	102.80±18.24	1.67±0.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D ratio) ของ HS

	ความยาว (L)	ความกว้าง (D)	L/D ratio
1	145.70	113.00	1.29
2	146.30	116.60	1.25
3	160.20	106.50	1.50
4	163.40	90.95	1.80
5	145.90	88.30	1.65
6	146.80	110.10	1.33
7	141.60	106.80	1.33
8	160.10	91.80	1.74
9	140.30	109.70	1.28
10	175.90	97.19	1.81
11	146.20	117.70	1.24
12	174.50	84.55	2.06
13	158.50	104.30	1.52
14	158.50	108.30	1.46
15	134.40	113.80	1.18
16	151.40	112.20	1.35
17	135.00	133.10	1.01
18	169.30	95.39	1.77
19	171.80	83.84	2.05
20	167.20	105.90	1.58
21	173.90	101.30	1.72
22	162.40	85.45	1.90
23	187.40	104.00	1.80
24	176.00	114.70	1.53
25	187.10	84.55	2.21
26	194.40	87.60	2.22
27	186.70	74.62	2.50
28	160.20	86.20	1.86
29	165.10	100.60	1.64
30	164.80	95.04	1.73
	161.70±15.91	100.80±13.03	1.64±0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1% ของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างกัน

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)						
	TPCS	TPCS/ 10/SS	TPCS/ 20/SS	TPCS/ 30/SS	TPCS/ 10/HS	TPCS/ 20/HS	TPCS/ 30/HS
0	0	0	0	0	0	0	0
1	6.12	4.98	4.70	4.56	5.27	5.14	5.08
2	11.47	10.33	9.71	7.89	10.40	10.30	9.13
5	26.48	21.03	20.32	17.23	22.43	19.98	18.77
6	30.25	24.06	22.88	20.22	25.19	23.22	23.24
7	32.08	26.86	26.01	23.78	27.94	25.64	24.58
8	35.35	28.79	28.80	25.44	30.58	28.05	26.76
9	37.04	31.47	30.91	27.45	33.21	30.77	28.42
12	45.11	38.65	36.72	33.45	39.85	37.29	33.61
13	46.27	39.49	37.72	34.78	41.49	37.92	34.75
14	48.11	41.31	38.84	36.23	42.74	40.13	36.52
15	49.54	42.90	40.28	37.34	44.48	40.55	37.65
16	50.58	43.99	42.18	38.79	44.86	41.91	38.38
19	51.75	46.42	44.64	40.79	47.86	45.08	42.01
20	52.01	47.77	44.75	41.34	48.23	45.70	42.74
21	52.14	48.00	44.98	41.56	48.86	46.33	42.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (MPa)	มอดุลัส (MPa)	ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (%)
TPCS	1.16±0.20	11.12±3.64	231.14±10.06
TPCS/10/SS	1.74±0.17	46.65±5.73	46.15±8.21
TPCS/20/SS	2.18±0.08	91.62±3.87	23.76±3.61
TPCS/30/SS	3.80±0.28	175.52±7.04	12.06±1.31
TPCS/10/HS	1.99±0.20	51.67±9.94	31.61±7.83
TPCS/20/HS	2.90±0.26	130.53±8.11	12.59±2.45
TPCS/30/HS	5.46±0.38	222.65±5.46	6.70±3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

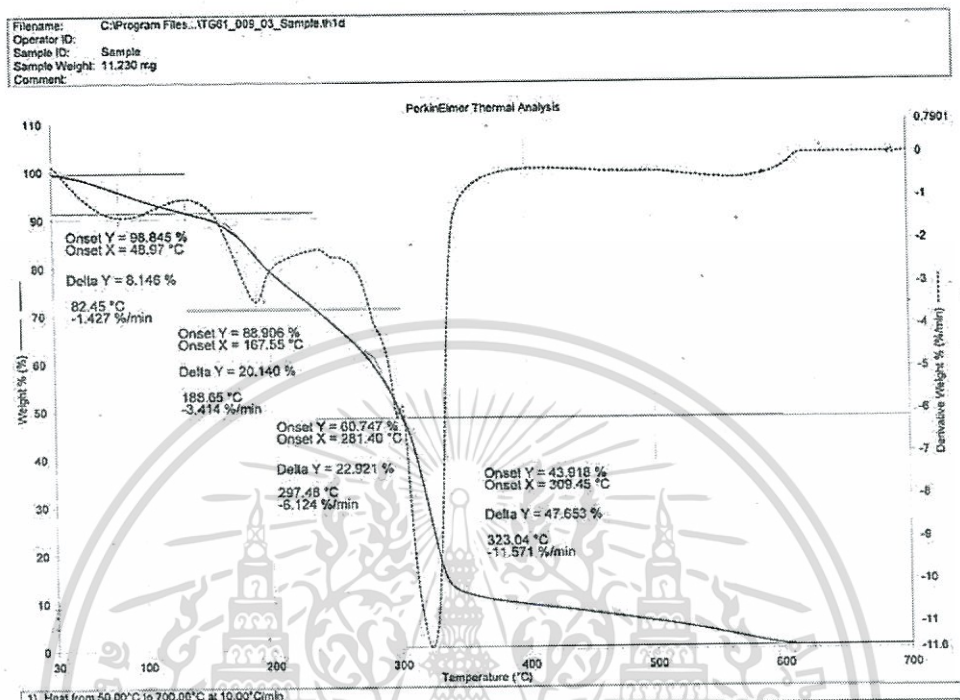
ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS เสริมแรงด้วย SS และ HS ในปริมาณต่างกัน ที่ความชื้น 5-10% หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน

ตัวอย่าง	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (MPa)	มอดุลัส (MPa)	ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (%)
TPCS	0.38±0.21	2.31±0.25	137.09±7.56
TPCS/10/SS	1.16±0.14	22.21±2.71	32.33±0.78
TPCS/20/SS	1.67±0.21	72.18±5.80	31.18±2.08
TPCS/30/SS	3.40±0.22	158.45±6.34	15.36±3.29
TPCS/10/HS	1.09±0.12	23.74±0.30	21.28±5.23
TPCS/20/HS	1.75±0.34	89.73±8.56	19.35±2.50
TPCS/30/HS	4.11±0.35	170.01±9.73	9.17±3.31

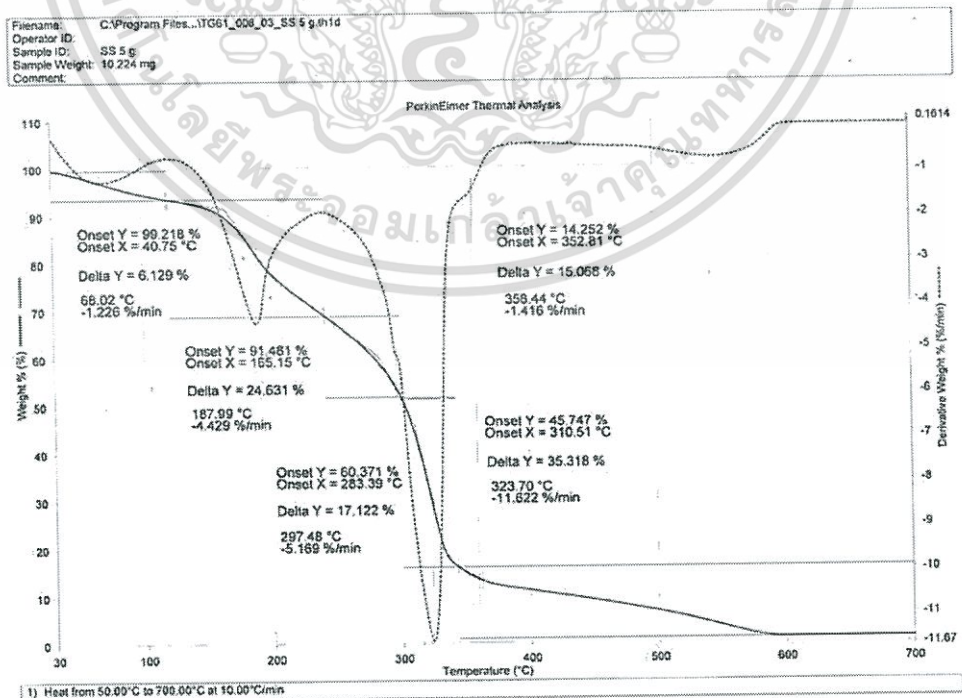
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### (ข.1) TGA และ DTG ของ TPCS

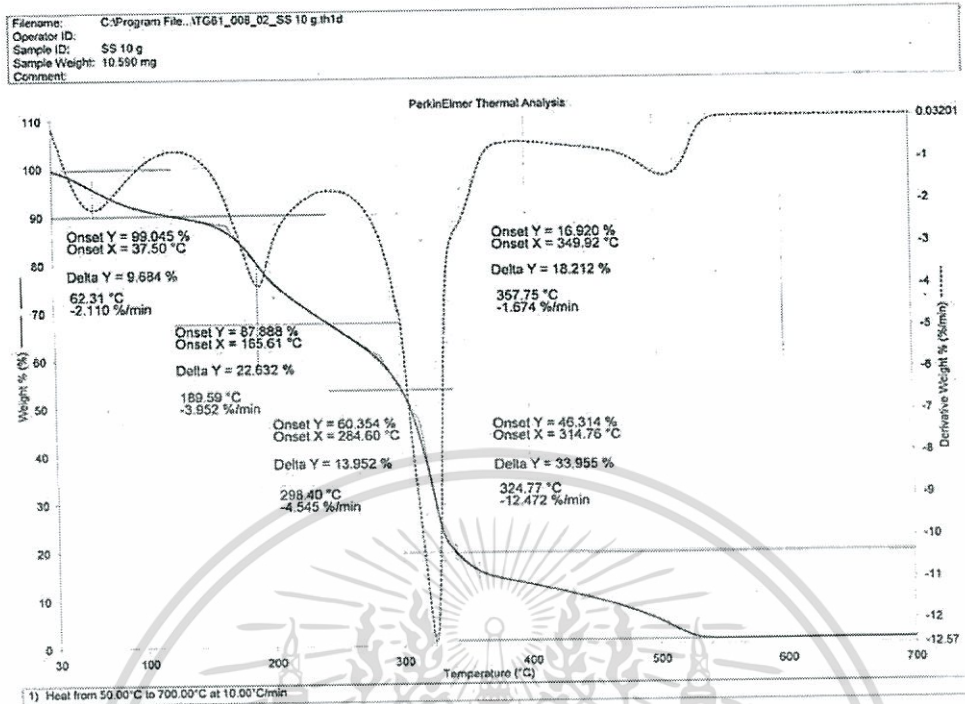


### (ข.2) TGA และ DTG ของ TPCS/10/SS

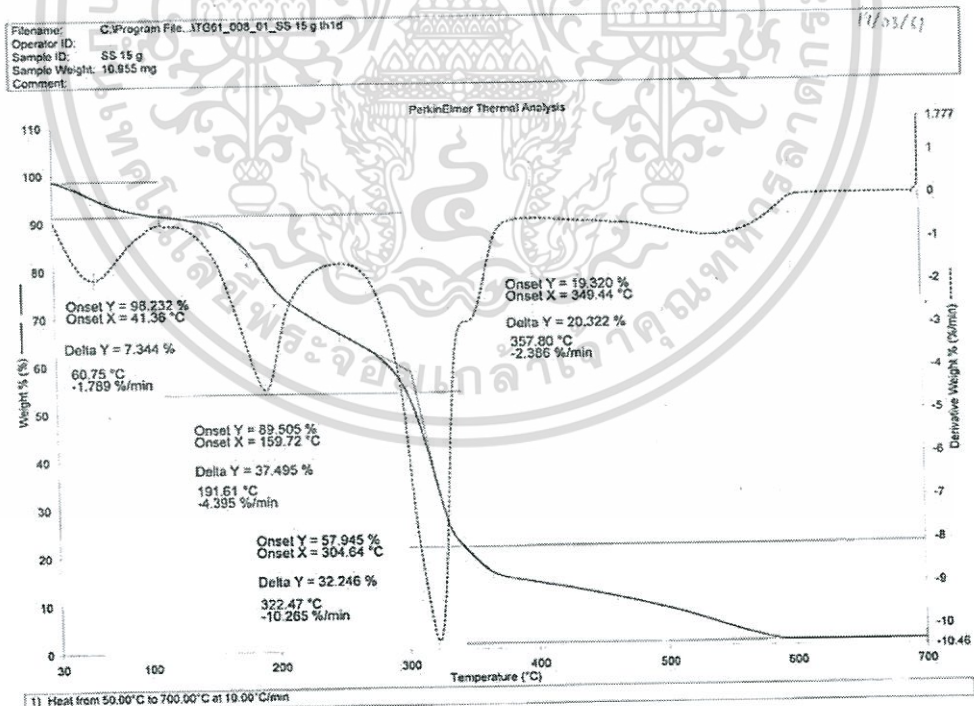


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (ข.3) TGA และ DTG ของ TPCS/20/SS

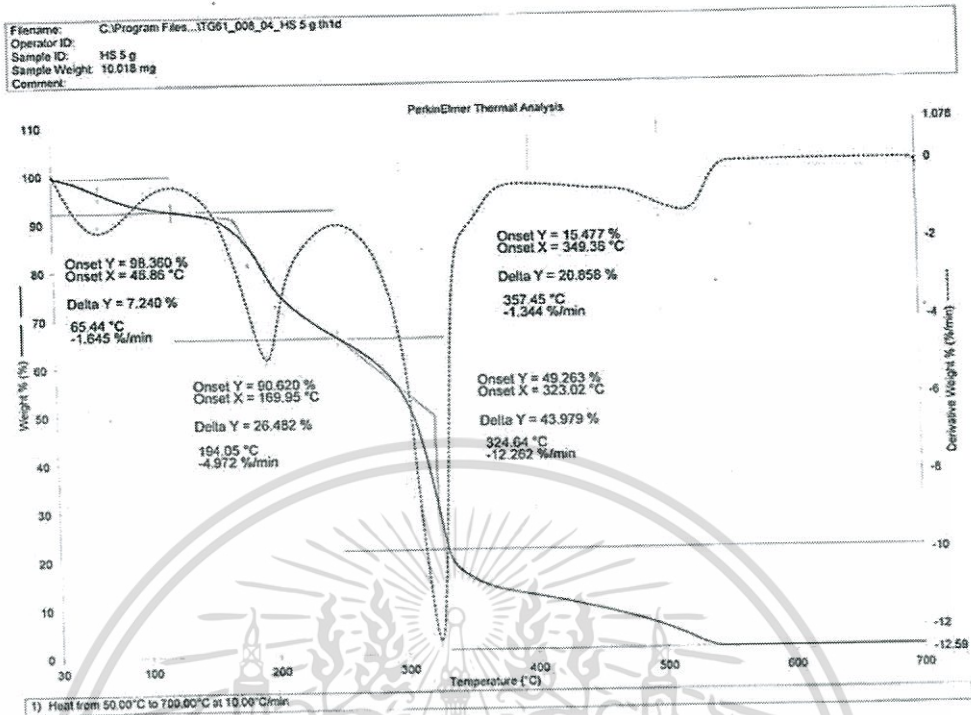


## (ข.4) TGA และ DTG ของ TPCS/30/SS

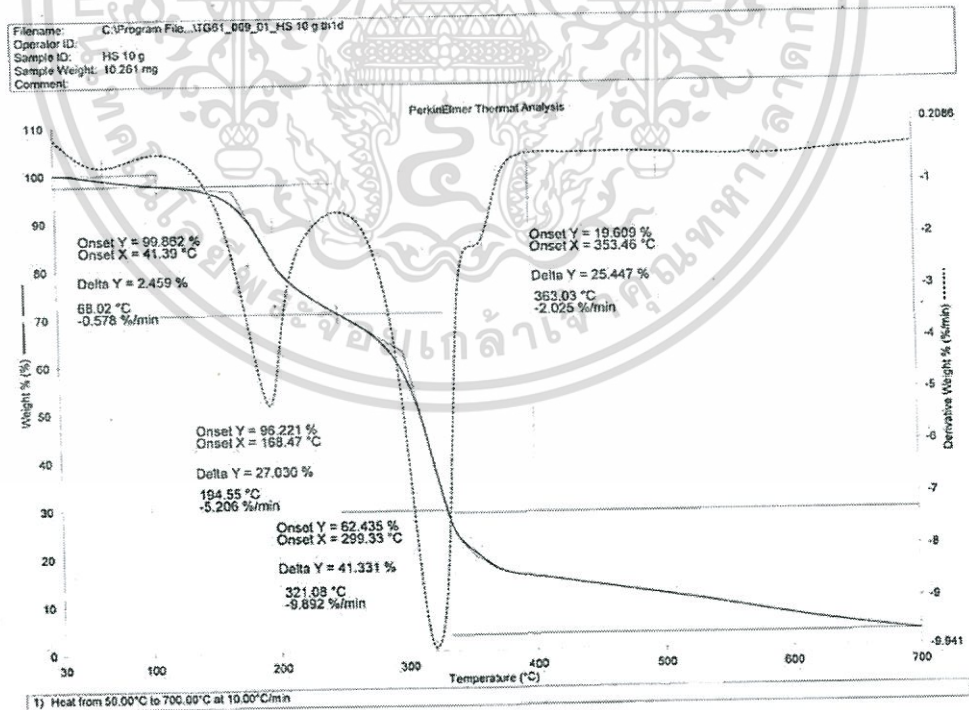


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (ข.5) TGA และ DTG ของ TPCS/10/HS

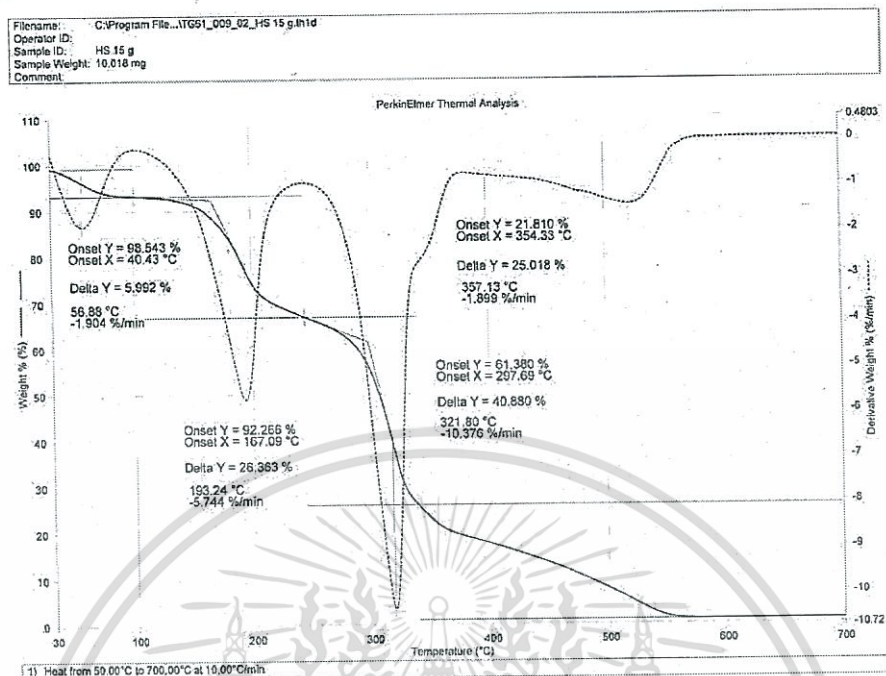


## (ข.6) TGA และ DTG ของ TPCS/20/HS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (ซ.7) TGA และ DTG ของ TPCS/30/HS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นางสาว ทัชชา บุณกานนท์ รหัสประจำตัว 57050418

นางสาว ปรียาภรณ์ พลายแก้ว รหัสประจำตัว 57050454

นางสาว ศิริขวัญ ภายวัน รหัสประจำตัว 57050518

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย ผลของชนิดขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก  
แป้งข้าวโพดเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย

ชื่อภาษาอังกฤษ Effect of sawdust types on properties of thermoplastic corn  
starch/sawdust composites

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน  
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม  
โครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 7.82%

ลงชื่อ.....ทัชชา บุณกานนท์..... ลงชื่อ.....ปรียาภรณ์ พลายแก้ว..... ลงชื่อ.....ศิริขวัญ ภายวัน.....

(นางสาวทัชชา บุณกานนท์)  
นักศึกษา

(นางสาวปรียาภรณ์ พลายแก้ว)  
นักศึกษา

(นางสาวศิริขวัญ ภายวัน)  
นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.จตุรรัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ  
ของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อ  
ไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....จตุรรัตน์.....

(รศ.ดร.จตุรรัตน์ ปรัชญาวรากร)  
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้