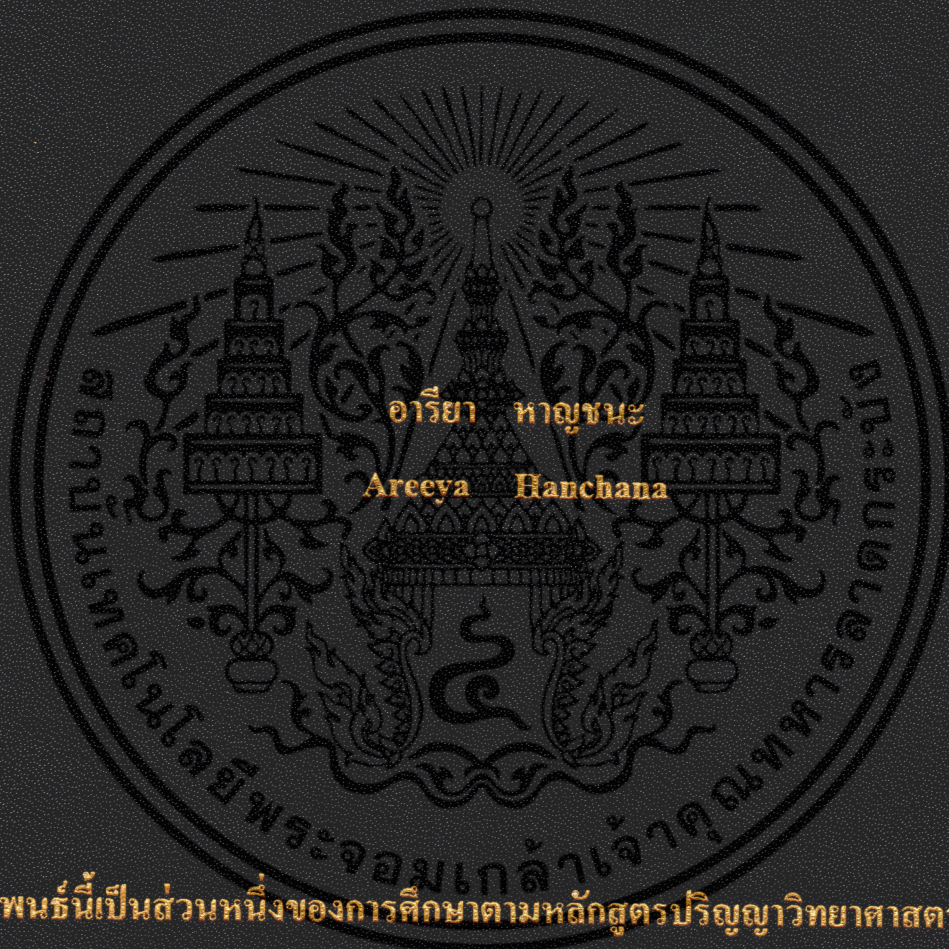


ผลของขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและ
เทอร์โมพลาสติกสตา์ชแอซิเตทจากแป้งมันสำปะหลัง

Effect of neem wood sawdust on properties of thermoplastic starch and
thermoplastic starch acetate from cassava starch



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-SC-M-014-001

ผลของขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและ
เทอร์โมพลาสติกสตา์ชแอซิเตตจากแป้งมันสำปะหลัง

Effect of neem wood sawdust on properties of thermoplastic starch and
thermoplastic starch acetate from cassava starch



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-SC-M-014-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFECT OF NEEM WOOD SAWDUST ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC STARCH AND THERMOPLASTIC STARCH
ACETATE FROM CASSAVA STARCH**



AREEYA HANCHANA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN
TECHNOLOGY OF POLYMER
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-SC-M-014-001**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของซีลี้อยจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง
EFFECT OF NEEM WOOD SAWDUST ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC STARCH AND THERMOPLASTIC STARCH
ACETATE FROM CASSAVA STARCH

นักศึกษา

นางสาวอารีญา หาญชนะ

รหัสประจำตัว

55651106

ปริญญา

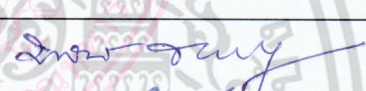
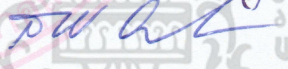

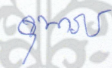
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจเชื้อ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 5 มกราคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.00 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ ธนะบริพัทธ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 6 เดือน พ.ศ. 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง		
นักศึกษา	นางสาวอารียา	หาญชนะ	รหัสนักศึกษา 55651106
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต		
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงผลของปริมาณและขนาดที่แตกต่างกันของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการกดอัด (Compression molding) และปรับปรุงสมบัติของ TPS ด้วยขี้เถ้าในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 10 20 30% โดยน้ำหนักของแป้งและกลีเซอรอล และขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาดน้อยกว่า 50, 50-100, 100-200 และมากกว่า 200 เมช นำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติการย่อยสลาย นอกจากนี้ศึกษาเชิงเปรียบเทียบกัเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรให้เป็น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic acetated cassava starch, TPACS) ที่นำมาเสริมแรงด้วยขี้เถ้าในปริมาณและขนาดที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า FT-IR สเปกตรัมที่แสดงการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเลื่อนหรือ Shift ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งแสดงถึงการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ จากสมบัติเชิงกล พบว่า สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ หรือลดขนาดอนุภาคของขี้เถ้า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลงของ TPCS และ TPACS ในทุกอัตราส่วน จากสัณฐานวิทยา พบว่า ขี้เถ้าที่ใส่ลงไปมีการกระจายตัวและมีความเข้ากันได้ดีในเมทริกซ์ของ TPCS และ TPACS ในส่วนของการศึกษาการดูดซับน้ำ พบว่า TPACS มีค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่า TPCS และการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของขี้เถ้า นอกจากนี้ การเติมขี้เถ้าลงไปเป็นผลทำให้คุณสมบัติการสลายตัวของแป้งไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น สมบัติเชิงกลหลังจากการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า TPCS และ TPACS ที่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้ทางโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบจะเผยแพร่เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมมีแนวโน้มสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม ดังนั้น TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of neem wood sawdust on properties of thermoplastic starch and thermoplastic starch acetate from cassava starch	
Student	Miss. Areeya Hanchana	Student ID 55651106
Degree	Master of Science	
Program	Technology of Polymer	
Year	2015	
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jutarat	Prachayawarakorn

Abstract

This research aimed to focus on the effect of contents and sizes of different neem wood sawdust on properties of thermoplastic cassava starch (TPCS). The TPCS was compounded by an internal mixer and molded by a compression molding machine. Then, the TPCS was modified by neem wood sawdust with different ratios of 0 10 20 30% by the TPCS weight and different of sizes, i.e. less than 50, 50-100, 100-200, and over 200 mesh. Different TPCS polymers were, then, analysed for mechanical, physical, morphological, thermal, water uptake, functional groups analysis and biodegradable properties. In addition, thermoplastic acetated cassava starch (TPACS) was prepared and reinforced by different contents and sizes of neem wood sawdust in order to compare with the TPCS reinforced sample. The results showed that the IR absorption band of O-H stretching vibration shifted to the lower wavenumber, indicating of new hydrogen bond formation. For tensile properties, it was found that the tensile properties was significantly improved when either increased the contents or decreased the particle sizes of the sawdust. However, increasing the humidity results in lower mechanical properties of different TPCS and TPACS polymers. For morphology, the addition of sawdust into the TPCS and TPACS polymers resulted in good distribution and phase compatibility. In addition, the TPACS polymers showed higher water absorption than the TPCS polymers and water absorption decreased when the sawdust contents increased. Moreover, the addition of sawdust caused no change in the decomposition temperature of starch, but led to the improvement of thermal stability. Furthermore, the tensile properties after soil burial test of the TPCS and TPACS polymers with the addition of the sawdust was higher than those without the sawdust. Thus, the TPCS polymers modified by neem wood sawdust with ratio of 30% by the TPCS weight and the size of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100-200 mesh showed the best overall properties based on morphological properties, mechanical properties, water absorption and thermal properties.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาประจำสาขาวิชาเคมีและเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาคำติเตือนอย่างใกล้ชิด และเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา รวมถึงตรวจแก้วิทยานิพนธ์เล่มนี้อย่างถี่ถ้วนให้ได้เล่มที่มีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ได้ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยและผลการทดลอง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีและเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ได้ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจเชื้อ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ซึ่งเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ได้ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้	4
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	5
2.1.2 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	7
2.1.3 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ	7
2.1.4 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	8
และการย่อยสลายโดยการฝังกลบ	
2.1.5 การย่อยสลายของแป้ง	8
2.2 แป้ง	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	10
2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง	10
2.2.2.1 อะมิโลส	12
2.2.2.2 อะมิโลเพกทิน	14
2.2.2.3 สารตัวกลาง	16
2.2.3 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง	16
2.2.4 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	17
2.2.5 สมบัติของแป้ง	19
2.2.5.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย	19
2.2.5.2 การเกิดเจลลิ่งในเซชัน	20
2.2.5.3 การเกิดรีโทรเกรดชัน	21
2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)	23
2.3.1 ชนิดของแป้งดัดแปร	23
2.3.2 ปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิแซคคาไรด์	24
2.3.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification)	24
2.4 แป้งมันสำปะหลัง	27
2.4.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง	28
2.4.2 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง	29
2.4.3 ประโยชน์ของแป้งมันสำปะหลัง	30
2.5 จี๊เลื่อย	33
2.5.1 องค์ประกอบของจี๊เลื่อย	33
2.5.2 ประโยชน์ของจี๊เลื่อย	35
2.6 พลาสติกไซเซอร์	36
2.7 สารหล่อลื่น	36
2.7.1 หน้าที่ของสารหล่อลื่น	37
2.7.2 สารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก	37
2.8 คอมโพสิต	39
2.8.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.8.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต	41
2.9 การคอมปาวด์ (Compounding)	42
2.9.1 การคอมปาวด์แบบรุ่น (Batch compounding)	42
2.9.1.1 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน	42
2.10 เทคนิคการอัด	43
2.10.1 เทคนิคการอัด	44
2.10.2 ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด	44
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	51
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	53
3.3 วิธีการทดลอง	56
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPCS) และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตตจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)	56
3.3.2 การขึ้นรูป TPCS และ TPACS จากแป้งมันสำปะหลัง	56
3.3.3 การปรับปรุงสมบัติของ TPCS และ TPACS ด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดา	57
3.3.3.1 การเตรียมขี้เลื่อย	57
3.3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของ TPCS และ TPACS โดยขี้เลื่อย	57
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	59
3.4.1 สมบัติทางกายภาพ	59
3.4.1.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ	59
3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าหมูฟังก์ชัน	59
3.4.3 สันฐานวิทยา	59
3.4.4 สมบัติเชิงกล	60
3.4.4.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์	60
การดึงยึด ณ จุดขาด	
3.4.4.2 ความแข็งกด	61
3.4.5 สมบัติทางความร้อน	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.4.6 การทดสอบการย่อยสลาย	62
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	63
4.1 สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซแอซิเทคจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)	63
4.1.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	63
4.1.2 สันฐานวิทยา	69
4.1.2.1 ผลของปริมาณของขี้เถ้าจากไม้สะเดา ที่มีต่อสันฐานวิทยาของ TPCS และ TPACS	70
4.1.2.2 ผลของขนาดของขี้เถ้าจากไม้สะเดา ที่มีต่อสันฐานวิทยาของ TPCS และ TPACS	72
4.1.3 สมบัติทางกายภาพ	75
4.1.3.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ	75
1. ผลของปริมาณขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มี ปริมาณการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS	75
2. ผลของขนาดของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มี ปริมาณการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS	77
4.1.4 สมบัติเชิงกล	81
4.1.4.1 ผลของปริมาณและขนาดของขี้เถ้าจาก ไม้สะเดาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ TPCS	81
4.1.4.2 ผลของปริมาณและขนาดของขี้เถ้าจาก ไม้สะเดาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ TPACS	84
4.1.5 การทดสอบการย่อยสลาย	87
4.1.5.1 ผลของปริมาณของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มี ต่อสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินของ TPCS และ TPACS	88
4.1.5.2 ผลของขนาดของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มี ต่อสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินของ TPCS และ TPACS	91
4.1.6 สมบัติทางความร้อน	94
4.1.6.1 ผลของปริมาณของขี้เถ้าที่มีผลต่อ TPCS และ TPACS	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.1.6.2 ผลของขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่มีผลต่อ TPCS	98
และ TPACS	
4.2 การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPCS)	102
และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)	
4.2.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	102
4.2.2 สันฐานวิทยา	104
4.2.3 สมบัติทางกายภาพ	106
4.2.3.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ	106
4.2.4 สมบัติเชิงกล	107
4.2.5 การทดสอบการย่อยสลาย	111
4.2.6 สมบัติทางความร้อน	113
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	116
5.1 สรุปผลการวิจัย	116
5.2 ข้อเสนอแนะ	118
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก ก ลักษณะชิ้นงาน	125
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	128
ภาคผนวก ค สันฐานวิทยา	135
ภาคผนวก ง การดูดซับน้ำ	136
ภาคผนวก จ สมบัติเชิงกล	140
ภาคผนวก ฉ สมบัติการย่อยสลาย	146
ภาคผนวก ช สมบัติทางความร้อน	153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	12
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	13
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	15
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ	17
ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก	38
ตารางที่ 2.6 ข้อดี และ ข้อเสีย ของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก	38
ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก	39
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง	51
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้สะเดา	51
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทั่วไปของแมกนีเซียมสเตียเรท	52
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลที่ใช้เตรียม TPCS และ TPACS	56
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการเตรียม TPCS และ TPACS	57
ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า	
ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้	60
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณต่างกัน 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก	95
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณต่างกัน 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก	97
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า และ TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคที่ต่างกัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช	99
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคที่ต่างกัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPCS, TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย จี้อย่างจากไม้สะเคาดด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	6
รูปที่ 2.2 วัฏจักรการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะมิโลส	12
รูปที่ 2.4 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส	14
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน	15
รูปที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (กำลังขยาย 40 เท่า)	18
รูปที่ 2.8 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย (ก)-(จ) 1,000 เท่า และ (ฉ) 3,000 เท่า	19
รูปที่ 2.9 การเกิดรีโทรเกรดชัน	22
รูปที่ 2.10 กลไกการคืนตัวของแป้ง	22
รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาเอชิตชันของแป้ง	25
รูปที่ 2.12 กลไกปฏิกริยาเอชิตชันของแป้งโดยใช้สารแอนไฮโดรด์ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา	27
รูปที่ 2.13 ประโยชน์ของมันสำปะหลัง	30
รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) เฮมิเซลลูโลส และ (ค) หน่อข่อยของลิกนิน	35
รูปที่ 2.15 ลักษณะของส่วนเสริมแรงในคอมพอลิติด	41
รูปที่ 2.16 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	43
รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องอัด (Compression Molding)	43
รูปที่ 2.18 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดและการฉีด	45
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยตอนที่ 1	54
รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยตอนที่ 2	55
รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	60
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS และ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อย ปริมาณ 30 % ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	64
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อยจากไม้สะเดา ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ	65
รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อย ปริมาณ 30 % ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	65
รูปที่ 4.5 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับจีลื้อย	67
รูปที่ 4.6 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งแอซิเตดกับจีลื้อย	68
รูปที่ 4.7 ลัทธิฐานวิทยาของ TPCS	69
รูปที่ 4.8 ลัทธิฐานวิทยาของ TPACS	69
รูปที่ 4.9 ลัทธิฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลื้อยไม้สะเดาขนาด อนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	70
รูปที่ 4.10 ลัทธิฐานวิทยาของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลื้อยไม้สะเดาขนาด อนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	71
รูปที่ 4.11 ลัทธิฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลื้อยไม้สะเดาใน ปริมาณ 30% โดยน้ำหนักด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	72
รูปที่ 4.12 ลัทธิฐานวิทยาของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลื้อยไม้สะเดาใน ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	73
รูปที่ 4.13 เฟอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อยจาก ไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ กัน	75
รูปที่ 4.14 เฟอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อยจาก ไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ กัน	76
รูปที่ 4.15 เฟอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อยจาก ไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน	77
รูปที่ 4.16 เฟอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยจีลื้อยจาก ไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน	78
รูปที่ 4.17 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยจีลื้อยในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%	81

	หน้า
รูปที่ 4.18 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยขี้เลื่อยในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%	82
รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยขี้เลื่อยในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	83
รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลของ TPACS ผสมด้วยขี้เลื่อยในปริมาณต่างๆ กัน ที่ขนาด 100-200 เมช ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100%	84
รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของ TPACS ผสมด้วยขี้เลื่อยในขนาดต่างๆ กัน ที่ปริมาณ ขี้เลื่อย 30% โดยน้ำหนัก ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100%	85
รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยขี้เลื่อยขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 10%, 20% และ 30% ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับ สมบัติเชิงกลหลังฝังดิน	89
รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุง สมบัติด้วยขี้เลื่อยขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 10%, 20% และ 30% ก่อนฝังดิน เปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน	90
รูปที่ 4.24 สมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยขี้เลื่อย ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน	91
รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุง สมบัติด้วยขี้เลื่อย ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน	93
รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมของ TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจาก ไม้สะเดาโดยใช้อุณหภูมิของขี้เลื่อย (100 - 200 เมช) ที่ปริมาณต่างกัน	95
รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมของ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจาก ไม้สะเดาโดยใช้อุณหภูมิของขี้เลื่อย (100 - 200 เมช) ที่ปริมาณต่างกัน	96
รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมของ TPCS และ TPCS มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย จากไม้สะเดาโดยใช้ขี้เลื่อยในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน	98
รูปที่ 4.29 เทอร์โมแกรมของ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจาก ไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน	100

	หน้า
รูปที่ 4.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาค 100-200 เมช	102
รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยา (ก) TPCS (ข) TPACS ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	104
รูปที่ 4.32 สัณฐานวิทยา (ก) TPCS + 30% sawdust 100-200 เมช (ข) TPACS + 30% sawdust 100-200 เมช ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า	105
รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 30% และ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ	106
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ไม่ผสมขี้เลื่อย และ TPCS, TPACS ที่ผสมด้วยขี้เลื่อยในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช และ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100%	109
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ผสมขี้เลื่อย และ TPCS, TPACS ที่ผสมด้วยขี้เลื่อยขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน	112
รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรมของ TPCS, TPACS และ TPCS, TAPCS มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาโดยใช้อุณหภูมิของขี้เลื่อย (100 - 200 เมช) ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก	113

คำย่อและสัญลักษณ์

- TPS = Thermoplastic starch (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช)
- TPCS = Thermoplastic cassava starch (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง)
- TPACS = Thermoplastic acetated cassava starch (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตตจากแป้งมันสำปะหลัง)
- SD = Sawdust
- Mg-St = Magnesium stearate (แมกนีเซียมสเตียเรท)
- DP = Degree of Polymerization (ขนาดโมเลกุล)
- DS = Degree of substitution (ระดับการแทนที่)
- NC = Number of Chain (จำนวนสาย)
- CL = Chain Length (ความยาวสาย)
- ECL = External Chain Length (ความยาวสายภายนอก)
- ICL = Internal Chain Length (ความยาวสายภายใน)
- TGA = Thermogravimetric Analyzer (เครื่องทดสอบทางความร้อน)
- SEM = Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)
- FTIR = Fourier Transform Infrared Spectroscopy (เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์)
- E = Young's modulus (มอดุลัส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัญหาขยะพลาสติกต่างๆ ในปัจจุบันนับว่าเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างหนึ่งของประเทศไทย นับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เกิดปัญหาด้านการจัดเก็บและการกำจัด เนื่องจากเมื่อขยะพลาสติกถูกทิ้งปะปนกับขยะจำพวกอื่น นำไปฝังกลบต้องใช้เวลาในการย่อยสลายโดยเฉพาะขยะที่เกิดจากถุงพลาสติกมีปริมาณมากที่สุดในเวลานี้ หากสารปรุงแต่งหรือสารประกอบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกรั่วไหลอาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและดิน ทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์ พืช และมนุษย์ หรือหากนำขยะพลาสติกไปเผาจะทำให้เกิดมลพิษในอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากโลกของเรากำลังร้อนขึ้นทุกวันและขยะพลาสติกก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและการนำไปเผาทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวการที่ทำให้โลกร้อนด้วย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีความอุดมสมบูรณ์ในเรื่องของวัตถุดิบเกษตร เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และถั่วต่างๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกชีวฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยทั่วไปสตาร์ชในรูปของเม็ดแป้งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปโดยเทคโนโลยีที่ใช้กับพอลิเมอร์ ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดแป้ง ($T_m \sim 220-240^\circ\text{C}$) สูงกว่าอุณหภูมิสลายตัว ($T_d \sim 220^\circ\text{C}$) ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว [1] การผสมเม็ดสตาร์ชกับพลาสติกไซเซออร์ (เช่น น้ำ กลิเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น) ในสถานะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน จะให้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชซึ่งสามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการหลอมหรือการใช้ความร้อนเข้าช่วย อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความว่องไวต่อความชื้น ความยืดหยุ่นหรือความอ่อนตัว และการทนต่อความร้อน การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอาจทำได้โดยการดัดแปรโครงสร้างทางเคมี เช่น การทำเป็นแป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดัดแปรโครงสร้าง (Modified starch) คือ แป้งธรรมชาติ (Native starch) ที่ได้รับการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลง สมบัติให้แตกต่างออกไปจากแป้งธรรมชาติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งทางกายภาพหรือทางเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนไปของโครงสร้างโมเลกุลของแป้งภายในเม็ดแป้ง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืด (Viscosity) ลดลง คงตัวต่อความร้อน

ความชื้น กรด และแรงเหวี่ยง วิธีการในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายในของเม็ดแป้งมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตามความต้องการในการที่จะนำไปใช้งานปัจจุบัน [2]

นอกจากนี้ประเทศไทยอุดมไปด้วยทรัพยากรชีวมวลไม่ว่าจะเป็นแกลบ ชานอ้อย เศษปลาล้าง น้ำมันและเศษไม้ซึ่งเศษเหลือเหล่านี้มีปริมาณมากถึง 60 ล้านตันในแต่ละปีในปัจจุบันเศษวัสดุการเกษตรเหล่านี้ถูกกำจัดโดยการเผาไหม้ในพื้นที่โล่งและการฝังกลบ ของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย แกลบขังข้าวโพด และเหง้ามันสำปะหลัง เราสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์เป็นการลดขยะทางการเกษตร [1]

ขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust) [3] เป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด เป็นของเสียนในโรงงาน [3] แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลายประการ ขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) สะเตาเป็นไม้โตเร็วเจริญได้ดีในแถบร้อน ที่มีปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่ 400-1,200 มม. เป็นพืชทนอากาศแห้งแล้งได้ดีสามารถขึ้นได้ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แต่จะเจริญเติบโตเร็วในสภาพดินที่ไม่ขึ้นและและปริมาณน้ำฝนไม่เกิน 800 มม. ประโยชน์ของเนื้อไม้สะเตาเหมาะสำหรับนำไปก่อสร้างบ้านเรือน ทำเสาเข็ม และเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ รวมทั้งเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพดี [4]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ได้ทำการศึกษาผลของชนิด ปริมาณและขนาดของเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยนำมาเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ เส้นใยปอ และเส้นใยนุ่น พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นจากการเติมเส้นใยลงไป จากลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยเข้ากับเมทริกซ์ของแป้งได้ สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำลดลง

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) โดยนำมาเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยซึ่งมีองค์ประกอบหนึ่งเป็นเซลลูโลสในปริมาณและขนาดต่างๆ กันเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ เนื่องจากขี้เลื่อยเป็นพอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลัง โดยคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ นอกจากนี้จะทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอซิเตตจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic acetated cassava starch, TPACS) ที่นำมาเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยในปริมาณและขนาดที่แตกต่างกัน โดยคาดว่าหมู่แอซิทิลที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชจะช่วยให้สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดีขึ้นเนื่องจากมีหมู่ที่ว่องไวต่อความชื้นลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซแอซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของ TPCS และ TPACS โดยการใช้น้ำในปริมาณและขนาดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเตรียม TPCS และ TPACS โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.3.2 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยใช้น้ำในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 10 20 30% โดยน้ำหนัก และขนาดต่างๆ ได้แก่ น้อยกว่า 50, 50-100, 100-200 และมากกว่า 200 เมช
- 1.3.3 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัมพันธวิทยา สมบัติทางความร้อน การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 วัสดุที่เตรียมได้สามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและสามารถทดแทนวัสดุที่ได้จากพอลิเมอร์
- 1.4.2 ส่งเสริมการนำวัสดุธรรมชาติที่หาง่าย ราคาถูก นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ [6]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้ โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของวัสดุย่อยสลายได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะหรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดหรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิวเนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical degradable plastics) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรอกไซด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทนผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสถานะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมีสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้น ใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP ก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) น้ำเกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลายแต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [7]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือ Biodegradable plastics เป็นพลาสติกที่ผลิตจากพืชหรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable resources) กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมัก (Fermentation) ซึ่งใช้พลังงานต่ำ และมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำเมื่อนำไปฝังกลบภายหลังการใช้งาน ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็นแนวทางหลักแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม กลุ่มอุตสาหกรรมแนวหน้าทั่วโลกตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบหรือพอลิเมอร์ตัวใหม่ เพื่อพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและให้มีคุณสมบัติในการใช้งานได้ดีเทียบเท่ากับพลาสติกดั้งเดิมที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่ถูกย่อยสลายจากการกระทำของจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ในดิน บ่อฝังกลบขยะ บ่อบำบัดน้ำเสีย แหล่งน้ำจืดหรือในทะเล หากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกิดขึ้นในระบบการหมักภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมจะเรียกว่าการย่อยแบบคอมโพส (Compostable) เมื่อกระบวนการหมักแบบคอมโพสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ มูลชีวภาพ และสารอนินทรีย์ ซึ่งการย่อยสลายแบบคอมโพสนี้เป็นการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ พืชสามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำไปใช้สังเคราะห์แสงเข้าสู่วัฏจักรคาร์บอนอีกครั้ง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [9]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อราใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โปรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายใตยสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย ซึ่งสามารถวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พลาสติกไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพ โครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะสลายกลายเป็นผงละเอียด
2. การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป
3. การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้น โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone) และพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรท (Poly (hydroxybutyrate garleate)) เป็นต้น

2.1.3 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ [9]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลักคือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเทอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการย่อยสลายโดยการฝังกลบ (Biodegradability & Compostability) [10]

ไบโอพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ และจุดประสงค์ของการย่อยสลายในเชิงพาณิชย์ โดยที่อุณหภูมิของการย่อยสลายสูงขึ้นจะสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลา 90-180 วัน มาตรฐานของนานาชาติส่วนใหญ่กำหนดให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้องย่อยสลายได้ 60% ภายใน 180 วัน ในที่นี้พลาสติกที่จะเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายโดยการฝังกลบได้นั้นต้องเป็นไปตามเกณฑ์ทั้ง 3 ชั้นนี้

1. เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegrade) คือ การสลายตัวได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและชีวมวล ที่อัตราการสลายตัวเดียวกับเซลล์โลส (กระดาษ)
2. เกิดการแยกส่วน (Disintegrate) คือ วัสดุสามารถแบ่งแยกออกจากกันได้ในกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งก็คือการแยกเป็นชิ้นเล็กมากจนมองไม่เห็นและแยกออกได้เป็นชิ้นๆ
3. ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-toxicity) คือ การย่อยสลายทางชีวภาพจะต้องไม่ก่อให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษและเมื่อย่อยสลายแล้วจะต้องเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เป็นพลาสติกที่จะย่อยสลายจากการกระทำของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) เชื้อรา (Fungi) เป็นต้น เป็นระยะเวลาหนึ่งจะสังเกตเห็นว่าการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นจะไม่มีสิ่งเป็นพิษตกค้างและทราบเท่าที่ไม่มีสิ่งตกค้างจึงยังคงเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ

2.1.5 การย่อยสลายของแป้ง [10]

1. การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธีคือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

1.1 การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

1.2 การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

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

1.3 การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยด่างดำ เป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้ มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะจากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์ที่สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

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

- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดร-กลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่อนรีดิวง และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,6 ไกลโคซิดิกของอะมิโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้งและเดกตรินไปเป็นกลูโคส

- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายอนรีดิวิง

2. การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งคัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาตินไนซ์โดยใช้ Direct Steam Injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยระดับถึงที่ต้องการหยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยการเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งคัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส โซโคเดคซ์ทริน

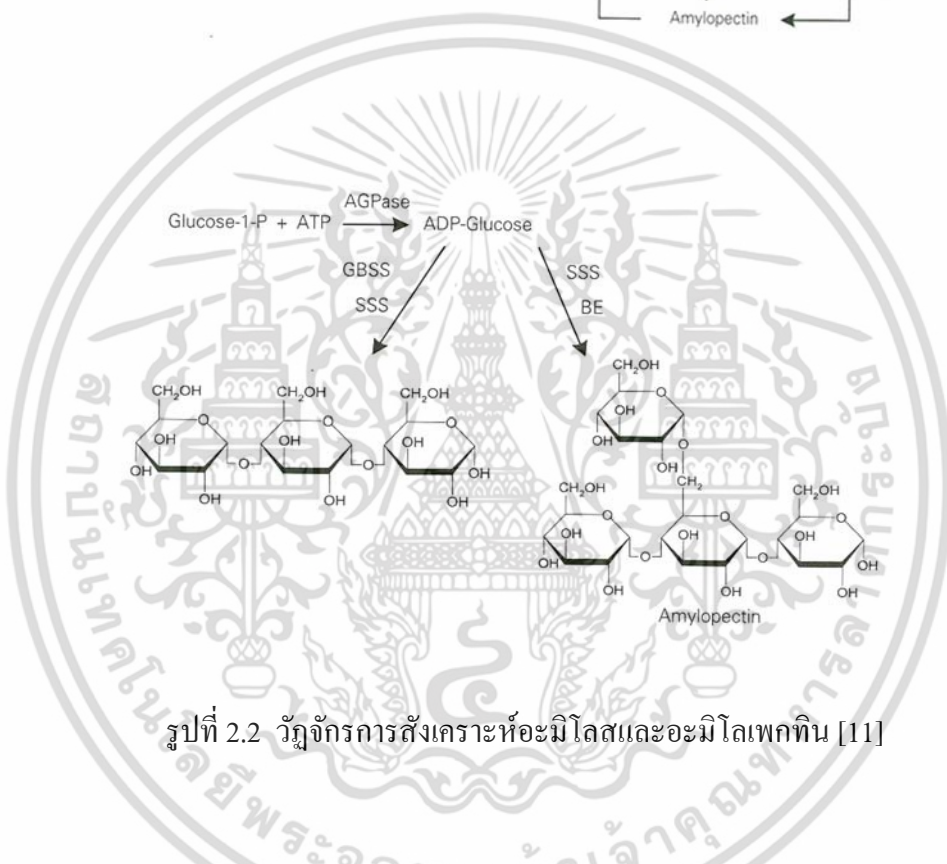
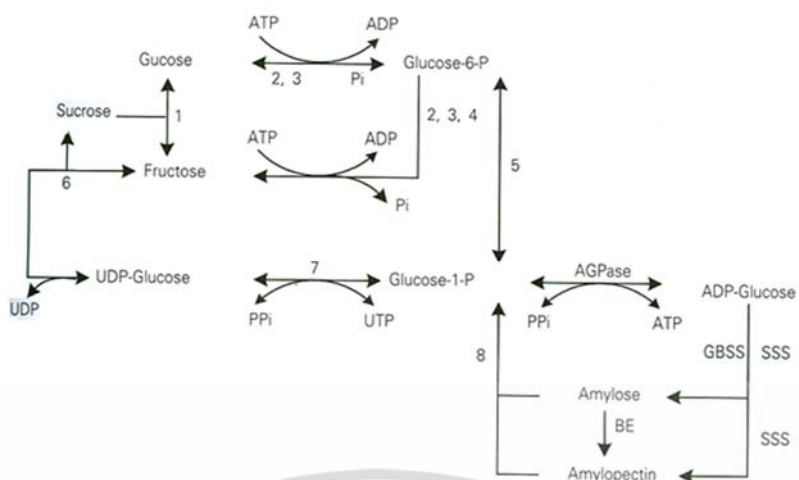
2.2 แป้ง [11]

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง [11]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งอาหารให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชียแอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ที่สำคัญที่มีการใช้ทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนชาติ เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น

2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง [11]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่ว ๆ ไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glycosidic Linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde Group) เรียกว่าปลายรีดิวิง (Reducing End Group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งดังภาพ แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 วิถีการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [11]

องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

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

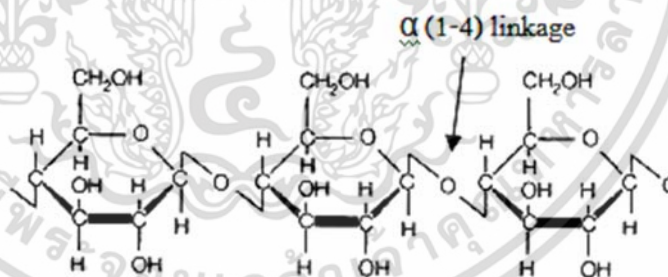
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [11]

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

2.2.2.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย
เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) ชนิด แอลฟา-1,4 ($\alpha - 1,4$) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะมิโลส [11]

แป้งจากรัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28%
แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาขามีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ
20% แป้งข้าวเหนียว (Waxy Starch) ไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมส (Amylomaize)
มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสใน
แป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไปแป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีที่มีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [11]

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

**หมายเหตุ : β -Amylolysis = % การย่อยแป้งโดย β -amylase

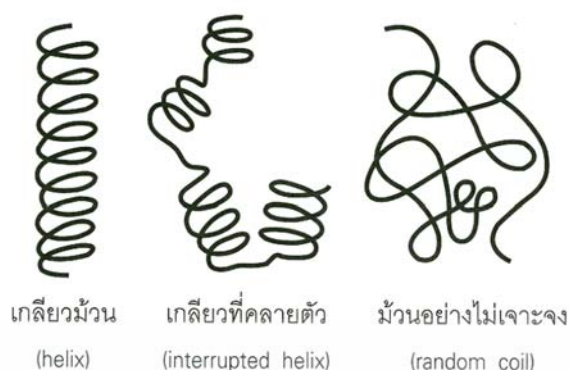
DP = Degree of Polymerization

NC = Average Number of Chain

CL = Average Chain Length

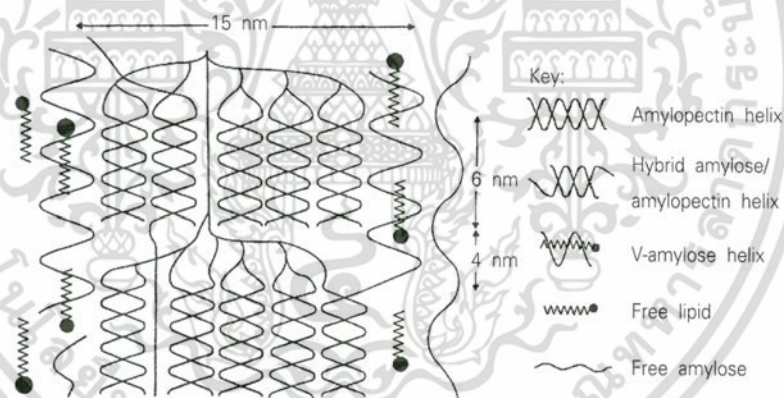
โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีอยู่หลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted Helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random Coil) ดังรูปที่ 2.4 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 อยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double Helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส [11]

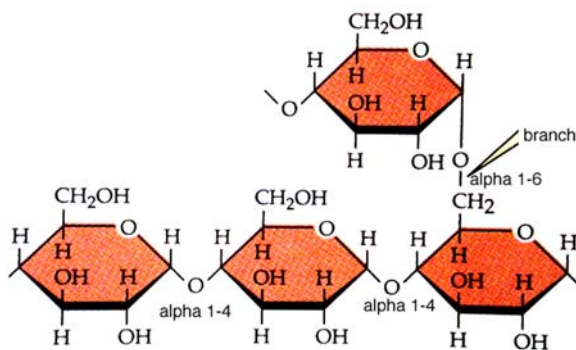
แบบจำลองของโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน (Monoacyl lipid) ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.5 อะมิโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระสภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินเป็นเกลียวคู่ (Double helix)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน [11]

2.2.2.2 อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน [11]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^8 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [11]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลเพกทิน(%)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย(DP)	ความยาวสายเฉลี่ย(CL)	จำนวนสายเฉลี่ย(NC)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย(ECL)	ความยาวสายภายในเฉลี่ย(ICL)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
อินดิกา (Indica,IR36)		4,700	21	220	14	6
จาโปนิกา (Japonica)		12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว (Waxy Rice)		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันฝรั่ง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันสำปะหลัง	83					

หมายเหตุ :DP = Degree of Polymerization

NC = Average Number of Chain

CL = Average Chain Length

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ECL = External Chain Length

ICL = Internal Chain Length

2.2.2.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะมิโลสและสารตัวกลางในแป้งสาลีมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอะมิโลเพกทินแต่มีกิ่งสั้นกว่า นอกจากนี้สารตัวกลางในแป้งข้าวโอ๊ตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะมิโลส แต่มีค่าสัมพรรคภาพไอโอดีน (Iodine Affinity) และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน (Blue Value) ต่ำกว่าอะมิโลสแต่มากกว่าค่าของอะมิโลเพกทิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่มีกิ่งที่ยาวกว่าปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช

2.2.3 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง [11]

ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.4

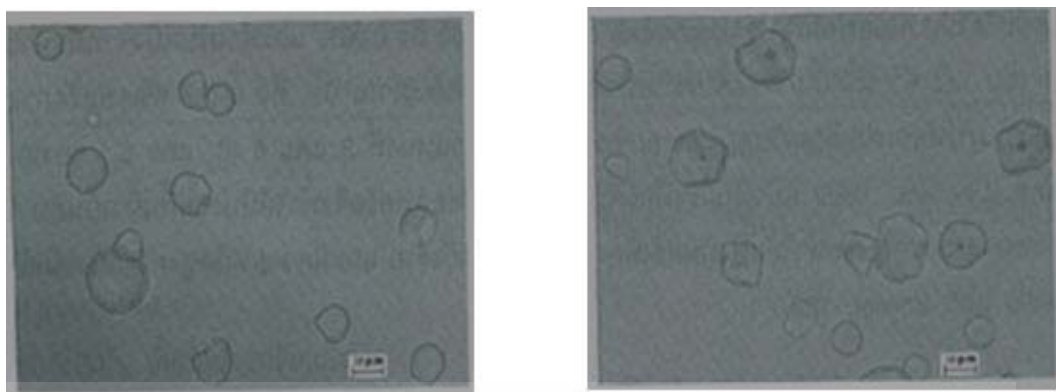
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ [11]

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

2.2.4 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง [11]

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.7) และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) (รูปที่ 2.8) พบว่าเม็ดแป้งมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous หรือ Gel phase) ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

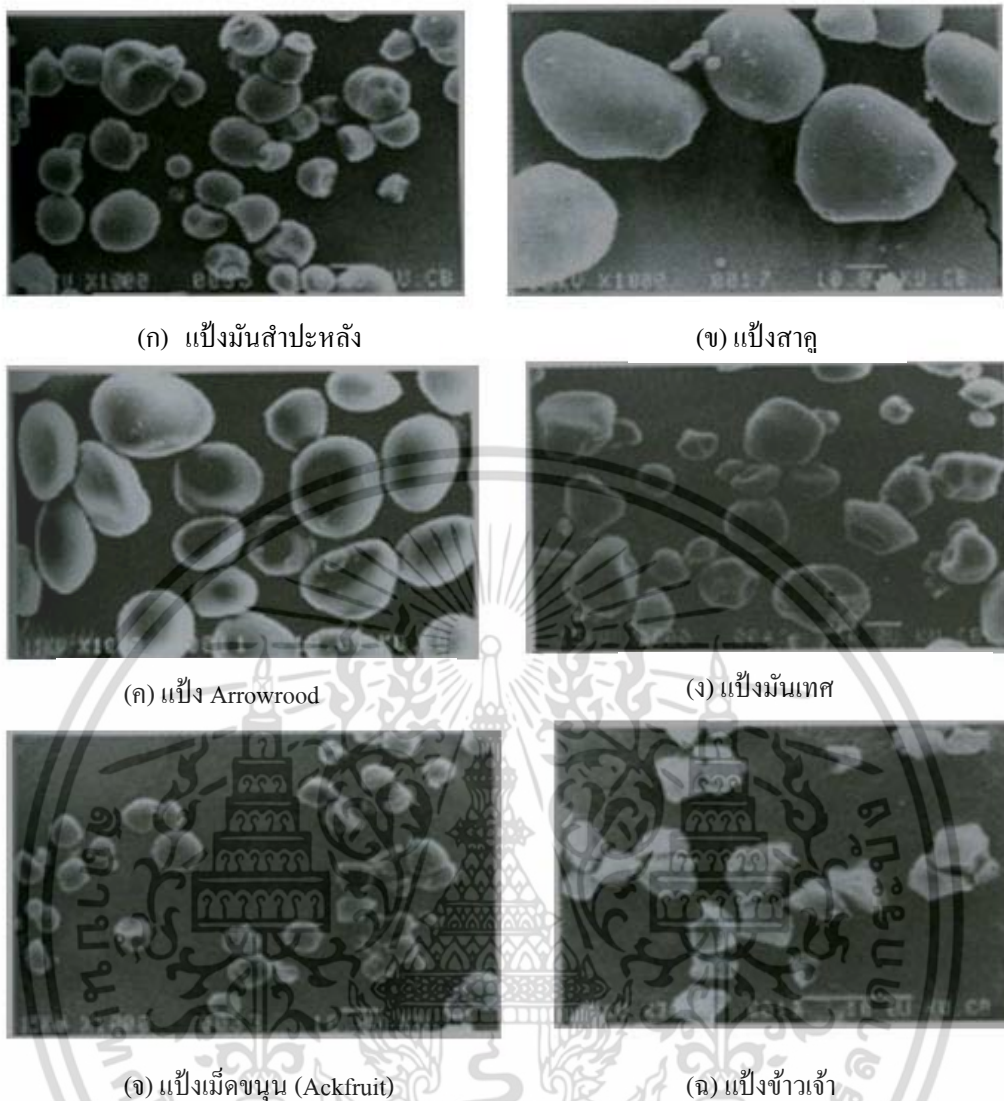


(ข) แป้งมันฝรั่ง

(ก) แป้งข้าวเจ้า

รูปที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา
(กำลังขยาย 40 เท่า) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่ กำลังขยาย (ก)-(จ) 1,000 เท่า และ (ฉ) 3,000 เท่า [11]

2.2.5 สมบัติของแป้ง [11]

2.2.5.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย [11]

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝรั่ง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถดูดน้ำได้ในปริมาณ 39.9, 42.9, 50.9 และ 51.4 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ

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

แป้งดิบไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายโมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลายความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น สมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปลงแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมากำจัดการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

2.2.5.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน [11]

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทีไน

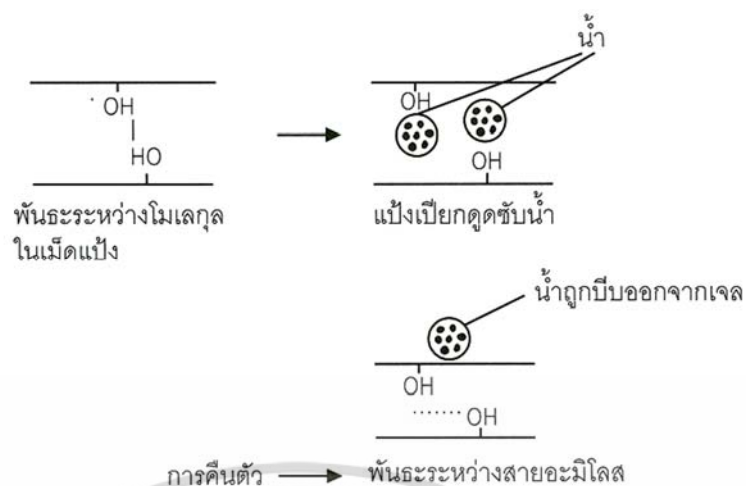
เซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาไนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Time) ซึ่งจะแตกต่างกันแป็งแต่ละชนิด แป็งจากพืชหัว เช่น แป็งมันสำปะหลัง แป็งมันฝรั่ง จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป็งธัญพืช

การเกิดเจลาทีไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้ อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (Micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (Birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป็งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

2.2.5.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [11]

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็น โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือ การคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [11]

การคั้นตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกขับออกมานอกเจล ในการคั้นตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเป็นเจลขุ่น ดังแสดงกลไกการคั้นตัวของแป้งรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการคั้นตัวของแป้ง [11]

ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคั้นตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคั้นตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคั้นตัวได้ช้าลงในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุบวกและลบ (Monovalent Anion และ Cation) แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย

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

2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch) [12]

แป้งดัดแปร (Modified starch) หมายถึงสตาร์ช (Starch) ที่ได้จากการนำแป้งดิบ (Native starch) มาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืด (Viscosity) ลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน กรรมวิธีการผลิตแป้งดัดแปรโดยวิธีทางเคมี กายภาพเอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์สตาร์ชที่นำมาใช้แปรรูปเป็นแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า เป็นต้น

2.3.1 ชนิดของแป้งดัดแปร [12]

- แป้งดัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี

เป็นแป้งดัดแปรส่วนใหญ่ที่มีการผลิตและใช้ในระดับอุตสาหกรรม เป็นแป้งที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างด้วยกระบวนการทางเคมีมีหลายชนิด ขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้ และระดับการดัดแปร (Degree of substitution, DS) เช่น

- แป้งไฮดรอกซีโทพิล (Hydroxypropyl starch)
- แป้งครอสลิง (Cross-linked starch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แป้งแอซิเตต (Acetate starch)
- แป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl starch) เป็นต้น

• แป้งดัดแปรทางกายภาพ

เป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้โครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ใช้พลังงานความร้อนหรือพลังงานจลน์หรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปสมบัติของแป้งจะเปลี่ยนไปเช่นกันแป้งในกลุ่มนี้ ได้แก่

- แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized starch)
- Granular cold water soluble starch
- Annealing starch
- Heat treatment starch
- Mechanical milling starch

2.3.2 ปฏิริยาการดัดแปรพอลิแซคคาไรด์ [13]

แป้งหรือพอลิแซคคาไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติที่สำคัญชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาและดัดแปร โครงสร้างโมเลกุลเพื่อให้ได้แป้งดัดแปรที่มีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมเตรียมแป้งดัดแปร เช่น แป้งอะซิเตตหรือแป้งอีเทอร์ มาใช้งานเนื่องจากแป้งดัดแปรดังกล่าวจะมีหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปและทำให้มีสมบัติด้านการคืนตัว (Retrogradation) ที่ดีขึ้น

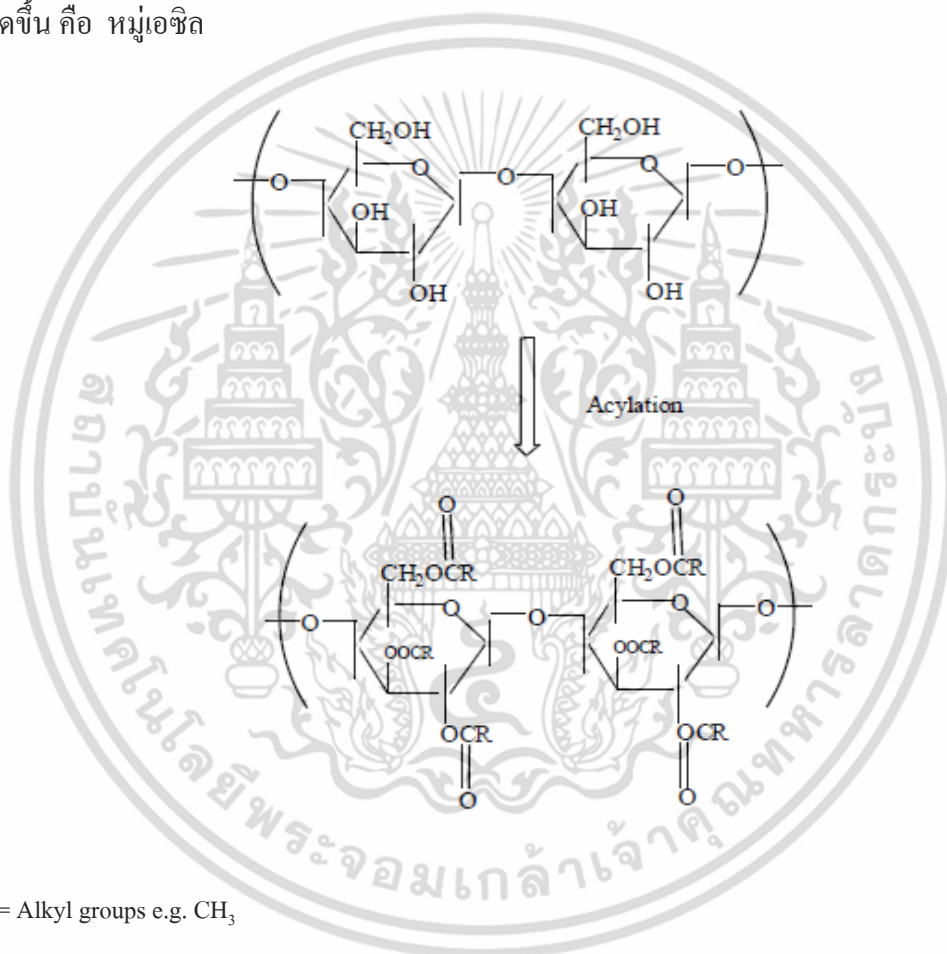
ในทางเทคโนโลยีพอลิเมอร์มีความสนใจในการพัฒนาวัสดุจากแป้งมันสำปะหลังโดยอาศัยข้อดีของแป้งในด้านของความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติและราคาถูก และความ เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยมาเป็นแรงจูงใจในการพัฒนาวัสดุจากแป้งดังกล่าว อย่างไรก็ตามการใช้แป้งมาเป็นวัสดุโดยตรงอาจจะมีข้อจำกัดในด้านการทนความชื้นและความ เปรราะของชิ้นงานรวมทั้งความสามารถในการผสมเข้ากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Compatibility) ที่ยังมีจำกัดปัจจัยเหล่านี้จึงนำไปสู่ความสนใจที่จะดัดแปร โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเพื่อให้หมู่ ฟังก์ชันและสมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไป

สำหรับปฏิริยาการดัดแปรแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยปฏิริยาจะ เกิดการแทนที่อะตอมไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งด้วยหมู่เอซิล (CO-R) ดังนั้นแป้งดัดแปร ที่ได้จึงมีหมู่ฟังก์ชันเป็นแบบเอสเทอร์โดยทั่วไปแล้วกลูโคสซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโมเลกุลแป้งจะมี หมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถถูกแทนที่ได้ 3 ตำแหน่ง คือ ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ดังนั้นระดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทนที่สูงที่สุดที่จะเกิดได้ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคสจึงมีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งอาจจะเรียกค่าดังกล่าวว่า Degree of substitution (DS)

2.3.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน หมายถึง ปฏิกิริยาการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของแป้งจาก หมู่ไฮดรอกซิลไปเป็นหมู่เอสเทอร์ (รูปที่ 2.11) โดยใช้สารที่ทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ (Esterifying agent) ชนิดต่างๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิกหรือแอนไฮไดรด์หรือไวนิลอะซิเตต เป็นต้น นอกจากนั้น ในบางครั้งอาจเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาเอซิลชัน (Acylation) เนื่องจากหมู่แทนที่ใหม่ที่เกิดขึ้น คือ หมู่เอซิล



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาเอซิลชันของแป้ง [13]

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในเบื้องต้นก่อนที่จะทำปฏิกิริยาตัดแปรร โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง คือ การที่จะต้องทำการเตรียมแป้งหรือกระตุ้นให้แป้งให้อยู่ในสภาพที่พร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับสารเคมี ก่อน (เรียกว่า ขั้นตอน Pre-activation) ทั้งนี้เนื่องจากว่า แป้งโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ อะมิโลเพกทินและอะมิโลส โดยในส่วนของอะมิโลส จะเป็นส่วนที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบอสัณฐาน ในขณะที่องค์ประกอบส่วนหลังที่กล่าวถึงจะเป็นส่วนที่มีความเป็นผลึก (โดยที่แป้งแต่ละชนิดจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารนี้มีความไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีได้ยากกว่าทำให้ปฏิกิริยาการแทนที่ของแป้งมีจำกัด การกระตุ้นแป้งจึงเท่ากับเป็นการทำให้โครงสร้างผลึกของอะมิโลสเปิดออก ซึ่งจะทำให้สารเคมีแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น วิธีการกระตุ้นแป้งที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถทำได้โดยการทำการกวนแป้งในตัวทำละลาย เช่น ไพรีดีน หรือ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ซึ่งจะทำให้อนุภาคเม็ดแป้งละลายและสารละลายแป้งที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น

ในกรณีที่ใช้สารละลายน้ำในการกวนแป้งพบว่าแป้งจะยังไม่ค่อยละลายได้ในน้ำเย็น (เนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างผลึกในอะมิโลส) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกวนสารละลายแป้งในน้ำให้สูงขึ้น (ประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป) พบว่า สารละลายแป้งจะมีความหนืดสูงขึ้น ในกรณีนี้พบว่าโครงสร้างผลึกของแป้งได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อน ได้ทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลในส่วนของอะมิโลส ทำให้น้ำแพร่เข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลแป้งได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดของแป้งสูงขึ้นและเรียกการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวว่า การเกิดเจล (Gelation) โดยแป้งเจลที่ได้จากการตกตะกอนแยกผลิตภัณฑ์จะสูญเสียลักษณะความเป็นอนุภาคไป (ในขณะที่แป้งที่กระตุ้นด้วยไพรีดีนหรือไดเมทิลซัลฟอกไซด์ [DMSO]) จะคงสภาพเป็นเม็ดแป้งอยู่ภายหลังการตกตะกอนแยกผลิตภัณฑ์ออกมาจากสารละลาย (แต่การใช้ไพรีดีนจะมีอันตรายและมีกลิ่นที่รุนแรงกว่าการใช้ DMSO) ซึ่งลักษณะทางกายภาพของแป้งที่ได้เช่นความเป็นผงหรืออนุภาคอาจจะมีผลต่อความสะดวกในการนำแป้งคัดแปรไปใช้งานต่อไป

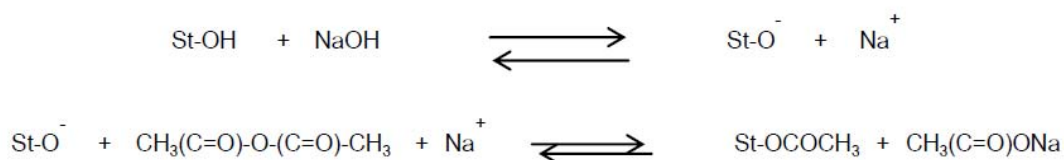
1. การทำปฏิกิริยาโดยใช้แอนไฮไดรต์

การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งทางอ้อมโดยใช้สารอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น แอนไฮไดรต์หรือเอซิลคลอไรด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งเพื่อลดปัญหาเรื่องกรด ทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการเสื่อมสภาพ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้สารแอนไฮไดรต์จะสามารถเกิดได้ทั้งในระบบที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (Aqueous media) และในระบบที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous media) นอกจากนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีถ้ามีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีลักษณะเป็นเบสหรือเป็นสารที่สามารถรับโปรตอนได้

2. การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง

ในกรณีที่ทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางจะทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปซึ่งสารละลายเบสดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำให้โมเลกุลแป้งเกิดการแตกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเป็นแป้งประจุลบ จากนั้นประจุลบที่ตำแหน่งออกซิเจนของแป้งจึงเข้าทำปฏิกิริยากับแอนไฮไดรด์ที่ตำแหน่งพันธะคาร์บอนิลดังกล่าวที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกปฏิกิริยาเอซิเลชันของแป้งโดยใช้สารแอนไฮไดรด์ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

จากกลไกในรูปที่ 2.12 มีข้อสังเกตว่าจะมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้นคือเกลือโซเดียมของกรดคาร์บอกซิลิกที่แตกตัวมาจากสารแอนไฮไดรด์ (เช่น โซเดียมอะซิเตตหรือโซเดียมโพรพิโอเนต) นอกจากนี้แป้งเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นและอยู่ในตัวกลางสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อาจจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) หรือคล้ายๆ กับเกิดปฏิกิริยาสaponification ของแป้งเอสเทอร์ในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาเอซิเลชันซึ่งจะมีผลทำให้หมู่แทนที่ของแป้งเอสเทอร์ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาในการดำเนินปฏิกิริยานานๆ

ข้อสำคัญในการดำเนินปฏิกิริยาในระบบนี้ คือ การที่จะต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในขณะทำปฏิกิริยาให้เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วควรควบคุมให้ค่า pH อยู่ที่ประมาณ 8 เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ตามกลไกในรูปที่ 2.12 ซึ่งสามารถทำได้โดยค่อยๆ หยดแอนไฮไดรด์ลงไปในช่วงทำปฏิกิริยาควบคู่ไปกับการหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อควบคุมให้ค่า pH อยู่ในระดับที่ต้องการโดยหยดสารแอนไฮไดรด์ลงไปทีละน้อยเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอาจจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนแป้งกลายสภาพเป็นเจล

2.4 แป้งมันสำปะหลัง [14]

ถิ่นกำเนิดของมันสำปะหลังอาจกล่าวได้ว่าอยู่ในอเมริกาใต้ บราซิล/เม็กซิโก มีการเรียกชื่อต่างๆ กันตามรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส เช่น Cassava, Mandioca, Yucca, Tapioca และ Manioc ในทางพฤกษศาสตร์มันสำปะหลังเป็นพืชในวงศ์ (Class) ใบเลี้ยงคู่

(Dicotyledoneae) ตระกูล (Family) Euphobiaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. (แต่เดิมมีการใช้ชื่อว่า *Manihot utilissima* Pohl.)

2.4.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง [14]

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจาก ใบและ ส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้งไว้ในราก ความสามารถในการ สร้างและสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจาก พันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว และปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของ หัวมันอาจจะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมัน สำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝน เพียงพอ และ ไม่มีฝนตกชุกขณะ เก็บเกี่ยว จะมีส่วนประกอบแสดงได้ดังนี้

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

องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เส้นใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

จะเห็นว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้น นอกจากน้ำแล้วคือแป้ง ซึ่งมีถึง ร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคน และสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อยและความหนาแน่นของหัวจะมีสูง ฉะนั้น ในการตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้ง (เชื้อแป้ง) อย่างเร็วที่นิยม ทำกัน คือ การตรวจสอบ ความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำ น้อย แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำมาก และมีแป้งน้อย ในกรณีกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก

2.4.2 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง [11]

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีสตาร์ชอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณ โปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (< 1%) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ และอาจมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ด เม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางอยู่ในช่วง 3-40 ไมครอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่ง (5-100 ไมครอน) แต่ใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้า ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจดูด้วย X-ray Diffractometer จะมีทั้งที่แบบเป็น A และแบบ C ที่ใกล้เคียงกับแบบ A (C_A) และมีปริมาณผลึก (%Crystallinity) 15-18%

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

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองขึ้น ซึ่งกำลังการพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน สารอื่นๆ ที่มีอยู่ในแป้ง เช่น ไขมัน หมู่ฟอสเฟต เป็นต้น แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของอะมิโลสที่เป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และอะมิโลสอาจจับตัวกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ จึงมีกำลังการพองตัวที่ดี และมีค่าความสามารถในการละลายได้ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวสูง โดยกำลังการพองตัวซึ่งวัดได้จากน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวอย่างอิสระในน้ำต่อน้ำหนักแห้งของแป้ง จะมีค่าประมาณ 50 และละลายได้ประมาณ 35% ที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งมีค่ามากกว่าแป้งข้าวโพด แต่ต่ำกว่าแป้งมันฝรั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **อุตสาหกรรมสิ่งทอ**

อุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นจะต้องใช้แป้งมันสำปะหลังด้วย โดยด้ายที่จะใช้ ทอผ้านั้น จะต้องผ่านการชุบแป้งเปียกก่อนด้ายจึงจะลื่นและเรียบไม่มีขนและเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ การใช้แป้งมันสำปะหลังในการทอผ้านั้น บางโรงงานยังใช้แป้งเคมี (modified starch) ที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะคุณสมบัติเหมาะสมกว่า แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานในประเทศที่เริ่มผลิตแป้งเคมีจากแป้งมันสำปะหลัง ขึ้นแล้ว

- **อุตสาหกรรมไม้อัด**

แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เพราะแป้งมันมีคุณสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหนาแข็งแรงและทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะ กาวที่ผลิตได้นั้น ใช้แป้งเป็นส่วนผสม ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่นๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอน เมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าด้วย

- **อุตสาหกรรมกระดาษ**

การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่าง ๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็ก ๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยการจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ และยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึก เวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี นอกจากนี้ กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

- **อุตสาหกรรมกาว**

แป้งมันมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อน หรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียว และมีคุณสมบัติสามารถรักษา สภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว แป้งมันที่จะใช้ทำกาวจะต้องเป็นแป้งบริสุทธิ์ มีความเป็นกรดต่ำ ซึ่งก็คือ แป้งประเภทเด็กชทริน กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่

จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย สติกเกอร์ Gummed paper และ Gummed tape

- **อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม**

คุณสมบัติสำคัญของแป้ง คือ เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต แต่ยังมีคุณสมบัติอื่นที่ทำให้แป้งมันสำปะหลังเข้ามามีบทบาทสำคัญใน อุตสาหกรรมอาหารนั้น คือ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้น (Thickmer) ในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว (Stabilizer) ช่วยให้อาหารเกาะตัวกันดีขึ้น (Binder) และช่วยในการเสริมแต่ง (Filler) นอกจากนี้ แป้งยังเป็นสิ่งที่หาได้ง่าย และราคาค่อนข้างถูก (Glucose) เด็กซ์โทรส (Dextrose) อาหารเด็ก ผลิตภัณฑ์ขนมปัง ขนมหวานสำเร็จรูปไส้ขนมพาย อาหารกระป๋อง บะหมี่ เครื่องดื่ม ไอศกรีม แยม ผลไม้กระป๋อง นมเปรี้ยว ไส้กรอก กุนเชียง ซอส และ โซดาทำขนม เป็นต้น

ซอสต่างๆ เช่น ซอสมะเขือเทศ อาหารกระป๋อง ใช้แป้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้น ไม่ให้อาหาร หรือซอสตกตะกอน โดยจะใช้แป้งเป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 3 - 4 ของน้ำหนักอาหาร แป้งที่ใช้เป็น แป้งแปรรูปประเภท Cross - linked starch และ Hydroxypropylated starch

ลูกกวาด ใช้แป้งแปรรูปประเภท Hydroxypropylated starch เพื่อให้ลูกกวาดมีความแข็ง ไอศกรีมลักษณะของไอศกรีม คือ การตีแป้งให้ฟองและไม่ต้องการให้ฟองยุบ ดังนั้นจึงต้องเติมแป้งประเภท Gum ซึ่งมีคุณสมบัติ ทำให้อาหารคงสภาพที่ต้องการ

- **วัสดุภัณฑ์ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ**

นำแป้งมันสำปะหลังมาแปรสภาพคล้ายพลาสติก ซึ่งเมื่อเติมสาร โพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ตามธรรมชาติ ก็จะทำให้เกิดเป็นสารผสม ที่สามารถนำไปทำเป็นวัสดุภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทน พลาสติก

- **อุตสาหกรรมสารความหวาน**

ทำน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส แคร็กโตส ซอลบิทอล และใช้แทนน้ำตาลซูโครสในผลไม้กระป๋อง แยม และอื่น ๆ

- **อุตสาหกรรมกระดาษ**

ใช้ผลิตกระดาษซึ่งเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้กระป๋อง เครื่องดื่มชูกำลัง และใช้ในอุตสาหกรรมยา

- **อุตสาหกรรมผงชูรส**

เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตผงชูรส ซึ่งนิยมบริโภคกันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ยารักษาโรค

ใช้เป็นตัวเจือจางในยาประเภทแคปซูลและยาเม็ด

- มันเส้นและมันอัดเม็ด

- อาหารสัตว์

ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์หลากหลายชนิด อาทิ โค สุกร เป็ด ไก่ เป็นต้น

- เอทานอล (การผลิตเอทานอล)

เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงอื่น

- แอลกอฮอล์

นำไปใช้ในการผลิตสุรา และยาฆ่าเชื้อโรค

2.5 จี๊เลื่อย [15]

จี๊เลื่อยหรือไม้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายชนิดที่มีความยุ่งยากซับซ้อนแตกต่างกันไปแปรตามชนิดของไม้แต่องค์ประกอบที่สำคัญของจี๊เลื่อยหรือไม้ประกอบด้วยสารสำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ รองลงมาคือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin)

2.5.1 องค์ประกอบของจี๊เลื่อย [15]

เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของ β -Glucose ต่อกันด้วยพันธะ $\beta(1-4)$ ที่มีสูตรทั่วไปว่า $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชโดยจะพบอยู่ร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนแกม (Gum) แทนนิน (Tannin) ไขมันสารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาวและแข็ง การย่อยเซลลูโลสจะได้ Cellobiose และสุดท้ายจะได้กลูโคส โดยเอนไซม์ β -Glucosidase จำนวนกลูโคสที่มาต่อกันหรือ Degree of Polymerization (DP) จะมีค่าแตกต่างกันและสามารถมีค่า DP สูงถึง 10,000 หน่วยและอาจมีน้ำหนักโมเลกุล 1,620,000 รูปที่ 2.15(ก) แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ถ้าใช้สมบัติการละลายในโซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ของเซลลูโลสสามารถแบ่งประเภทเซลลูโลสได้ 3 ประเภท

- α -cellulose: ไม่ละลายในสารละลาย 17.5% ของโซดาไฟที่อุณหภูมิห้อง
- β -cellulose: ละลายในสารละลาย 17.5% ของโซดาไฟและตกตะกอนได้ง่ายเมื่อทำให้สารละลายเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- γ -cellulose: ละลายในสารละลาย 17.5% ของโซดาไฟไม่ตกตะกอนในกรดแต่ตกตะกอนได้โดยแอลกอฮอล์

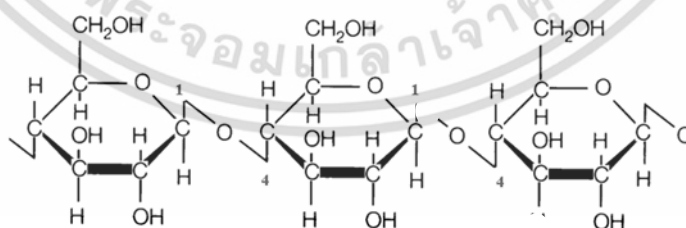
เซลลูโลสมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.55 และมีเพียง α -cellulose เท่านั้นที่จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ส่วนโฮโลเซลลูโลส (Holo-cellulose) จะเป็นคำที่ใช้เรียกคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดของพืชซึ่งได้ภายหลังจากแยกลิกนินแล้ว

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเพนโตแซน (Pentosan)

เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนของพืชที่สามารถละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% ที่อุณหภูมิต่ำได้ซึ่งต่างจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลเพนโตสมากกว่ากลูโคสและมีค่า DP ต่ำกว่า (ประมาณ 40 หน่วย) ไม่ละลายน้ำ ส่วนเพนโตแซนเป็นรูปหนึ่งของเฮมิเซลลูโลสและสามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลสและเพนโตแซนส่วนมากจะเป็น Heteropolysaccharides ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลที่แตกต่างกัน 2-4 ชนิด ส่วนมากจะเป็นน้ำตาลไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) และกรดยูโรนิก (Uronic acid) ถ้านำเพนโตแซนมาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเดือดจะได้เฟอร์ฟูรัล (furfural) รูปที่ 2.15(ข) แสดงโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ลิกนิน (Lignin)

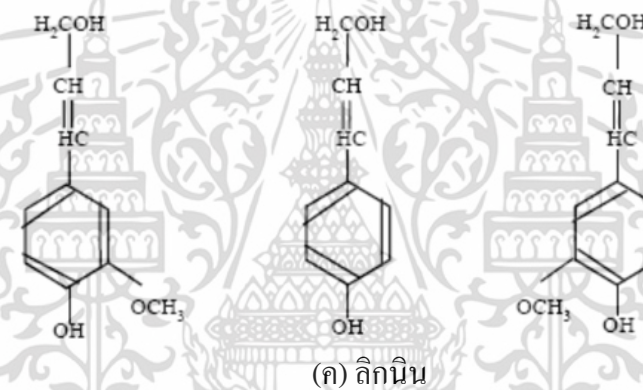
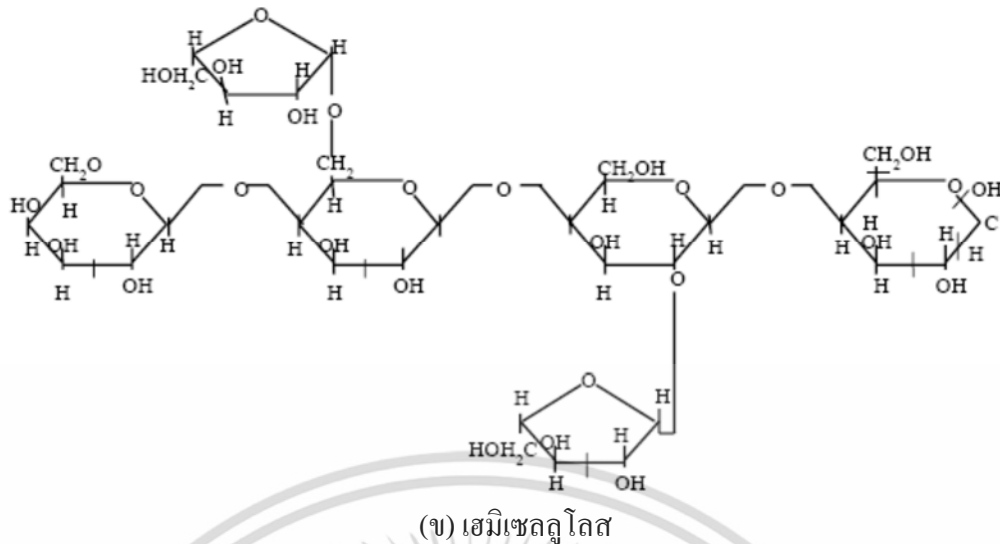
ลิกนินเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีสูตรโมเลกุล $C_{49}H_{52}O_{14}$ โครงสร้างจะประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ฟีนอลและไม่มีหมู่เมทิลดังแสดงในรูปที่ 2.14(ค)



cellulose (เซลลูโลส)

(ก) เซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) เฮมิเซลลูโลสและ (ค) หน่วยย่อยของลิกนิน

[15]

2.5.2 ประโยชน์ของขี้เลื่อย [15]

ส่วนใหญ่ในโรงงานที่ผลิตเฟอร์นิเจอร์หรือโรงงานที่มีการใช้ไม้เป็นวัตถุดิบขี้เลื่อยที่เหลือนี้เป็นของเสียแต่เราสามารถนำขี้เลื่อยเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้คือ

1. การนำขี้เลื่อยไปผลิตเป็นปุ๋ยเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม
2. การนำขี้เลื่อยไปใช้เป็นแหล่งเพาะชำต้นไม้เนื่องจากขี้เลื่อยเก็บความชื้นได้ดี
3. การนำขี้เลื่อยไปผสมกับพอลิเมอร์เป็นวัสดุคอมโพสิต
4. การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พลาสติไซเซอร์ [16]

เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อทำให้วัสดุอ่อนตัวและโค้งงอได้ได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติ ดังนี้

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง และมีน้ำหนักอย่างน้อยประมาณ 300
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับพลาสติที่ต้องการผสม
3. พลาสติไซเซอร์ไม่ควรตกผลึกที่อุณหภูมิใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้

หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติไซเซอร์ คือ ช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ (Bond rotation) ลดลง ทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature) ทั้งนี้ เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับพอลิเมอร์จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงเท่ากับเป็นการลดการแข็งแรงของพอลิเมอร์ลง

หน้าที่สำคัญของพลาสติไซเซอร์ คือ

- 1) ลดความหนืดโดยกระทำตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่น เพื่อลดแรง Van der waal's ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์แต่แตกต่างจากตัวทำละลายที่ว่า ต้องมีน้ำหนักโมเลกุล ประมาณ 300 เพื่อที่จะไม่ระเหยออก ออกจากพลาสติระหว่างใช้งาน
- 2) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวในการโค้งงอ (Flexibility) โดยทำการลด T_g ของพอลิเมอร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง แต่ทำให้มีการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความทนแรงกระแทก (Impact Strength) เพิ่มขึ้น

2.7 สารหล่อลื่น (Lubricants) หรือสารปลดปล่อย (Releasing agent) [17]

สารหล่อลื่นนิยมเรียกเป็นสารแยกส่วน (Parting agents) โดยสามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก เช่น นำมาใช้กับผิวของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆ เกาะผิวของโลหะ ช่วยป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะเปียกน้ำ หรือ เปื้อนสารหล่อลื่นในสารประเภทเทอร์โมพลาสติคและเทอร์โมเซตไม่ให้มีปัญหาในเรื่องการติดของชิ้นงานกับโลหะเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 หน้าที่ของสารหล่อลื่น (Functions of lubricants)

การนำสารหล่อลื่นมาใช้จะช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ และลักษณะการไหลที่ดีขึ้น ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการลง ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวรวมเป็นเนื้อเดียวกับองค์ประกอบอื่นๆ ช่วยประหยัดพลังงาน และเพิ่มผลผลิตในการผลิต นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เม็ดพลาสติกที่มีสารหล่อลื่นอยู่ ทำให้การไหลในอุปกรณ์ป้อนวัสดุเป็นไปได้ด้วยดี
- ควบคุมความร้อน เนื่องจากแรงเสียดทานและอัตราความร้อน
- ลดความหนืดของหลอมเหลว และกำลังที่ต้องใช้ ทำให้เกิดการไหลได้อย่างรวดเร็ว
- ลดการบวมของคาย
- ลดการเสียดคุณภาพเนื่องจากความเค้น (Shear degradation)
- ช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์ทางกระบวนการ เช่น คาย แม่พิมพ์ หรือ ลูกกลิ้งได้ง่ายขึ้น
- เพิ่มความเงา (Gloss)
- ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะ ได้แก่ สารป้องกันการกรบดล็อก (Anti-blocking) ในไวนิลส์ และสารทำให้เกิดการลื่นไถล (Slip agents) ในพอลิโอฟิโนล โดยสารทั้งสองชนิดนี้อาจทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกิดหมอกในตู้เย็น ผลิตภัณฑ์ที่เย็นจัด และการป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น
- นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารหล่อลื่นในเกียร์และฝาประกับเพลลา ที่นิยมใช้ ได้แก่ โมดิบดินัมซัลไฟต์ (MoS₂) ทองเหลือง กราไฟต์ ผงพอลิเอทิลีน และผงเทลลอน

2.7.2 สารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก [17]

(Internal and External Lubricants)

สารหล่อลื่นภายในละลายได้ดีในพอลิเมอร์และทำหน้าที่เหมือนกับสารปรับสภาพพลาสติกจำนวนเล็กน้อยหรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแตกออก เกิดการไหลไปมาได้ จึงช่วยความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ เช่น สารหล่อลื่นภายในที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้แก่ ไกลคอล มอนอสเตียเรท (Glycol monostearate, GMS) บิวทิล สเตียเรท (Butyl stearate) และกลีเซอรอล ไดสเตียเรท (Glyceryl di stearate) ส่วนสารหล่อลื่นภายนอก จัดเป็นสารที่ละลายได้ดีเพียงครั้งหนึ่งหรือไม่เข้ากันเลย (Semi-compatible or incompatible) กับพอลิเมอร์และอยู่ตรงบริเวณผิว โดยสามารถควบคุมอัตราได้ (Controlled rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะปล่อยพอลิเมอร์ให้หลุดออกจากอุปกรณ์ในกระบวนการหรือเพื่อลดแรงเสียดทานและการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายในการนำไปใช้ได้จริง เช่น สารหล่อลื่นภายนอกที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้แก่ พาราฟินส์แวกซ์ (Paraffin waxes) กรดสเตียริก (Stearic acid) และกรดมอนอแทนนิคเอสเทอร์ (Monotanic acid ester) สารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอกยังมีลักษณะเฉพาะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย รวมทั้งปัจจัยที่มีผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.5-2.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [17]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายในต้องสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์หลักที่ใช้	1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายนอกไม่สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์หลักที่ใช้
2. สารหล่อลื่นภายในทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล	2. สารหล่อลื่นภายนอกมีความสามารถในการละลายได้ดีกับพอลิเมอร์หลักค่อนข้างต่ำ และเกิดเป็นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยวอยู่ระหว่างอนุภาคของพอลิเมอร์และผิวโลหะร้อน ทำให้ลดแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลลง
3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายในคือการลดความหนืดของหลอมไหล ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมไหลได้โดยไม่มีผลต่อการหลอมของสารประกอบ	3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายนอก คือ ลดความเสียดทานระหว่างอนุภาคในกระบวนการหลอม ด้วยเหตุนี้ จึงมีผลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการหลอมสูตรผสม
4. ภายหลังการหลอม สารหล่อลื่นภายในมีผลต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์	4. ภายหลังการหลอม สารหล่อลื่นภายนอกจะอยู่ข้างผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลวและมีผลในการเตรียมสารหล่อลื่นด้านผิวโลหะร้อนของอุปกรณ์ในกระบวนการ

ตารางที่ 2.6 ข้อดี และ ข้อเสีย ของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [17]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
ข้อดี <ol style="list-style-type: none"> 1. เพิ่มความเร็วในการอัดแบบได้โดยไม่ให้ชิ้นงานเกิดการไหม้ร้อนเนื่องมาจากความเสียดทาน 2. ลดการเกิดการบวมของคาย 3. ป้องกันการเกิดรอยยุบตัวของชิ้นงาน 4. ปรับปรุงการเติมเต็มของคาย 5. ไม่มีผลต่อการพิมพ์ หรือการทาสี 6. มีความใสดี 7. ส่งเสริมให้เกิดการไหล 	ข้อดี <ol style="list-style-type: none"> 1. มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยชิ้นงานให้ออกจากผิวของโลหะ 2. ช่วยให้วัสดุเกิดความเงา 3. ช่วยเพิ่มผลิตผลในการผลิต
ข้อเสีย(เกิดเมื่อมีการใช้ในปริมาณที่มากเกินไป) <ol style="list-style-type: none"> 1. ลดอุณหภูมิการเบี่ยงเบนทางความร้อน 	ข้อเสีย(เกิดเมื่อมีการใช้ในปริมาณที่มากเกินไป) <ol style="list-style-type: none"> 1. ทำให้เกิดการรอยแยกและชิ้นงานหลุดออกเป็นชิ้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในบางครั้งทำให้สมบัติเชิงกลลดลง	2. ความแข็งแรงของรอยต่อ (Weld line) ต่ำ
3. มีแนวโน้มไหลออกจากผลิตภัณฑ์ถ้าคุณภาพไม่ดีพอ	3. เกิดการไหลออก (Exudation) ส่งผลให้ความสามารถในการพิมพ์ ส่งผลให้ความสามารถในการทาสี การทำลามิเนต และความใส ลดต่ำลง
4. ต้องใช้ปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมเพื่อให้ผลที่ดีขึ้น	4. มีผลทำให้การหลอมเหลวลดลง
	5. เนื่องจากการหลอมที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกลดต่ำลง

ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [17]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
1. ความเข้มข้น : เมื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้การไหลดีขึ้น แต่ความสามารถในการละลายไม่ควรมากเกินไป มิฉะนั้นสมดุลของสารหล่อลื่นภายนอกจะถูกรบกวน	1. ความเข้มข้น : เพื่อให้ผลของสารหล่อลื่นภายนอกสำเร็จควงทำให้ผลคูณการละลายของพอลิเมอร์หลักมีมากขึ้นหรือลดน้อยลง
2. ความสามารถในการละลาย : ถ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุเข้ากันได้มากขึ้น มีผลต่อการเป็นสารปรับสภาพพลาสติกมากขึ้น และ การไหลดีขึ้นด้วย	2. อุณหภูมิของกระบวนการ : ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากสารหล่อลื่นภายนอกทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.8 คอมโพสิต (Composites) [16]

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

โดยนิยาม คอมโพสิต (Composites) คือวัสดุประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันเห็นได้ชัดเจน (Distinct components) อยู่ด้วยกัน โดยเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกันแล้วทำให้เกิดสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ดีขึ้น โดยเฉพาะการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นหรือเกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) องค์ประกอบสองส่วนของคอมโพสิตคือ

1. **ส่วนเสริมแรง (Reinforcement หรือ Reinforcing component)** คือส่วนที่เป็นโครงสร้าง ที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิตวัสดุที่เป็นเสริมแรงมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

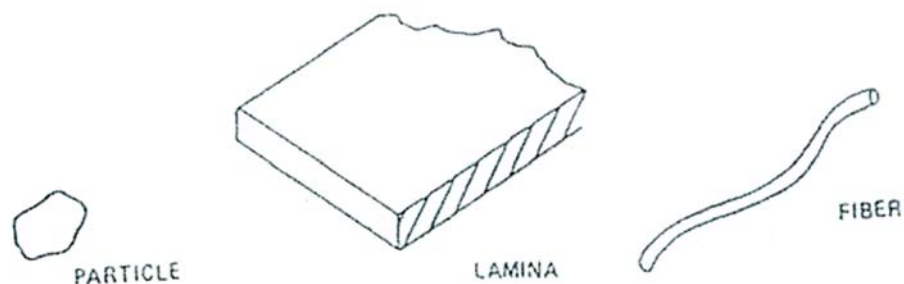
คอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibers) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous หรือ Chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ

2. **เมทริกซ์ (Matrix)** เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกซ์

2.8.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites) [16]

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. **คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites)** คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ
2. **คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites)** คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)
3. **คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites)** คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Bead) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)



รูปที่ 2.15 ลักษณะของส่วนเสริมแรงในคอมโพสิต [16]

2.8.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต [16]

วัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้สามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/Density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific stiffness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติตามต้องการ (Tailor-made properties) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เลือกชนิดเส้นใยและเมทริกซ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน กำหนดปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต การจัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง ฯลฯ
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและแดมป์ (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพต่อรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

อย่างไรก็ดีวัสดุคอมโพสิตมีข้อเสียหรือข้อจำกัดบางประการคือ

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

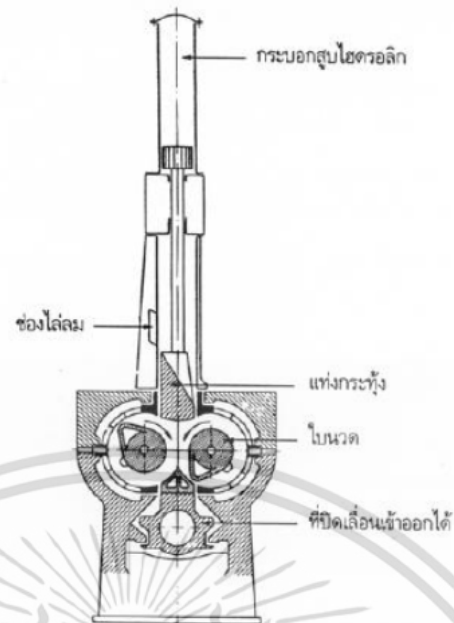
2.9 การคอมปาวด์ (Compounding) [18]

การคอมปาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆกับพลาสติกโดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอมจากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเทคนิคการคอมปาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็นการคอมปาวด์แบบรุ่น (Batch compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

2.9.1 การคอมปาวด์แบบรุ่น (Batch compounding) [18]

2.9.1.1 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)

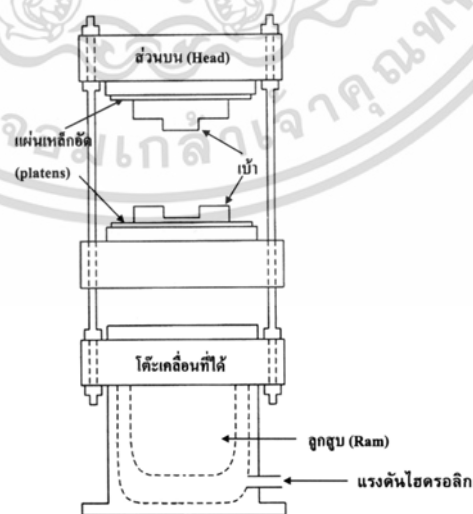
เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ภายในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมากจึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อนเนื่องจากการผสมทำในระบบปิดขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก



รูปที่ 2.16 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [18]

2.10 เทคนิคการอัด (Compression Molding) [19]

ในเทคนิคการอัดส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิดและเปิด เบ้าได้เนื่องจากเบ้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อนระบบไฮดรอลิก และอาจจะมีอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องที่ใช้แปรรูปพลาสติกโดยการอัด แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องอัด (Compression Molding) [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 เทคนิคการอัด

การแปรรูปโดยการอัด เริ่มจากการฉีดเบ้าติดต่อกับแผ่นเหล็กอัด (Platens) ทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อน โดยตั้งอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Cross-linking reaction) ตามชนิดของเทอร์โมเซตที่ใช้ โดยทั่วไปอุณหภูมิของเบ้าสำหรับการอัดเทอร์โมเซต อยู่ในช่วง 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมกับสารเติมแต่ง ชนิดต่างๆ และได้เตรียมให้อยู่ลักษณะผงหรือเม็ด โดยเติมปริมาณของคอมปาวด์ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดเบ้า โดยใช้แรงอัดที่เหมาะสม เนื่องจากคอมปาวด์ร้อนขึ้นจะเกิดการอ่อนตัวและผลจากการใช้แรงอัด ทำให้วัสดุเกิดการไหลเข้าในช่องว่าง (Cavities) ของเบ้า ในขณะที่เดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง หลังจากปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเวลาหนึ่ง กล่าวคือ ตามระยะเวลาการสุก (Cure time) ของเทอร์โมเซตนั้นๆ ปิดเบ้า เอาชิ้นงานออกขณะร้อนเติมคอมปาวด์ลงในเบ้าเพื่อเริ่มต้นวัฏจักรใหม่

เวลาของการทำการอัดในแต่ละรอบ หรือวัฏจักรของการอัด (Cycle time) ค่อนข้างนาน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง กล่าวคือต้องใช้ระยะเวลาให้นานพอในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ และในขณะที่ทำการอัดเบ้าจะเกิดก๊าซขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้เสียเวลาในการไล่ก๊าซออกของเบ้า เพื่อที่จะลดเวลาของการแปรรูปได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการอัดเบ้าหลายรูปแบบ

2.10.2 ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด

การอัดเบ้าเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน แต่ยังมีใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เช่น การฉีดเข้าเบ้า เข้ามาแทนที่ แต่เทคนิคการอัดยังมีความสำคัญในการแปรรูปพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบจากการใช้เทคนิคการอัดหลายประการดังสรุปได้ดังต่อไปนี้

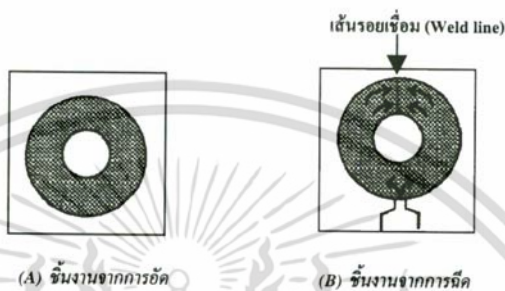
- เบ้าราคาถูกและผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุน้อยมาก กล่าวคือมีส่วนที่เป็น Flash จากการอัดเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2-5% เท่านั้น)
- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Orientation) น้อยมาก เนื่องในระหว่างการอัด เกิดการไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติกบางชนิดมาก
- เครื่องอัดมีราคาถูกกว่า เครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld lines) บนชิ้นงาน เช่นเดียวกับการเกิดในการแปรรูป โดย

การฉีดพลาสติกเข้าเบ้า (Injection molding) เส้นรอยเชื่อมเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกหักได้ง่าย ตัวอย่างของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ที่ได้จากการอัด และการฉีดพลาสติก เข้าเบ้า แสดงดังในรูปที่ 2.19

- เบ้าที่ใช้ในการอัดไม่มีท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gates) จึงทำให้ไม่มีรอยตำหนิ (Scars) บนชิ้นงาน ในตำแหน่งที่ต้องตัดส่วนประตูเข้า หลังจากถอดชิ้นงานออกจากเบ้า เช่นเดียวกับกรณีการฉีดเข้าเบ้า



รูปที่ 2.18 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดและการฉีด [19]

แม้ว่าการฉีดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียเปรียบหลายประการ สรุปได้ดังนี้

1. คอมพิวเตอร์ในช่องว่างของเบ้ามีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ดังนั้นในขณะที่ทำการอัด ทำให้เกิดความเครียดภายในเบ้าสูงมาก จึงไม่สามารถสอดใส่วัสดุใดๆ เช่น โลหะ ลงในเบ้าได้ จึงทำให้ไม่สามารถทำผลิตภัณฑ์แบบหุ้ม โดยใช้เทคนิคนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะทำให้โลหะที่ใส่ลงไปบิดเบี้ยว และเบ้าเกิดการเสียหายในขณะที่ทำการอัด
2. ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ ตัวอย่างชิ้นงานที่กล่าวถึง เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาวและมีขนาดเล็ก และแท่งทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย เป็นต้น ดังนั้นเทคนิคการอัด ใช้กับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงง่ายเท่านั้น
3. เวลาของวัฏจักรของการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาว
4. การผลิตชิ้นงานที่หนา ต้องใช้เวลานาน เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนจึงต้องใช้เวลาในการแปรรูปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์
5. จำเป็นต้องมีการตัด Flash ที่ง่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ [5] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิด ปริมาณและขนาดของเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ เส้นใยปอและเส้นใยนุ่น โดยใช้ในอัตราส่วน 0 5 10 15% โดยน้ำหนักของแป้งและกลีเซอรอล โดยเริ่มจากเตรียมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลผสมเส้นใยต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นจากการเติมเส้นใยลงไป ลักษณะสัณฐานวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใย พบว่าเส้นใยเข้ากับเมทริกซ์ของแป้งได้ อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณเส้นใยปอลงไป แต่อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเส้นใยนุ่นลงไป การดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อผสมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง และการย่อยสลาย โดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยมีแนวโน้มต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้เติมเส้นใย

ศทวูช ภาชนะ และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิลเพื่อใช้เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและการต้านทานความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ไบโอบีโอมโพลีเอสเตอร์เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแป้ง ซึ่งถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสปริมาณ 0 ถึง 8% โดยน้ำหนักของเมทริกซ์ พบว่า ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (6.69 ± 0.29 MPa) และค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงสุด (137.40 ± 3.84 MPa) เพิ่มขึ้นถึง 305% และ 546% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีเสริมแรง เสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการย่อยสลายทางความร้อนของไบโอบีโอมโพลีเอสเตอร์เพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนั้นภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงการติดยึดกันอย่างดีระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเซลลูโลส

รัฐภูมิ สันตยานนท์ [21] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยปฏิกิริยาเอซิลชัน (Acylation) โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะนำแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรทาง

เคมีแล้วผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เพื่อเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านการทน ความชื้น สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการย่อยสลายที่ดี จากการศึกษพบว่า สภาวะต่างๆ ในการทำปฏิกิริยาเอซิเลชัน มีผลกระทบต่อจำนวนหมู่แทนที่ในลักษณะแนวโน้มน้ำที่ไม่เป็นเส้นตรง โดยมีค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปรที่ให้ค่าจำนวนหมู่แทนที่สูงสุด แป้งที่ผ่านการตัดแปรแล้วมีความสามารถในการทนความชื้นได้ดีและยึดเกาะกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดีขึ้น และส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความเหนียวสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสมแป้งปกติ (ที่ส่วนผสมเดียวกัน) ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมากในช่วงร้อยละ 40-60 มีสมบัติเชิงกลด้อยลงทั้งในกรณีแป้งปกติและแป้งตัดแปร และจากการทดสอบฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าพอลิเมอร์ผสมแป้งตัดแปรย่อยสลายได้ช้าลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมแป้งปกติ

สุชสี รอดทั้ง [22] งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง แป้ง และแป้งตัดแปร ซึ่งแป้งตัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปร คือ 50 องศาเซลเซียส โดยการตัดแปรแป้งข้าวเหนียวใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 30 นาที ส่วนการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางแป้งไม่ตัดแปร และแป้งตัดแปรมาผสมกันแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณแป้งตัดแปรเป็น 5 10 15 และ 20 phr จากการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้งตัดแปร สามารถดูความชื้นความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยไม่เติมแป้งตัดแปร แม้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว แต่พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวสามารถดูความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ผลการทดลองทั้งหมดบ่งชี้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางกับแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 80:20 และแป้งข้าวเหนียวตัดแปร 5 phr กับที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางกับแป้ง

มันสำปะหลังที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 5 phr มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด

สุภารัตน์ จิรัชยมงคล และคณะ [23] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม และการดัดแปรทางเคมีด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยสมบัติของสตาร์ชเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับสมบัติของหมู่เอสเทอร์และระดับการแทนที่ของสตาร์ชเอสเทอร์ที่ได้งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาผลของความยาวสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์ (C2 ถึง C4) และระดับการแทนที่ของสตาร์ชเอสเทอร์ต่อสมบัติของฟิล์มเอสเทอร์จากสตาร์ช จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มสตาร์ชเอสเทอร์เตรียม โดยใช้สตาร์ชเอสเทอร์ความเข้มข้นร้อยละ 4 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไซเซออร์มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวอยู่ในช่วง 2-3 kg/mm² และร้อยละ 2-3 ตามลำดับ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำและค่าการละลายน้ำของฟิล์มสตาร์ชเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์และระดับการแทนที่ของสตาร์ชเอสเทอร์ โดยค่าการดูดซึมน้ำและค่าการละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์และระดับการแทนที่ของสตาร์ชเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถลดความไวต่อความชื้นของฟิล์มสตาร์ชได้โดยสัมพันธ์กับความยาวสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์และระดับการแทนที่ของสตาร์ชเอสเทอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม

Guimaraes J.L. และคณะ [24] งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวโพดและการเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยกล้วยเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 20 25 และ 35% โดยน้ำหนัก สามารถเตรียมได้โดยเทคนิคการกดอัดจากการศึกษา X-ray diffraction พบว่าแป้งข้าวโพดมีผลึกชนิด A-type ที่พบทั่วไปในเมล็ดธัญพืช การวิเคราะห์ทางความร้อนแสดงให้เห็นถึงความเสถียรทางความร้อนที่ดีของวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่การศึกษา Fractographic ในอัตราส่วนของแป้ง 70% และกลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดรอยแตกในบริเวณพื้นที่ผิวขรุขระ ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยานั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใยมากกว่าส่วนที่เป็นเมทริกซ์ ในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเมื่อใส่เส้นใยกล้วยลงไปปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

Prachayawarakorn J. และคณะ [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า (TPRS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ สมบัติแรงดึงที่ไม่ดีและการดูดซึมน้ำสูงของ TPRS สามารถปรับปรุงได้โดยใช้เส้นใยฝ้ายหรือ

เอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้าไปในเมทริกซ์ รวมถึงศึกษาผลของการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์-พอลิเอทิลีน (MAPE) และไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน (VTMS) เป็นสารช่วยผสม จากการทดลองพบว่า เกิดการรวมตัวกันของเส้นใยฝ้ายและ LDPE ในเมทริกซ์ TPRS การดูดซึมน้ำของตัวอย่าง TPRS ลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยการใส่เส้นใยฝ้ายหรือ LDPE เข้าไป เสถียรภาพทางความร้อนของ TPRS เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่เส้นใยฝ้ายลงไป สมบัติการย่อยสลาย พบว่า TPRS/เส้นใยฝ้าย มีการย่อยสลายตัวได้เร็วกว่า TPRS/LDPE จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า การเตรียม TPRS โดยการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปประมาณ 10% โดยน้ำหนักส่งผลให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

Gironès J. และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) จากแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร โดยใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์เป็นส่วนเสริมแรง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มีการเกิดอันตรกิริยาของเส้นใยป่านสรนารายณ์ด้วยตัวเอง หรือเส้นใยป่านกับ TPS เป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ TPS เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA พบว่า ส่วนที่เสริมแรงช่วยเพิ่มความแข็งของวัสดุ ทั้งยังสะท้อนให้เห็นถึงค่า Storage modulus และค่า Young's modulus ที่สูงขึ้น จากสมบัติเชิงกลโดยรวมของชิ้นงานคอมโพสิต พบว่า มีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากส่วนเสริมแรงและเมทริกซ์สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีและมีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้การเติมน้ำยางธรรมชาติเป็นพลาสติกไซเซอร์ในคอมโพสิตช่วยลดการดูดซึมน้ำโดยไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุ

Jian Z.Y. และคณะ [27] งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมสตาเร็กซ์เอซิเทตจากแป้งข้าวโพด โดยมีจุดประสงค์เพื่อสามารถเตรียมแป้งดัดแปรที่มีองศาการแทนที่ที่สูงในสถานะต่างๆ จากการศึกษาเมื่อใช้เอทิลีนเอสเทอร์เป็น Acylating agent ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมของแป้งต่อเอทิลีนเอสเทอร์ของกรดอะซิติกในอัตราส่วน 10:1 ที่ pH 9-10 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 24°C เวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 1 ชั่วโมง พบว่ามีองศาการแทนที่ คือ 0.090 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยา (Reaction efficiency) คือ 47.7% และเมื่อใช้เอซิทิดแอนไฮไดรด์เป็น Acylating agent พบสภาวะที่เหมาะสมของแป้งต่ออะซิติกแอนไฮไดรด์ คือ 10:1.5 ที่ pH 8-8.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 25-30°C เวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 3 ชั่วโมง พบว่ามีองศาการแทนที่ คือ 0.074 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยา คือ 31.1% ซึ่งได้ค่าองศาการแทนที่ที่ต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าองศาการแทนที่ที่สูงขึ้นเมื่อใช้

ตัวทำละลายพริคตินเป็นตัวกลาง คือ มีค่าองศาการแทนที่ 0.763 และประสิทธิภาพของปฏิกิริยา คือ 15.0%

Yixiang X. และคณะ [28] ได้ศึกษาการเตรียมสตาร์ชแอซิเตตจากแป้งข้าวโพดด้วยปฏิกิริยา Acetylation โดยใช้เอซิติทแอนไฮไดรด์ และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ High degree of substitution (DS) พบว่า DS มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของเอซิติทแอนไฮไดรด์ต่อแป้ง จากลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าลักษณะของเม็ดแป้งของสตาร์ชแอซิเตตมีพื้นผิวที่ขรุขระเมื่อเทียบกับแป้งดิบซึ่งมีพื้นผิวที่เรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่า DS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกของแป้งลดลง จาก FTIR ปรากฏฟีกของหมู่คาร์บอนิลที่ $1,740\text{ cm}^{-1}$ มีความเข้มเพิ่มขึ้นและมีความเข้มของหมู่ไฮดรอกซิลที่ $3,000\text{-}3,600\text{ cm}^{-1}$ ของสตาร์ชแอซิเตตลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่เอซิติล จากสมบัติทางความร้อนพบว่า การทำสตาร์ชแอซิเตตส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แป้งมันสำปะหลังตราดาวแดงจากบริษัทเจ้าพระยาพีชไร้ 2999 (กำแพงเพชร) จำกัด องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

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

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

- แป้งดัดแปรสตาร์ชแอสซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง จากบริษัท สยาม มอดิไฟด์ สตาร์ช จำกัด (Siam Modified Starch Co., Ltd.)
- กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
- ซีลีเยอจากไม้สะเดา

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้สะเดา, %wt [29]

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ%wt
Cellulose	20.64 ± 0.44
Hemicellulose	50.84 ± 0.48
Lignin	18.52 ± 0.40

5. แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate, Mg-St) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (Chemipan Corporation Co., Ltd.) ข้อมูลทั่วไปของสารเคมีแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทั่วไปของแมกนีเซียมสเตียเรท

ข้อมูลย่อ (สารเคมีทั่วไป)	
ชื่อทั่วไป/ชื่ออื่น	Magnesium Stearate, แมกนีเซียม สเตียเรท
CAS Number	557-04-0
แหล่งกำเนิดสินค้า	อิตาลี (Italy)
อุตสาหกรรมที่ใช้	อาหาร (Food)
เกรดสินค้า	Food Grade
ข้อมูลทั่วไป	เป็นเกลือ Magnesium ของ Stearic Acid ซึ่งทำงานเป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อมหรือสารปลดปล่อยสีในลูกกวาด หรือยาเม็ดที่ผ่านการอัด และยังใช้ในหมากฝรั่งที่ปราศจากน้ำตาลและมินท์ สำหรับในเครื่องสำอางใช้ผสมกับแป้งเพื่อป้องกันหน้าแห้ง และทำให้หน้าดูเป็นธรรมชาติ
เอกสารที่เกี่ยวข้อง (Related documents)	COA

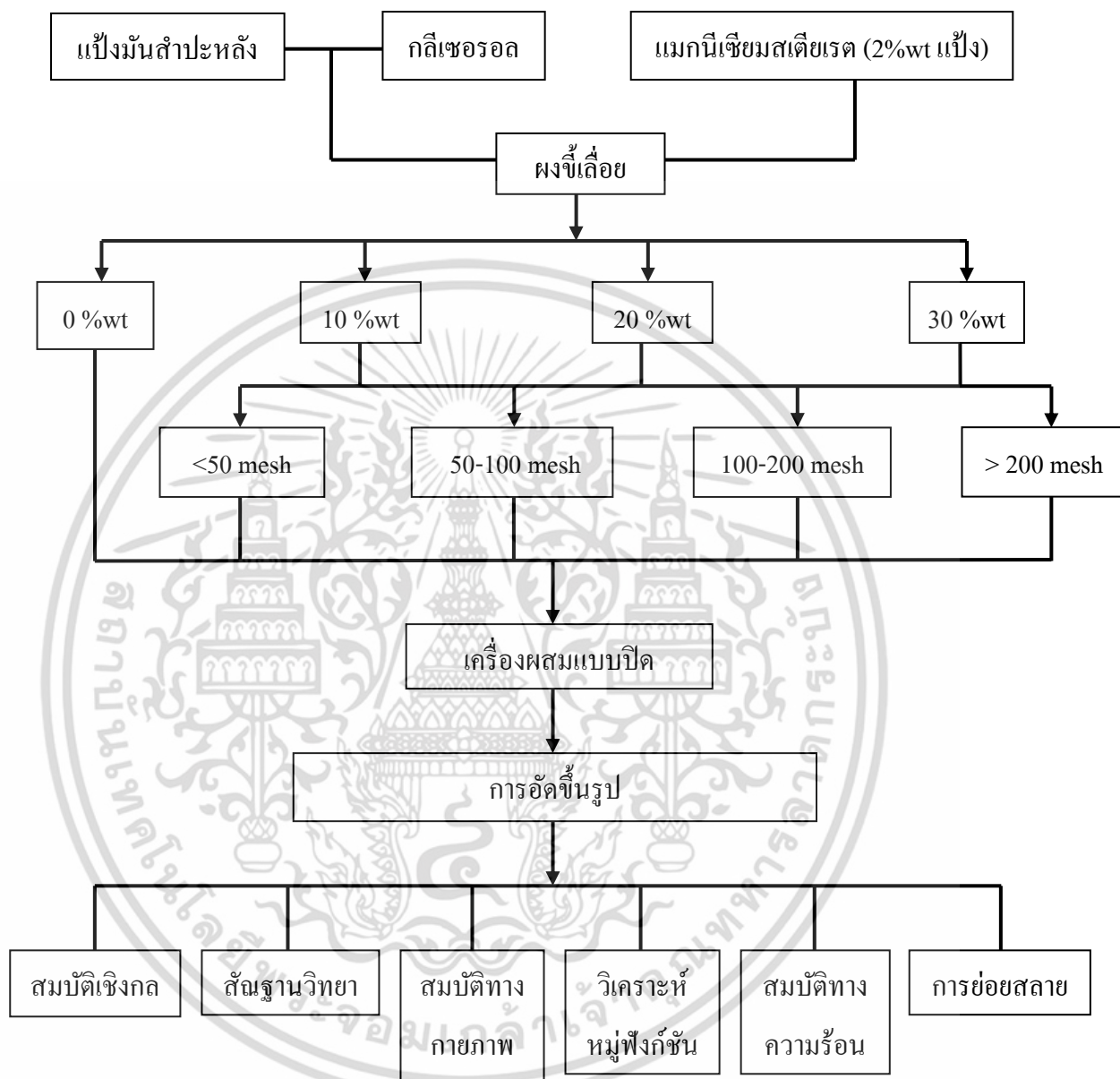
หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer): Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP 20
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD.
รุ่น LR 5K
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก : Precisa Instrument
5. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
6. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Parkin Elmer
Instrument Co.,Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) :
MODEL รุ่น EVO®MA10
8. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer,
FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
9. เครื่องบดอย่างหยาบ
10. เครื่องบดละเอียด
11. เครื่องร่อนแยกขนาด
12. ตะแกรงร่อน (ขนาด 50, 100, 200 เมช) ถาดรอง และฝาปิด

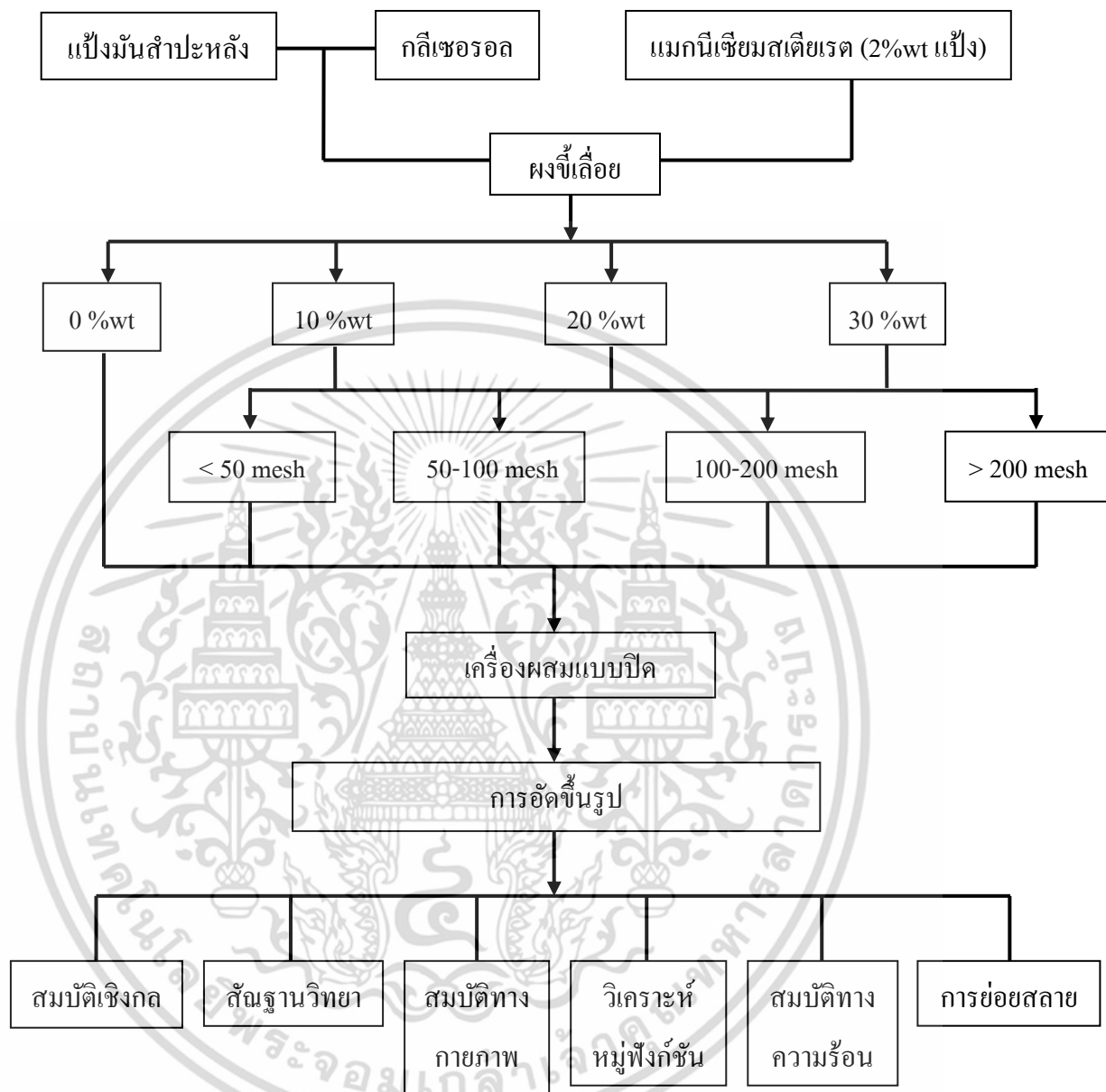
แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ตอนที่ 1 แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ตอนที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แอซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองผสมสูตรโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.4 เพื่อใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลที่ใช้เตรียม TPCS และ TPACS [5]

แป้งมันสำปะหลัง (g)	กลีเซอรอล (g)
65	35

1. ชั่งแป้งและกลีเซอรอลใส่ลงในภาชนะอัตราส่วนตามตารางที่ 3.4 แล้วเก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลเข้าไปในเนื้อแป้ง
2. นำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) พร้อมกับใส่แมกนีเซียมสเตียเรต 2%w แป้ง ซึ่งเป็นสารหล่อลื่น ทำการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.2 การขึ้นรูป TPCS และ TPACS จากแป้งมันสำปะหลัง

1. ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแล้วประกบด้วยแผ่นใสชนิดพอลิเอสเตอร์

2. วางเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงในแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันแล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (140 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่อ 5 นาที

3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การปรับปรุงสมบัติของ TPCS และ TPACS ด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดา

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองผสมสูตรโดยใช้ขี้เถ้าในขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาดน้อยกว่า 50, 50-100, 100-200 และมากกว่า 200 เมช เพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.3.3.1 การเตรียมขี้เถ้า

1. นำขี้เถ้ามาทำการบดหยาบก่อนในครั้งแรก ก่อนที่จะทำการบดละเอียดในครั้งที่สอง เมื่อเสร็จจากการบดละเอียดแล้ว จึงนำขี้เถ้าละเอียดที่ได้มาผ่านการร่อนเพื่อแยกขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อน
2. วางตำแหน่งตะแกรงร่อน โดยนำตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช ไว้บนสุด รองลงมาขนาด 100 เมช และขนาด 200 เมช วางตำแหน่งล่างสุด โดยมีถาดรองรับ จากนั้นใส่ขี้เถ้าปิดฝา แล้ววางไว้บนเครื่องร่อนซึ่งขนาดขี้เถ้าสัมพันธ์กับความยาว 0.30, 0.15, และ 0.075 mm ตามลำดับ
3. ตั้งเวลาที่เครื่องร่อนเป็นเวลาประมาณ 15 นาที เมื่อครบเวลานำขี้เถ้าที่ผ่านการแยกขนาดแล้วใส่ถุงเก็บไว้

3.3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของ TPCS และ TPACS โดยขี้เถ้า

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการเตรียม TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า

แป้ง (g)	กลีเซอรอล(g)	ปริมาณ ขี้เถ้า (%wt)				Mg-St 2%wtแป้ง (g)
		ขนาด				
		<50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	>200 mesh	
65	35	0	0	0	0	1.3
65	35	10	0	0	0	1.3
65	35	20	0	0	0	1.3
65	35	30	0	0	0	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

65	35	0	10	0	0	1.3
65	35	0	20	0	0	1.3
65	35	0	30	0	0	1.3
65	35	0	0	10	0	1.3
65	35	0	0	20	0	1.3
65	35	0	0	30	0	1.3
65	35	0	0	0	10	1.3
65	35	0	0	0	20	1.3
65	35	0	0	0	30	1.3

1. ชั่งส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียม TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีที่ 3.8
2. นำ TPCS และ TPACS แต่ละสูตรผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
3. TPCS และ TPACS แต่ละสูตร ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นหล่อเย็น 5 นาที
4. นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

3.4.1.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยไซเดียมไนเตรด ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% โดยใช้ น้ำกลั่น นำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

W_w คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

3.4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับ โปแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^4 kg/cm^2 นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

3.4.3 สัณฐานวิทยา

การทดสอบส่วนสัณฐานวิทยาทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อนำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที จากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของขี้เลื่อยในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และรอยต่อระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึง สูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness, shore D)	ASTM D 2440	-

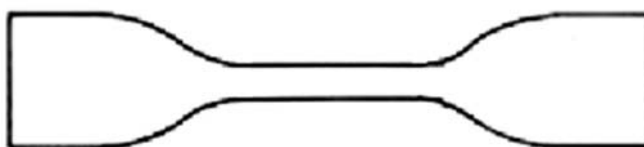
3.4.4.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม Nexygen ซินงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของซินงานที่ใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% ทดสอบตามสถานะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 1 kN



รูปที่ 3.3 ลักษณะซินงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.4.2 ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D 2440 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore D โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย $\frac{1}{4}$ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาค่าความแข็งกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกด อยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือ ความแข็งของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก

3.4.5 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์ด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสถียรภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$ ในช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.4.6 การทดสอบการย่อยสลาย

โดยการฝังดินตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% ทำการเปรียบเทียบน้ำหนัก จากนั้นทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ แล้วนำมาสมบัติเชิงกลเพื่อศึกษาผลของการย่อยสลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

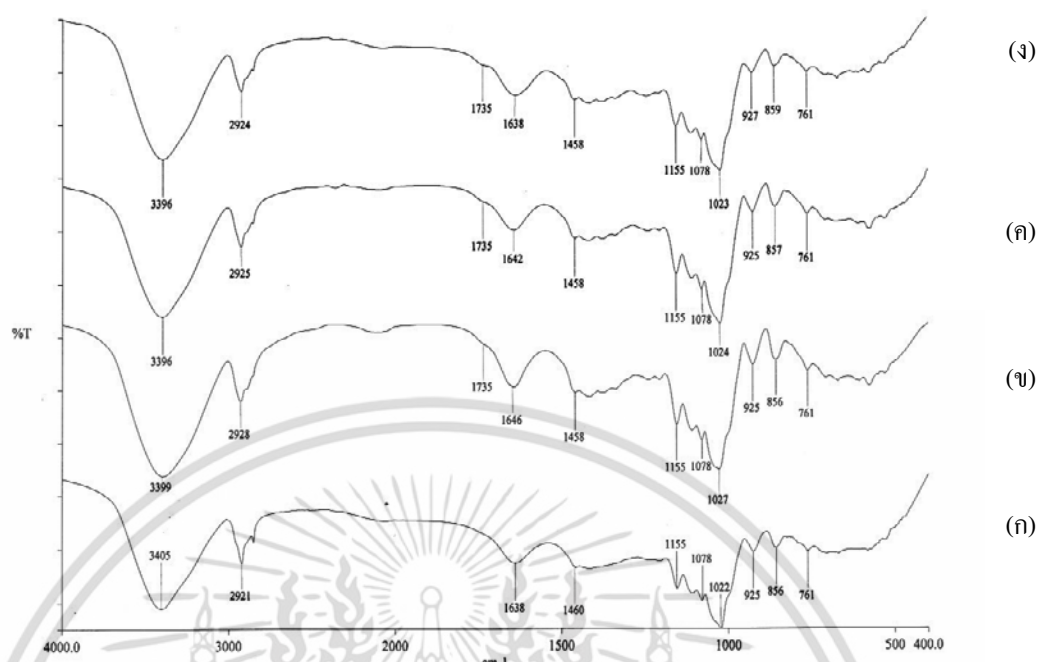
ในงานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) โดยนำมาเสริมแรงด้วยซีลื้อจากไม้สะเดาเพื่อปรับปรุงสมบัติ โดยใช้ซีลื้อในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก และขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาด <50 เมช, 50-100 เมช, 100-200 เมช และ >200 เมช นอกจากนี้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) ที่นำมาเสริมแรงด้วยซีลื้อในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0%, 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดเท่ากันคือ 100-200 เมช และศึกษาผลของขนาดของซีลื้อต่างๆ ได้แก่ ขนาด <50 เมช, 50-100 เมช, 100-200 เมช และ >200 เมช ที่ปริมาณเท่ากันคือ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งสตาโรซแอซิเตดที่นำมาใช้มีค่าระดับการแทนที่ หรือ Degree of substitution (DS) เท่ากับ 0.8 (ข้อมูลจากบริษัท)

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

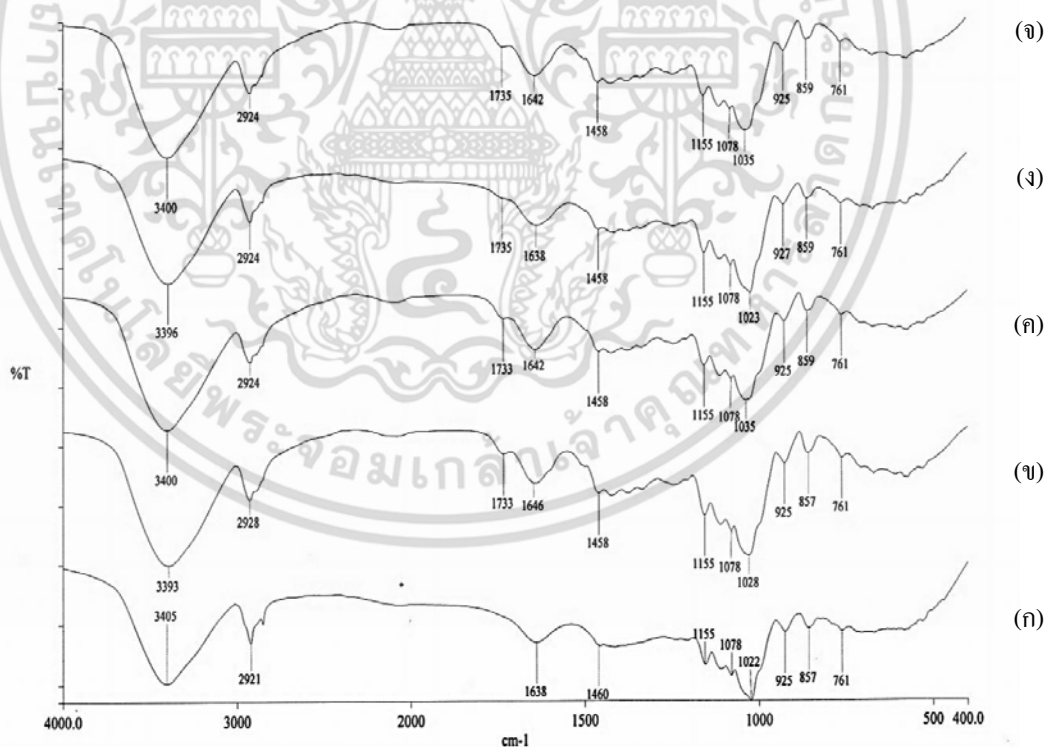
4.1 สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)

4.1.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยพิจารณาเปรียบเทียบจาก TPCS และ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้ซีลื้อจากไม้สะเดาที่มีปริมาณและขนาดอนุภาคที่ต่างกัน แสดงผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ สำหรับการศึกษาวិเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของ TPACS และ TPACS ที่นำมาปรับปรุงสมบัติด้วยซีลื้อจากไม้สะเดา แสดงข้อมูลดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

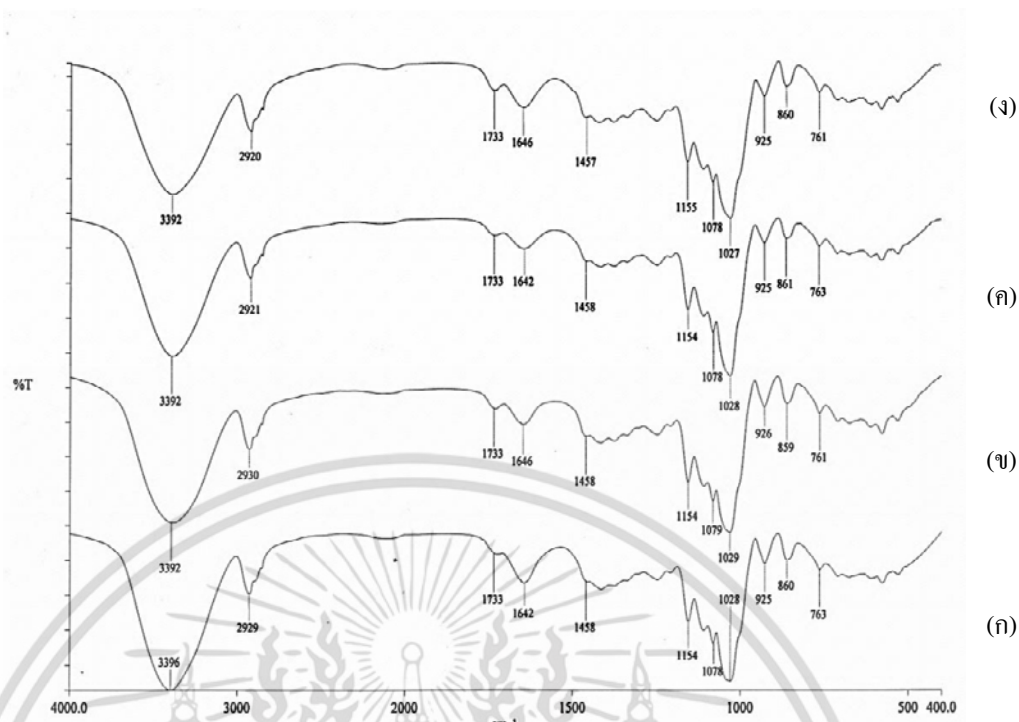


รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยซีลี้อย่างไม่สะเคาขนาด 100-200 เมฆ ในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 20% และ (ง) 30%

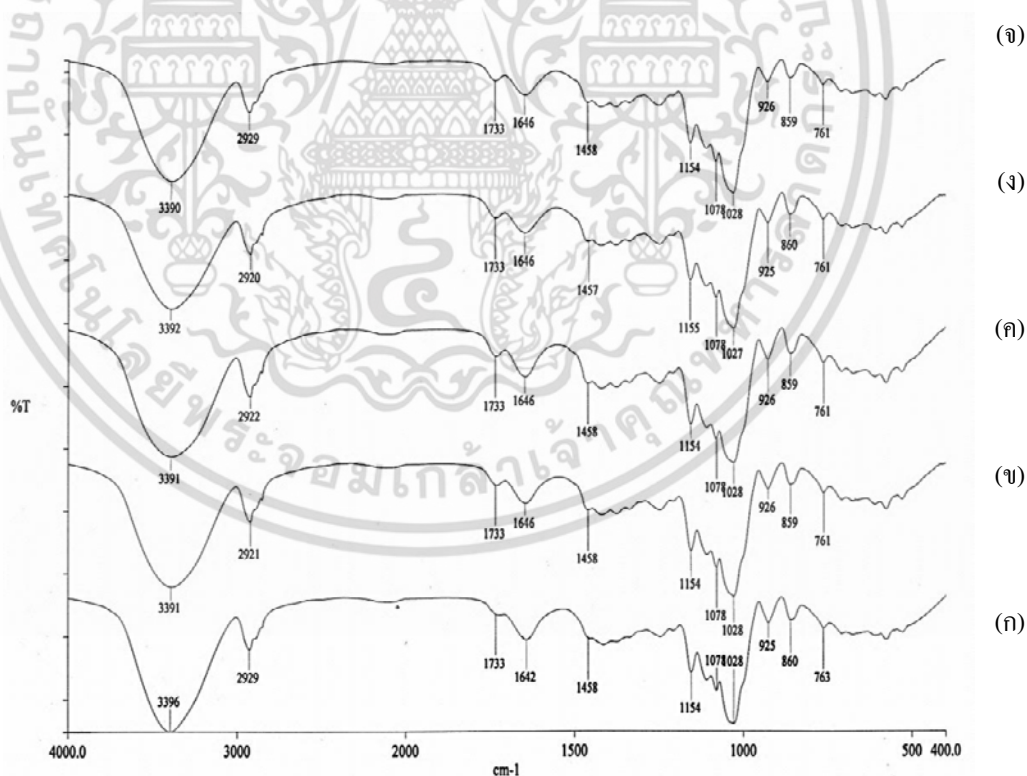


รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS และ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยซีลี้อย่างปริมาณ 30 % ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (ก) TPCS (ข) <50 เมฆ (ค) 50-100 เมฆ (ง) 100-200 เมฆ และ (จ) >200 เมฆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 20% และ (ง) 30%



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมปริมาณ 30 % ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (ก) TPCS (ข) <50 เมช (ค) 50-100 เมช (ง) 100-200 เมช และ (จ) >200 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1-4.4 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านของแสงของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีอียจากไม้สะเดาที่ปริมาณและขนาดแตกต่างกัน โดยพิกที่ช่วง $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พิกที่ช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 หรือ CH_3 ของแป้ง พิกที่ประมาณ 1733 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของทั้งหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่มีอยู่ในซีลีอียจากไม้สะเดา และหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของสตาร์ชแอซิเตด พิกที่ประมาณ 1640 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ H-O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง พิกที่ประมาณ 1460 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของแป้ง พิกที่ประมาณ $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง พิกที่ประมาณ $1200-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [33-34]

จากผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันความแตกต่างระหว่าง TPCS ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียกับ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียที่ปริมาณ และขนาดอนุภาคต่างๆ กัน (รูปที่ 4.1-4.2) และจากผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันในรูปที่ 4.3-4.4 ของ TPACS และ TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียที่ปริมาณ และขนาดอนุภาคต่างๆ กัน พบว่า

1. พิกที่ช่วง $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ และ 1460 cm^{-1} ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending ในแป้งของ TPCS และ TPACS เมื่อผสมซีลีอียทำให้พิกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้ แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ [40] ระหว่างแป้งและซีลีอียที่ใส่เข้าไป

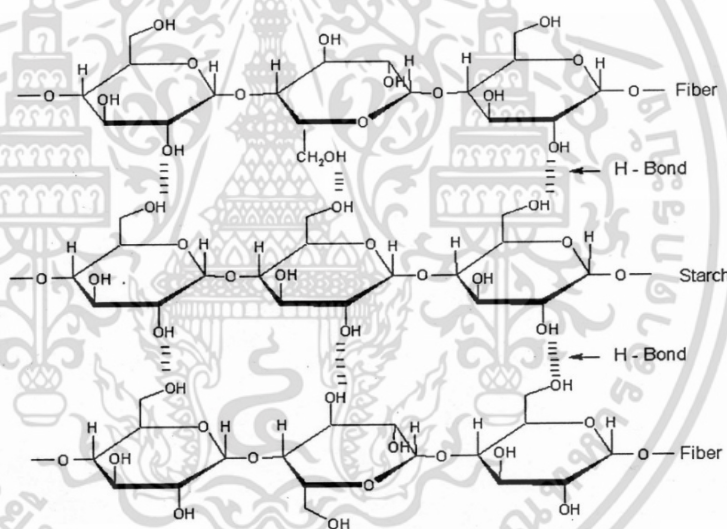
สำหรับ TPACS ในการทดลองไม่เห็นเปลี่ยนแปลงการ Shift ของการสั่นแบบ O-H bending อาจเป็นเพราะการสั่นแบบ O-H bending ต้องใช้พลังงานในการสั่นมากกว่า O-H stretching ซึ่ง TPACS มีหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้างโมเลกุลของแป้ง มีความกะกะมากกว่าหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งอาจขัดขวางการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้

2. TPCS พบพิกใหม่ที่ตำแหน่ง 1735 cm^{-1} ซึ่งเกิดการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในซีลีอียจากไม้สะเดา [35] โดยพบเฉพาะ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียที่ปริมาณและขนาดอนุภาคต่างๆ กัน

เนื่องจากโครงสร้างของซีลื้อยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมี C=O อยู่ในโครงสร้าง

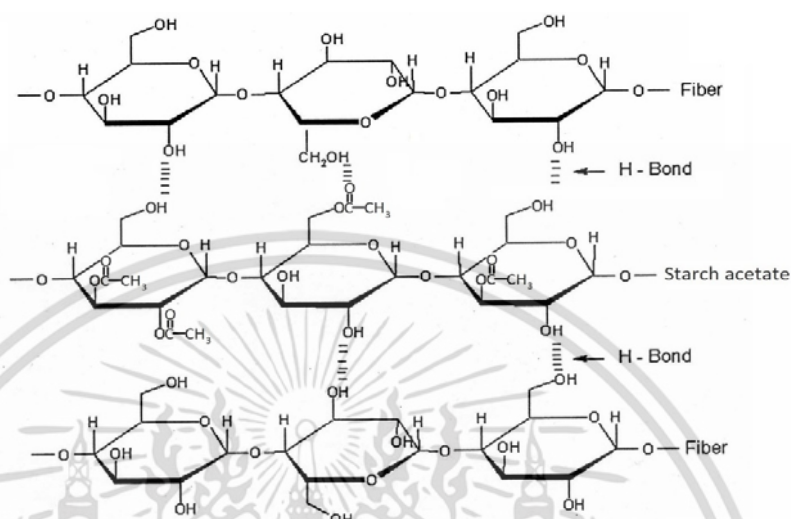
สำหรับ TPACS พบพิกที่ตำแหน่ง 1733 cm^{-1} ซึ่งเกิดการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิก หมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่มีอยู่ในซีลื้อยจากไม้สะเดา [35] และหมู่เอซิลในโมเลกุลของสตาร์ชแอสิตเตดจากแป้งมันสำปะหลัง [28] นอกจากนี้พบว่า การเติมซีลื้อยลงไป ใน TPACS ส่งผลให้พิกที่ตำแหน่งนี้มีความเข้มของพิกสูงขึ้น โดยพบทั้ง TPACS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลื้อยที่ปริมาณและขนาดอนุภาคต่างๆ กัน

อันตรกิริยาที่คาดว่าเกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งและเซลลูโลสที่มีอยู่ในองค์ประกอบทางเคมีของซีลื้อยแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อันตรกิริยาที่คาดว่าเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับซีลื้อย

อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งและเซลลูโลสที่มีอยู่ในองค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อยแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งแอซิเตทกับขี้เลื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPCS, TPACS และซีลี้อย่างไม่สะดวกทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของซีลีออยในเมทริกซ์แป้งมันสำปะหลังและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างซีลีออยกับเมทริกซ์ของแป้งมันสำปะหลัง โดยพิจารณาที่ปริมาณ 0%, 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของ TPCS (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3000 เท่า

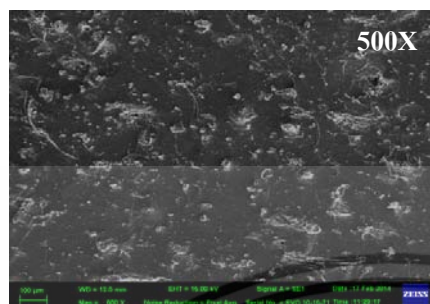


รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของ TPACS (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3000 เท่า

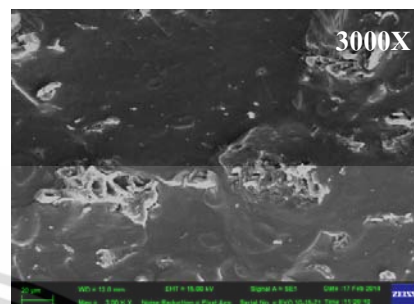
จากรูปที่ 4.7-4.8 (ก)-(ข) ซึ่งแสดงภาคตัดขวางจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่าของ TPCS และ TPACS โดยพบว่า ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ แต่ยังมีเม็ดกลมที่เกิดจากเม็ดแป้งบางส่วนนั้นหลอมไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

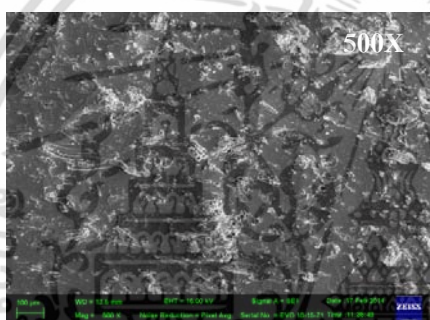
4.1.2.1 ผลของปริมาณของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มีต่อสัณฐานวิทยาของ TPCS และ TPACS



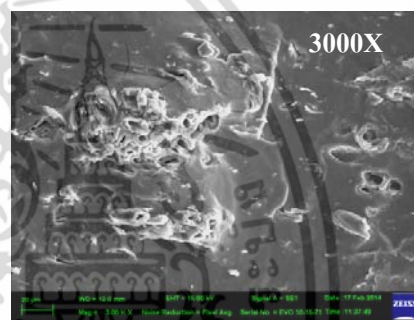
(ก) +10% sawdust (100-200 mesh)



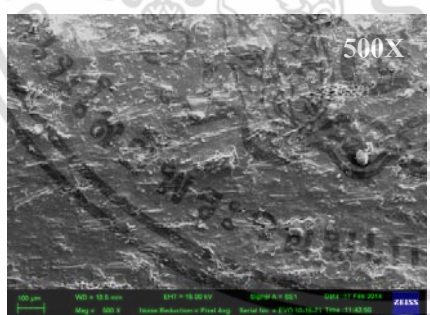
(ข) +10% sawdust (100-200 mesh)



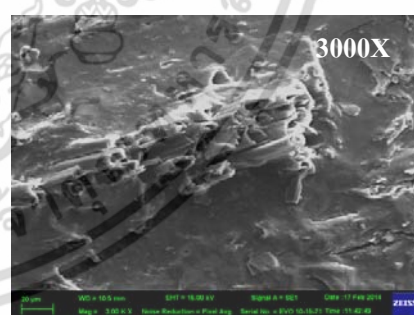
(ค) +20% sawdust (100-200 mesh)



(ง) +20% sawdust (100-200 mesh)



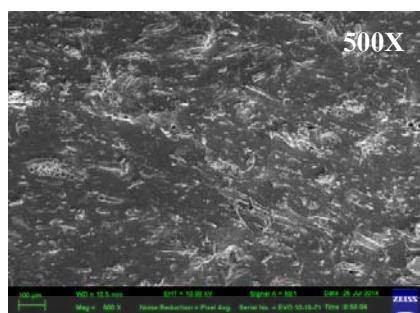
(จ) +30% sawdust (100-200 mesh)



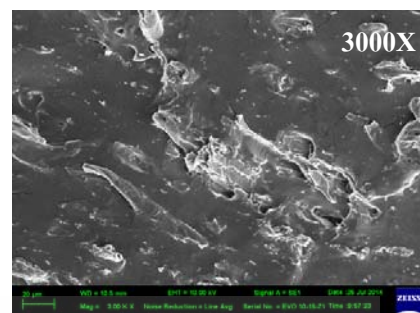
(ฉ) +30% sawdust (100-200 mesh)

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าไม้สะเดาขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10% (ค-ง) 20% (จ-ฉ) 30% ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

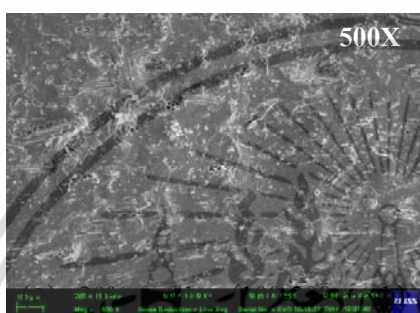
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



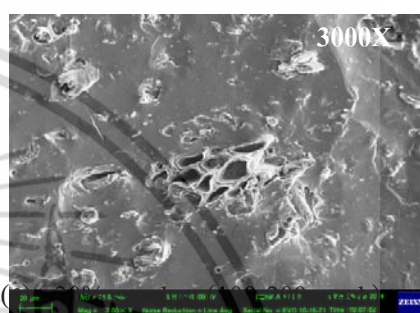
(ก) +10% sawdust (100-200 mesh)



(ข) +10% sawdust (100-200 mesh)



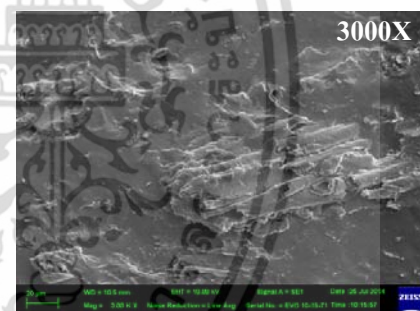
(ค) +20% sawdust (100-200 mesh)



(ง) +20% sawdust (100-200 mesh)



(จ) +30% sawdust (100-200 mesh)

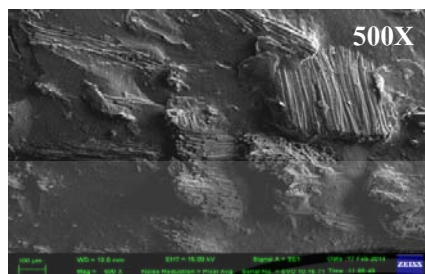


(ฉ) +30% sawdust (100-200 mesh)

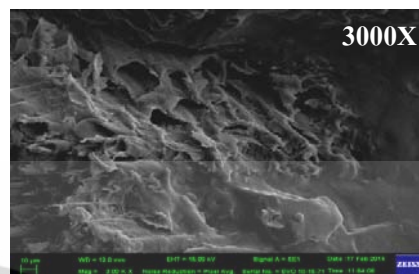
รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ไม้สะเดาขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (ก-ข) 10% (ค-ง) 20% (จ-ฉ) 30% ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

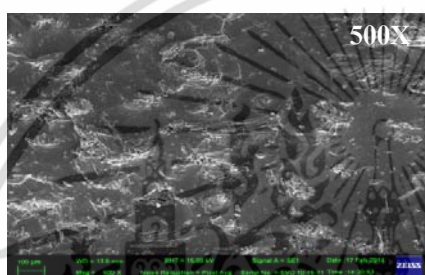
4.1.2.2 ผลของขนาดของขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีต่อสัณฐานวิทยาของ TPCS และ TPACS



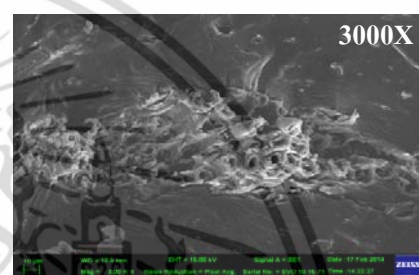
(ก) +30% sawdust (< 50 mesh)



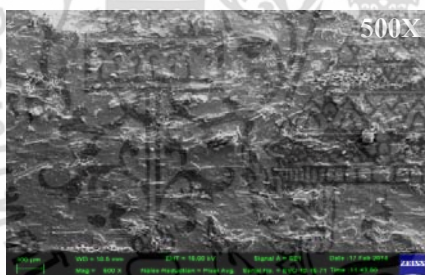
(ข) +30% sawdust (< 50 mesh)



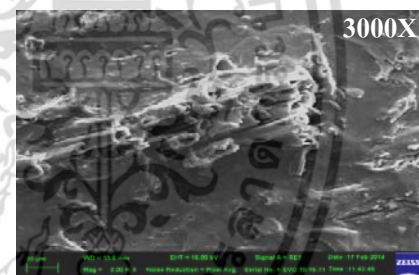
(ค) +30% sawdust (50-100 mesh)



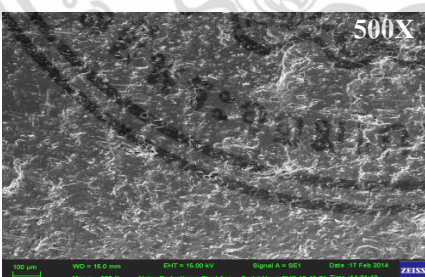
(ง) +30% sawdust (50-100 mesh)



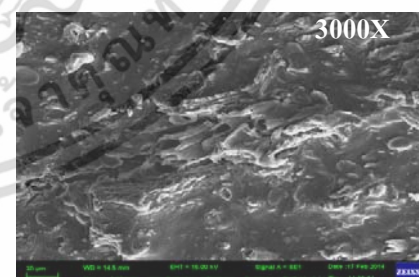
(จ) +30% sawdust (100-200 mesh)



(ฉ) +30% sawdust (100-200 mesh)



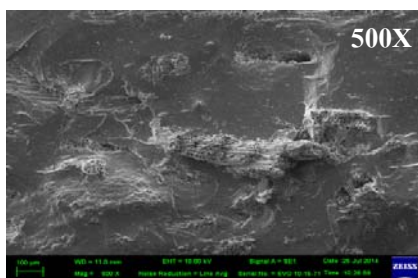
(ช) +30% sawdust (>200 mesh)



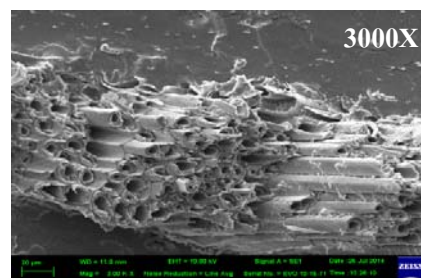
(ซ) +30% sawdust (>200 mesh)

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ (ก-ข) <50 เมช (ค-ง) 50-100 เมช (จ-ฉ) 100-200 เมช (ช-ซ) >200 เมช ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

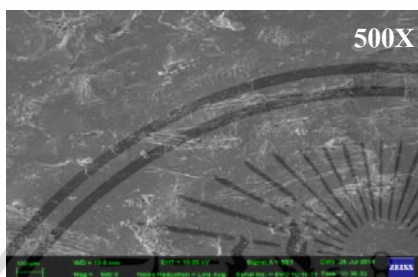
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



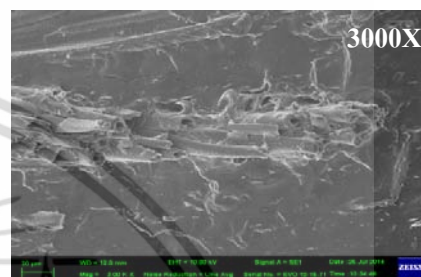
(ก) +30% sawdust (< 50 mesh)



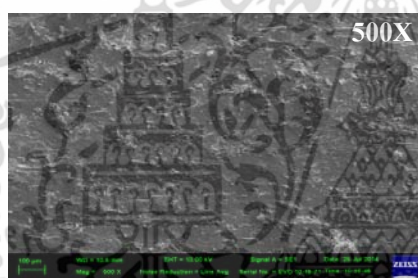
(ข) +30% sawdust (< 50 mesh)



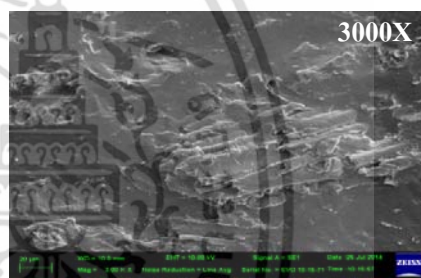
(ค) +30% sawdust (50-100 mesh)



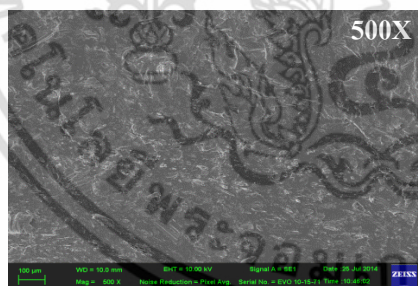
(ง) +30% sawdust (50-100 mesh)



(จ) +30% sawdust (100-200 mesh)



(ฉ) +30% sawdust (100-200 mesh)



(ช) +30% sawdust (>200 mesh)



(ซ) +30% sawdust (>200 mesh)

รูปที่ 4.12 ตัณฐานวิทยาของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ (ก-ข) <50 (ค-ง) 50-100 (จ-ฉ) 100-200 (ช-ซ) >200 ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

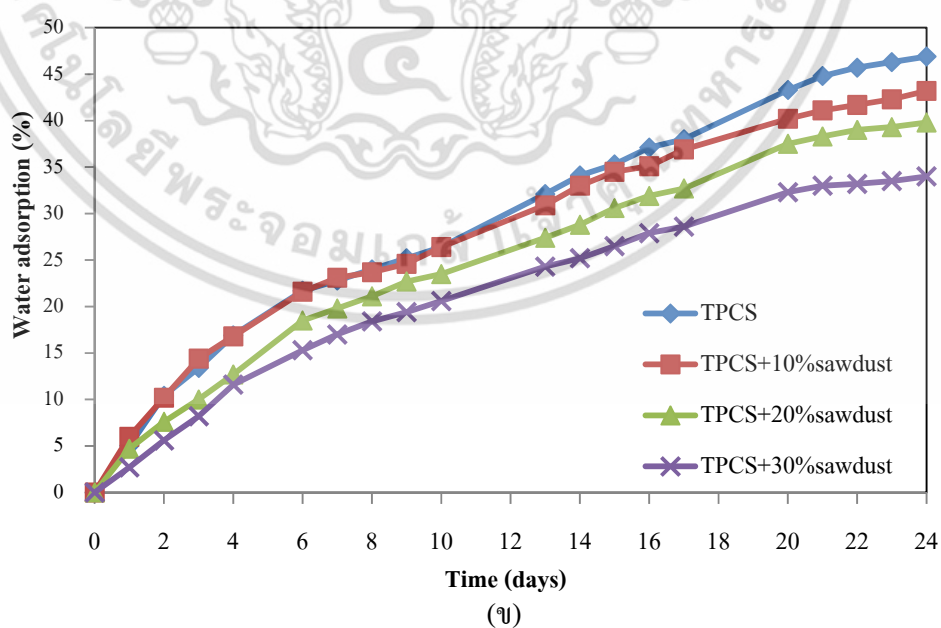
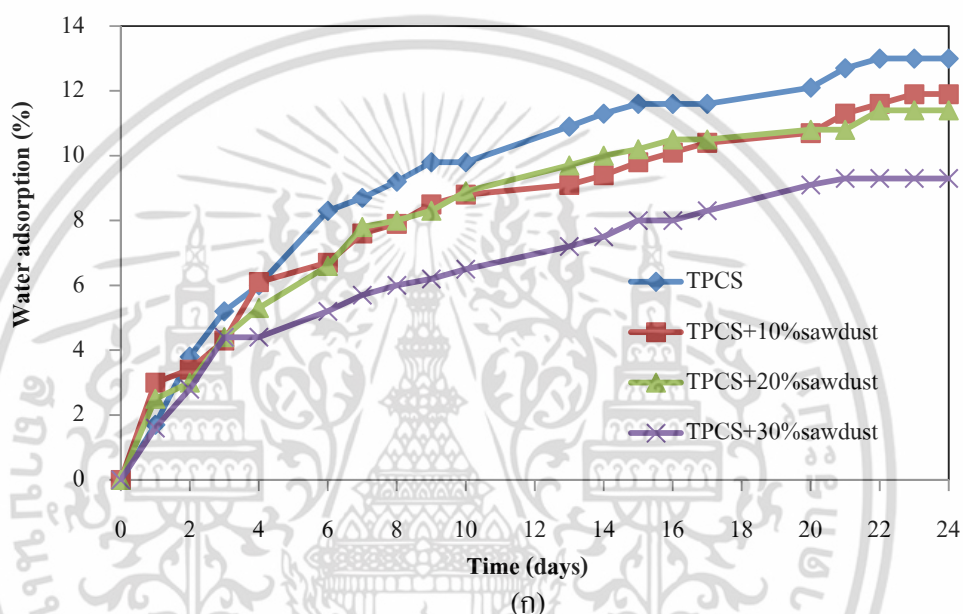
จากรูปที่ 4.9-4.10 ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยแสดงภาคตัดขวางของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมโมโนอะไซด์ในปริมาณ 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.9-4.10 (ก)-(ข) 10% (ค)-(ง) 20% และ (จ)-(ฉ) 30%) ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า ซีลีเนียมโมโนอะไซด์มีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้ง และมีการฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณต่างกัน (10% 20% และ 30%) พบว่า พื้นผิวของซีลีเนียมถูกปกคลุมด้วยแป้ง ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัฏภาคแป้งและซีลีเนียม เมื่อใช้กำลังขยาย 3000 เท่า สามารถมองเห็นวัฏภาคระหว่าง TPCS, TPACS และซีลีเนียม พบว่า ซีลีเนียมมีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของ TPCS กับ TPACS โดยสังเกตจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ไม่มีรอยแยก การที่ซีลีเนียมสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้กับเมทริกซ์แป้งเนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงความมีขั้วเหมือนกันทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสอง วัฏภาค มีการยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น มีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แป้งกับซีลีเนียมที่แข็งแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล

นอกจากนี้ ในรูปที่ 4.11-4.12 ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยแสดงภาคตัดขวางของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมโมโนอะไซด์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (รูปที่ 4.10-4.11 (ก)-(ข) <50 เมช (ค)-(ง) 50-100 เมช (จ)-(ฉ) 100-200 เมช และ (ช)-(ซ) >200 เมช) ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ตามลำดับ พบว่า ซีลีเนียมที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 50 เมช มีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมา คือ ขนาดอนุภาค 50-100 เมช, 100-200 เมช และมากกว่า 200 เมช ตามลำดับ นอกจากนี้ซีลีเนียมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีแนวโน้มเกิดการเกาะกลุ่มกันมากกว่าซีลีเนียมที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก แต่ขนาดของซีลีเนียมที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ TPCS, TPACS และซีลีเนียมจากโมโนอะไซด์ เนื่องจากวัฏภาคทั้งสองสามารถเข้ากันได้ดี

4.1.3 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

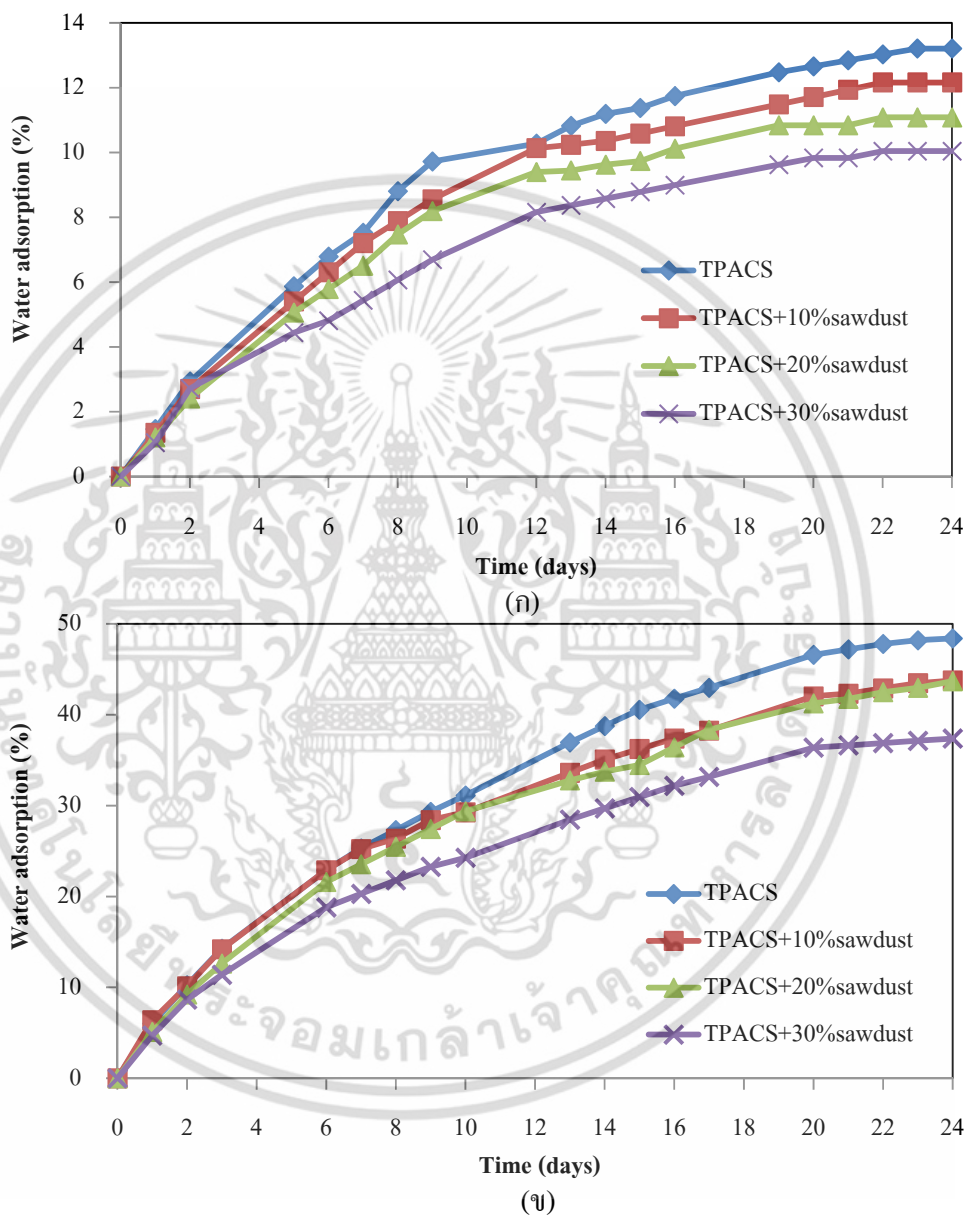
4.1.3.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

1. ผลของปริมาณขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีปริมาณการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ผลของปริมาณขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.13-4.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

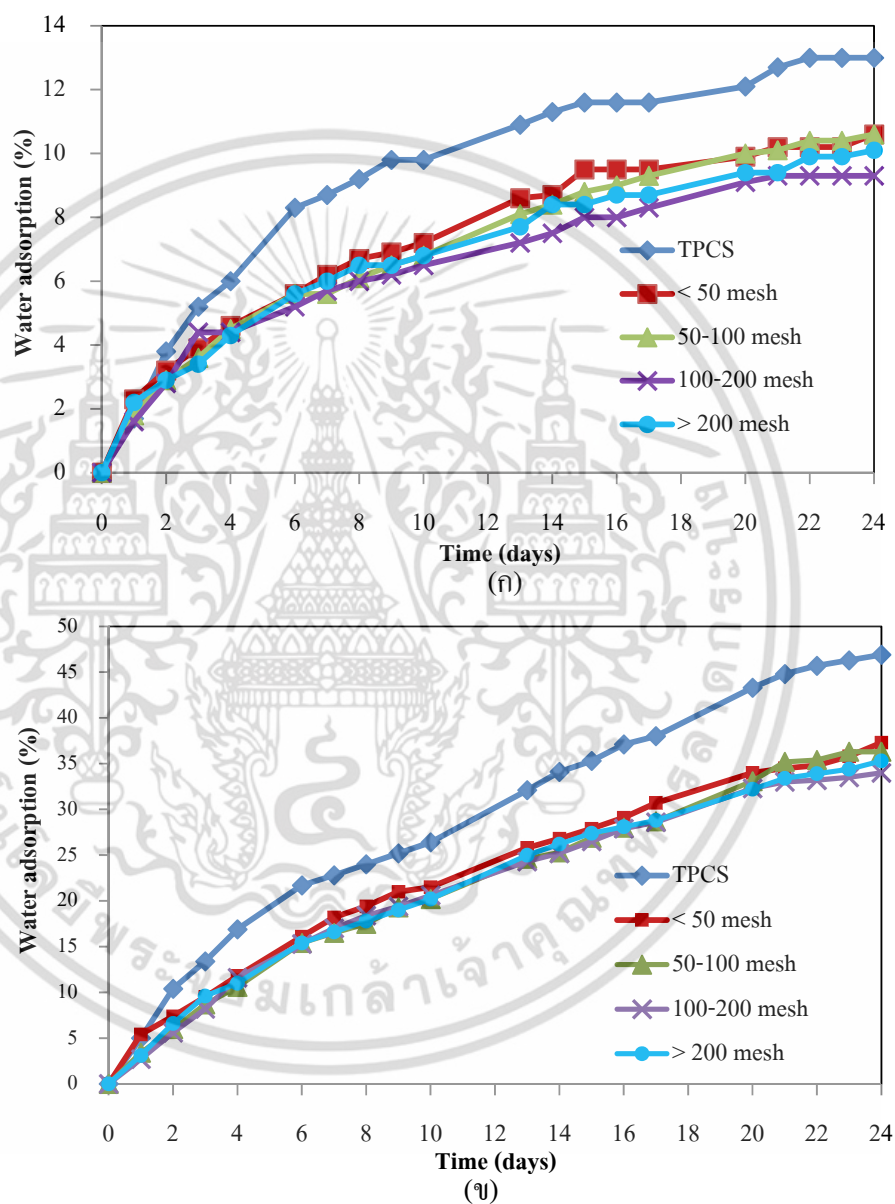
รูปที่ 4.13 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0%, 10%, 20% และ 30% (ก) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



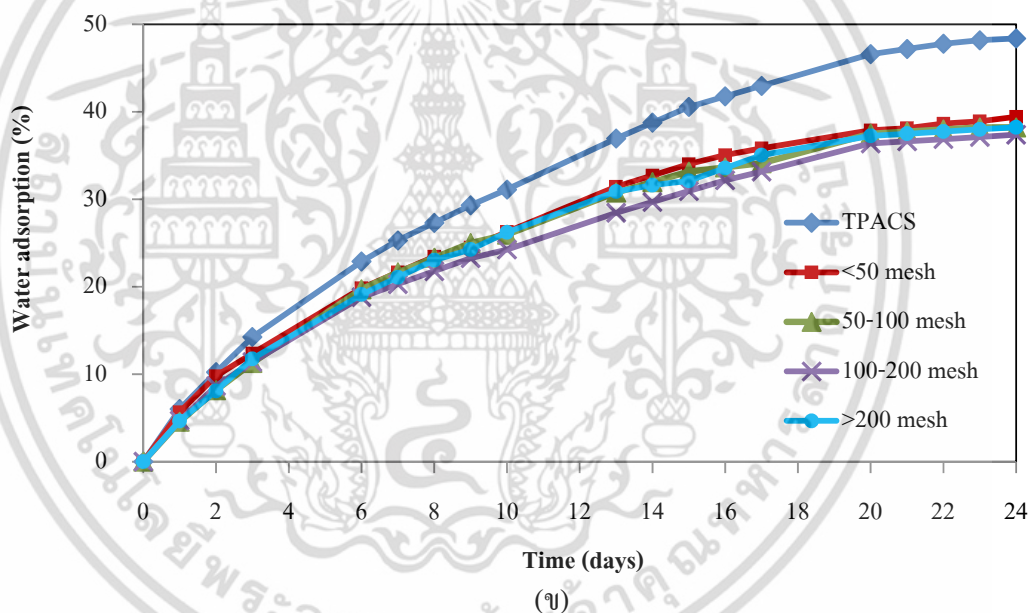
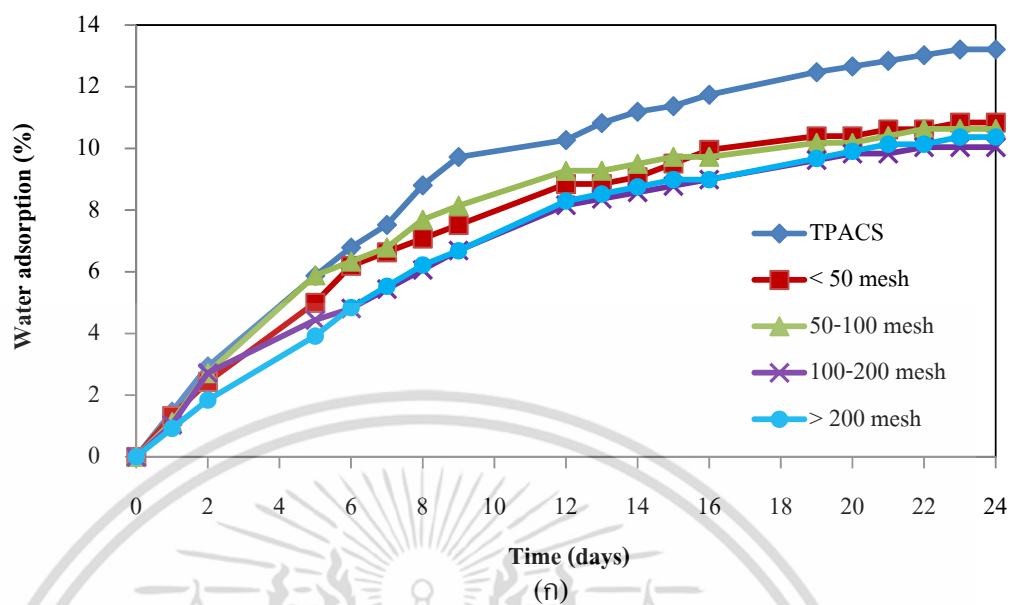
รูปที่ 4.14 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0%, 10%, 20% และ 30% (ก) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลของขนาดขี้เลื่อยจากไม้สะเคาที่มีปริมาณการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS
ผลของขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยจากไม้สะเคาที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำของ TPCS
และ TPACS ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.14-4.15 (ก) และ (ข)
ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเคาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน ได้แก่ < 50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช (ก) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



รูปที่ 4.16 เปรี่เซนต์การดูดซับน้ำของ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน ได้แก่ < 50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช (ก) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากการทดสอบการดูดซับน้ำภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% ของ TPCS และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0%, 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.13-4.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าภายใน 2-4 วันแรก TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในทุกอัตราส่วนสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว โดย TPCS ที่ไม่ได้ผสมด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มาก และในช่วงหลังจาก 20 วันของการทดสอบ พบว่า การดูดซับน้ำมีแนวโน้มคงที่ แล้วเริ่มมีราขึ้นที่ชิ้นงานในวันที่ 24 ของการทดลอง สำหรับ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในทุกสูตรสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลังนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของสตาร์ชแอซิเตด นอกจากนี้ Fringant *et al.* (1996) [42] อธิบายว่า สตาร์ชแอซิเตดที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (DS น้อยกว่า 1.3-1.4) มีปริมาณหมู่แอซิเตดไม่เพียงพอเพื่อแสดงสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ในทางกลับกันกับแสดงสมบัติที่ชอบน้ำมากขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วสูงของพันธะ C=O ดังนั้น TPACS จากสตาร์ชแอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (DS 0.8 ข้อมูลจากบริษัท) จึงมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มาก และการดูดซับน้ำเริ่มมีแนวโน้มคงที่หลังจากทดสอบไปประมาณ 19-20 วัน

เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% มีค่ามากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS

จากผลของปริมาณขี้เถ้า (รูปที่ 4.13-4.14 (ก) และ (ข)) พบว่า TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดา 10%, 20% และ 30% พบว่า สามารถดูดซับน้ำได้น้อยลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซับน้ำมากกว่าขี้เถ้า [36-38] และเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้ามากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง สรุปได้ว่า TPCS และ TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก มีการดูดซับน้ำน้อยที่สุด

จากผลของขนาดของขี้เถ้า (รูปที่ 4.15-4.16 (ก) และ (ข)) การทดสอบการดูดซับน้ำภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% ของ TPCS และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่ขนาดต่างๆ กัน ได้แก่ < 50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ตามลำดับ พบว่า ขนาดของขี้เถ้าไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำและให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบการดูดซับน้ำกลั่นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% สามารถแยกสรุปได้ 3 ส่วน คือ

1. ผลของปริมาณความชื้น กล่าวคือ ปริมาณความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS โดยเมื่อความชื้นในบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แป้งสามารถดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้มากขึ้น

2. ผลของปริมาณของขี้เถ้าจากไม้สะเดา กล่าวคือ TPCS และ TPACS ในสูตรที่มีอัตราส่วนของปริมาณขี้เถ้ามากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง

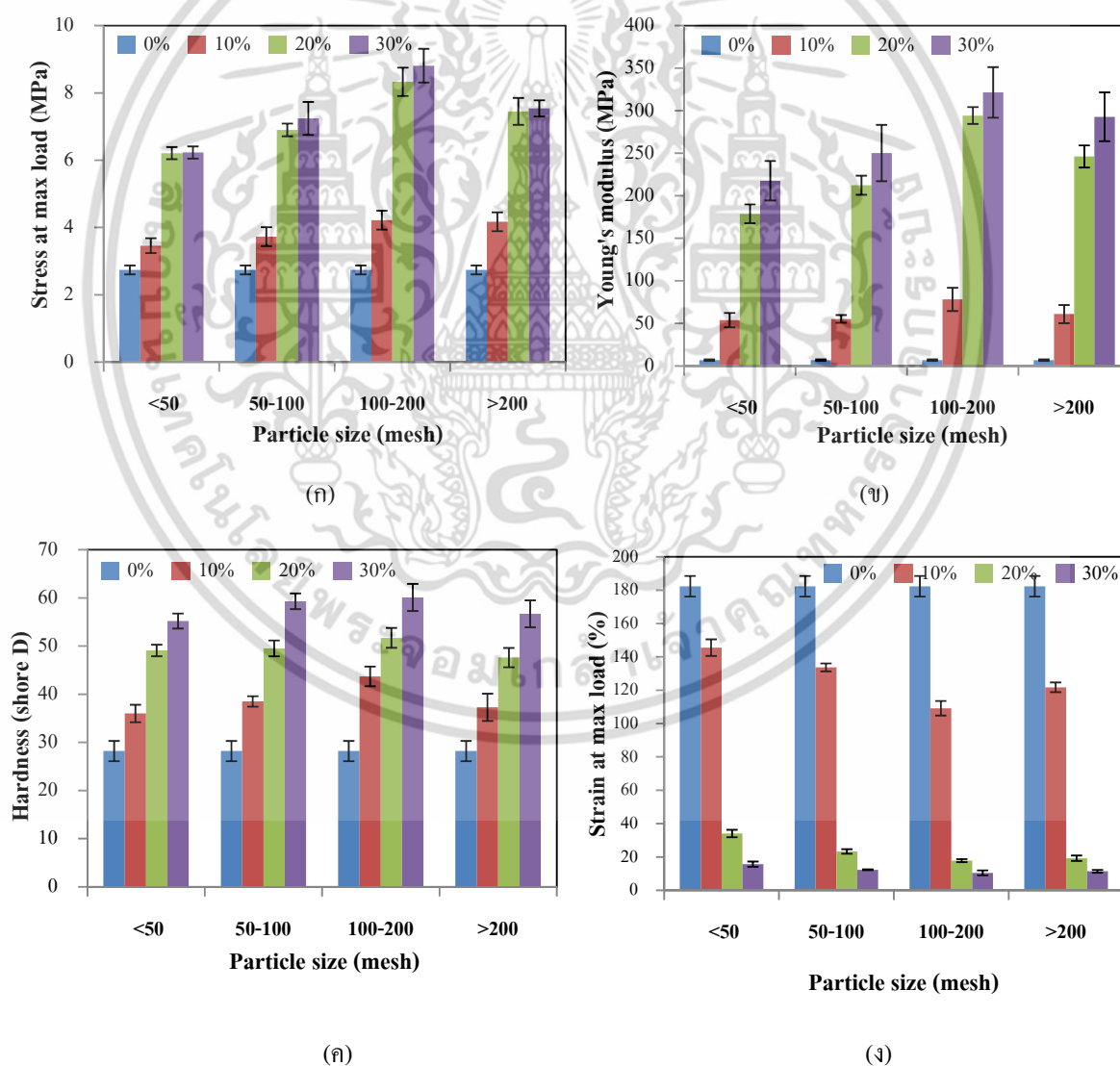
3. ผลของขนาดอนุภาคขี้เถ้าจากไม้สะเดา กล่าวคือ การดูดซับน้ำมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อขนาดอนุภาคของขี้เถ้าแตกต่างกัน

จากผลการทดลองการดูดซับน้ำ พบว่า TPCS, TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุดและ TPCS, TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักขนาด 100-200 เมช มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยที่สุด

4.1.4 สมบัติเชิงกล

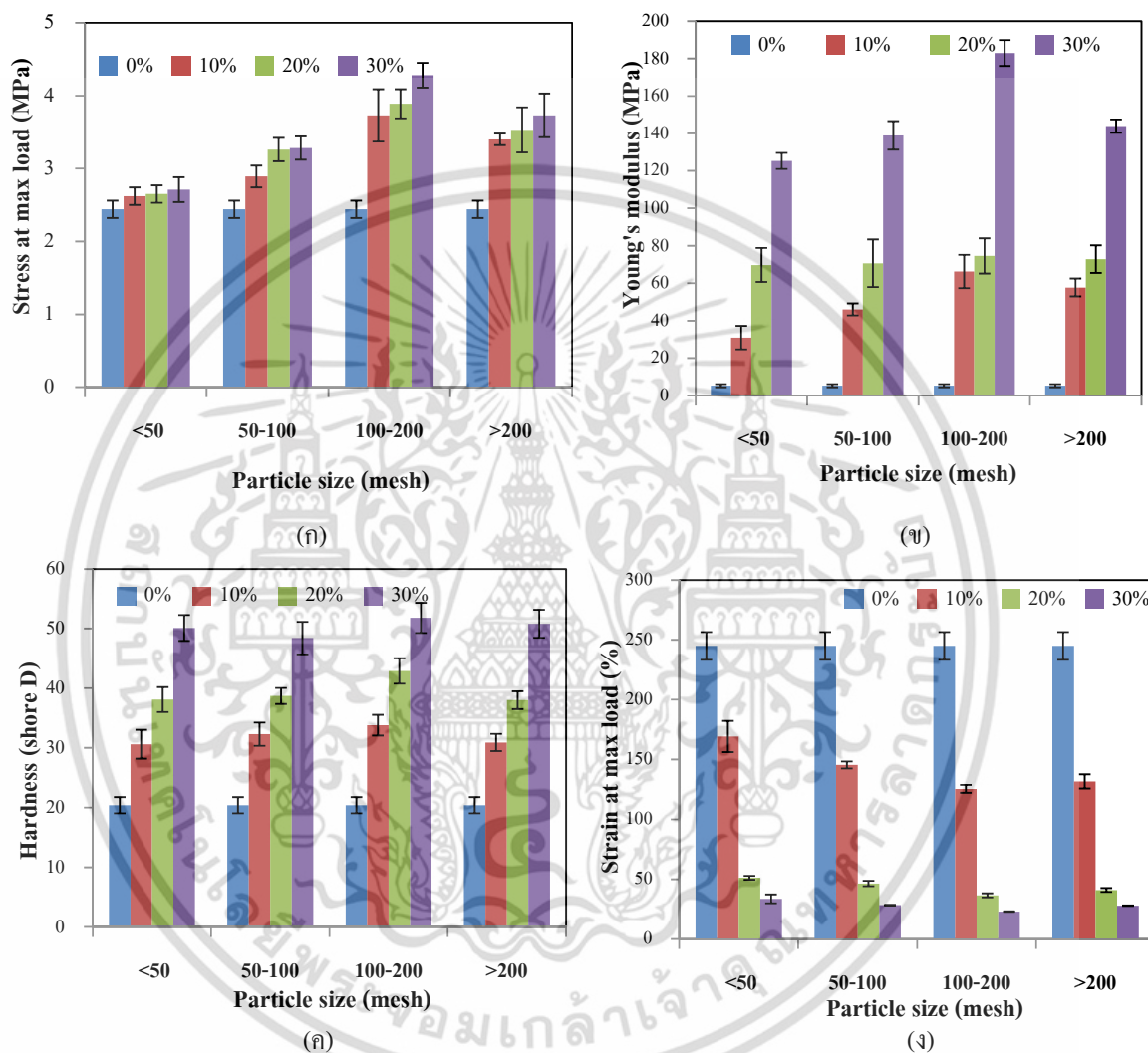
4.1.4.1 ผลของปริมาณและขนาดของซีลี้อยจากไม้สะเคาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ TPCS

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาผลของปริมาณและขนาด ได้แก่ ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส เฮอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และความแข็งกด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้แก่ 0%, 50% และ 100%RH โดยพิจารณาจาก TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนัก ที่ซีลี้อยมีขนาด <50 เมช, 50-100 เมช, 100-200 เมช และ >200 เมช ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ 5.22, 5.82, 7.16 และ 7.36 ตามลำดับ (ภาคผนวก ค) เปรียบเทียบกับ TPCS ที่ไม่มีการปรับปรุงโดยให้ผลการทดลองดังนี้



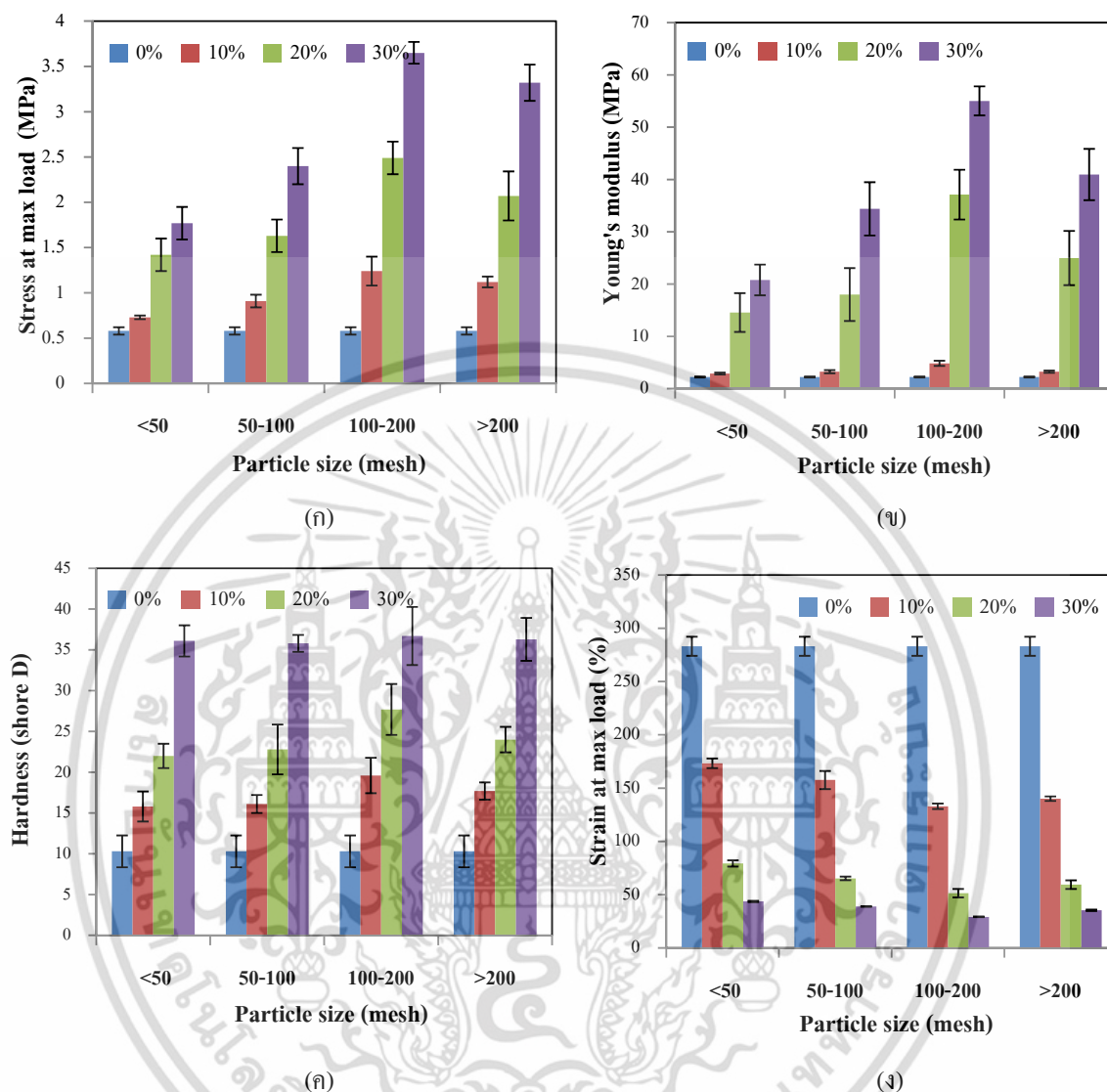
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยซีเมนต์ในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซ็นต์ความเคียว ณ จุดแรงดึงสูงสุด



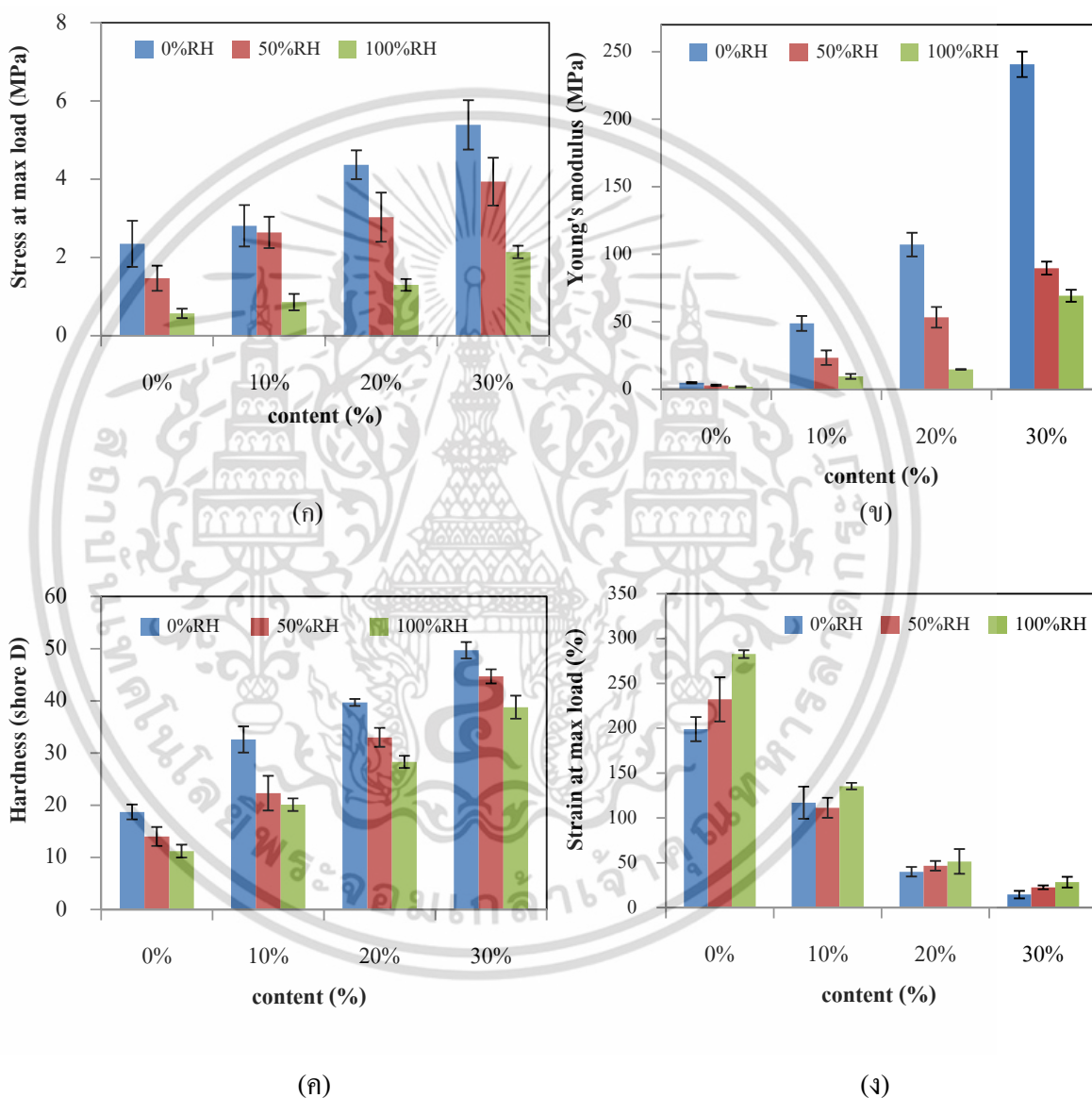
รูปที่ 4.18 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยซีเมนต์ในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซ็นต์ความเคียว ณ จุดแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



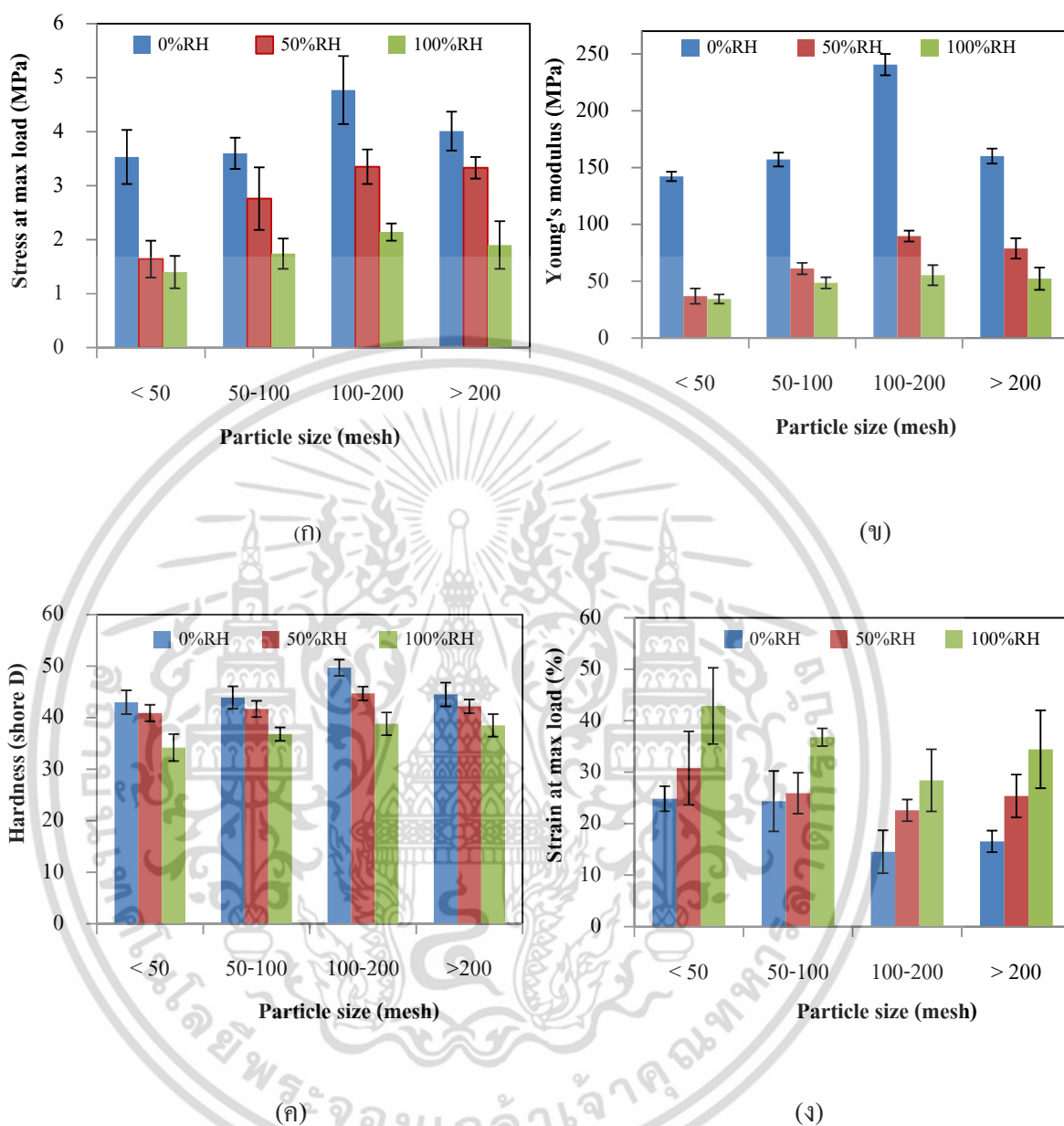
รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลของ TPCS ผสมด้วยขี้เถ้าในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซ็นต์ความเคียว ณ จุดแรงดึงสูงสุด

4.1.4.2 ผลของปริมาณและขนาดของขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ TPACS การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยปริมาณและขนาดของขี้เถ้าที่แตกต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้แก่ 0%, 50% และ 100%RH เปรียบเทียบกับ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุง แสดงผลจากการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลของ TPACS ผสมด้วยขี้เถ้าในปริมาณต่างๆ กัน ที่ขนาด 100-200 เมช ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของ TPACS พรมด้วยขี้เถ้าในขนาดต่างๆ กัน ที่ปริมาณขี้เถ้า 30% โดยน้ำหนัก ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17-4.19 (ก), (ข) และ (ค) แสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดา และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.20 (ก), (ข) และ (ค)) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่า ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกดของ TPCS, TPACS มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณของขี้เถ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้เถ้าทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ TPCS, TPACS นอกจากนี้ยังพบการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังและขี้เถ้าซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งพิกที่ตำแหน่ง O-H stretching และ O-H bending มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.1 และ 4.3) และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4.9-4.10) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัสดุขี้เถ้ากับแป้ง

จากรูปที่ 4.17-4.19 (ก), (ข) และ (ค) แสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดา และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในขนาดต่างๆ (รูปที่ 4.21 (ก), (ข) และ (ค)) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่า ความแข็งแรง ณ แรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกดของ TPCS, TPACS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของขี้เถ้ามีขนาดเล็ก เนื่องจากขี้เถ้าขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้สามารถเข้ากันได้ดีหรือรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุของแป้ง ได้มากขึ้น และขี้เถ้าที่มีขนาดเล็กกว่ามีแนวโน้มเกิดการกระจายตัวที่ติดบนวัสดุของแป้ง ซึ่งสอดคล้องกับจากการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4.11-4.12) เห็นได้ว่า ขี้เถ้าที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มเกิดการเกาะกลุ่มหรือรวมตัวกันมากกว่าขี้เถ้าที่มีขนาดเล็ก ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของ TPCS, TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขนาดขี้เถ้าขนาดใหญ่ต่ำกว่า TPCS, TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขนาดขี้เถ้าที่มีขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เถ้าขนาด >200 เมช มีค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกดลดลง อาจเกิดขึ้นเนื่องจากขี้เถ้ามีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่งผลให้ได้รับความร้อนจากกระบวนการผสมและการขึ้นรูปมาก อาจทำให้เกิดการเสียดสีของ TPCS, TPACS เนื่องจากความร้อน

จากรูปที่ 4.17-4.21 (ง) แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความแข็งแรง โมดูลัส และความแข็งกด เนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเพราะมีขี้เถ้าเข้าไปช่วยเสริมแรง เนื่องจากสมบัติขององค์ประกอบภายในขี้เถ้ามีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำจึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ผสมขี้เถ้า ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยึดออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า

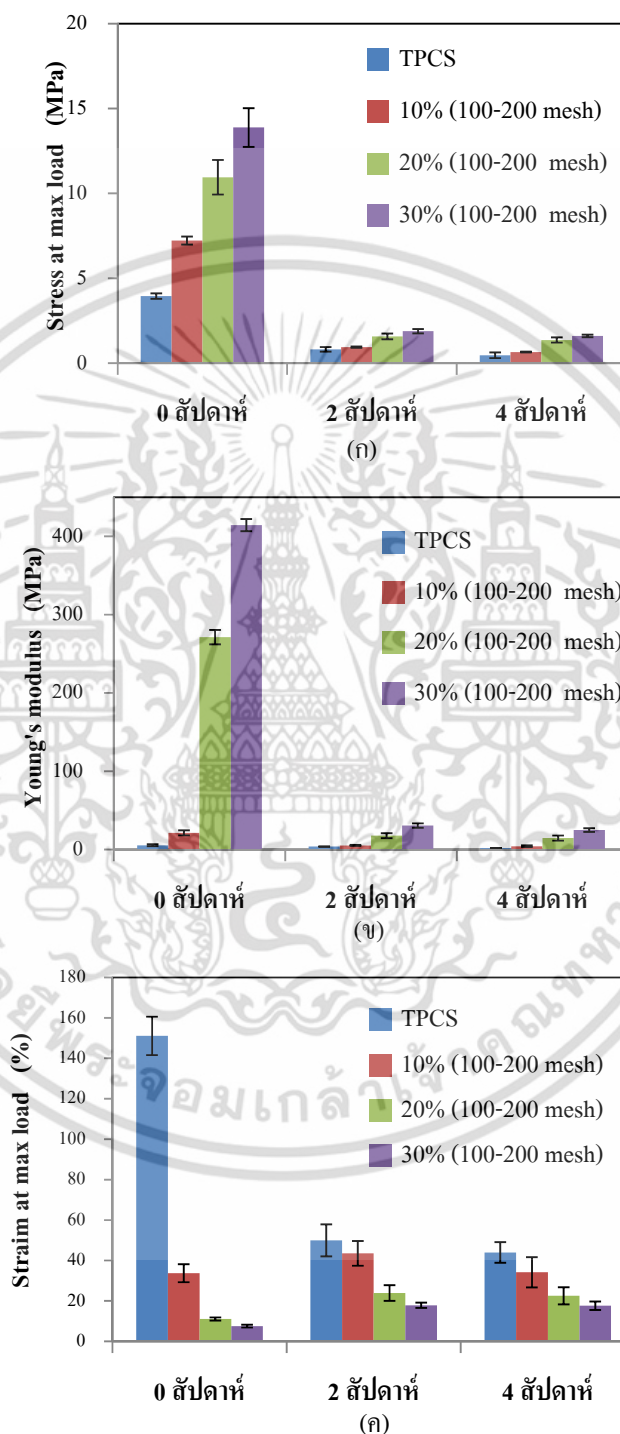
นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.17-4.21 (ก)-(ง) ผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่า TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยมีสมบัติเชิงกลด้อยลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความแข็งแรง มอดุลัส และความแข็งกดของ TPCS, TPACS มีค่าน้อยลง ในทางตรงข้ามเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด หรือการยืดตัวของชิ้นงาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งมีความเป็นขั้วที่สูง ว่องไวต่อความชื้นมาก ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวและนิ่มตัวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับน้ำ (รูปที่ 4.13-4.16) เห็นได้ว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% TPCS, TPACS ทุกสูตรมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่มากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ดังนั้น สมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ผสมขี้เลื่อยจากในปริมาณและขนาดที่ต่างกัน สรุปได้ว่า TPCS และ TPACS ที่ผสมขี้เลื่อยจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด 100-200 เมช มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยทำให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และความแข็งกด มีค่าสูงสุดของ TPCS และ TPACS โดยให้ค่าเพิ่มขึ้น 75%, 3365% และ 154% ตามลำดับ และ 168%, 2931% และ 219% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ TPCS และ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ตามลำดับ

4.1.5 การทดสอบการย่อยสลาย

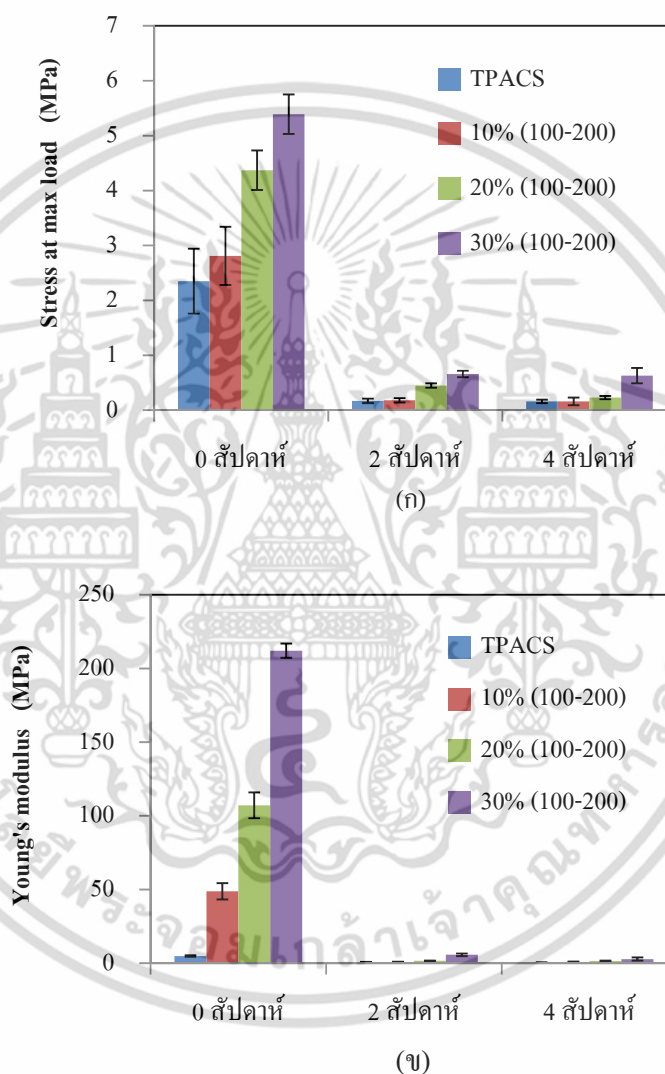
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยนำ TPCS และ TPACS สูตรต่างๆ มาฝังดินที่ความชื้น 5-10% โดยใช้ระยะเวลาในการฝังดิน 0, 2 และ 4 สัปดาห์ แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาผลของปริมาณและผลของขนาด ได้แก่ ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดินได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.5.1 ผลของปริมาณของซีเมนต์จากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติการย่อยสลาย โดยการฝังดินของ TPCS และ TPACS

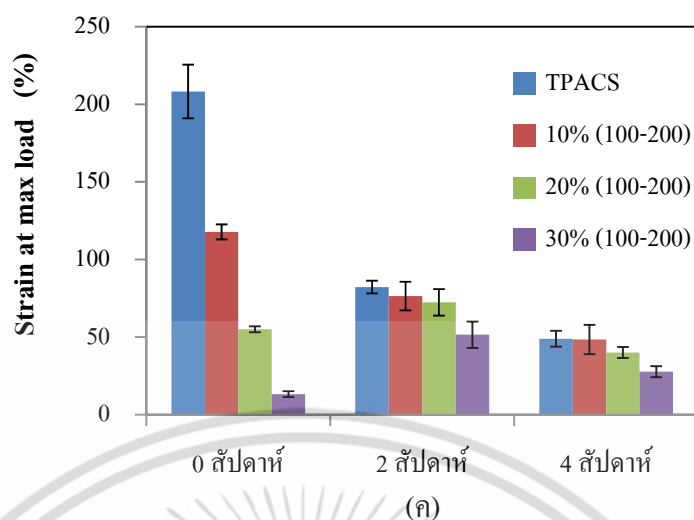


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 10%, 20% และ 30% ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด



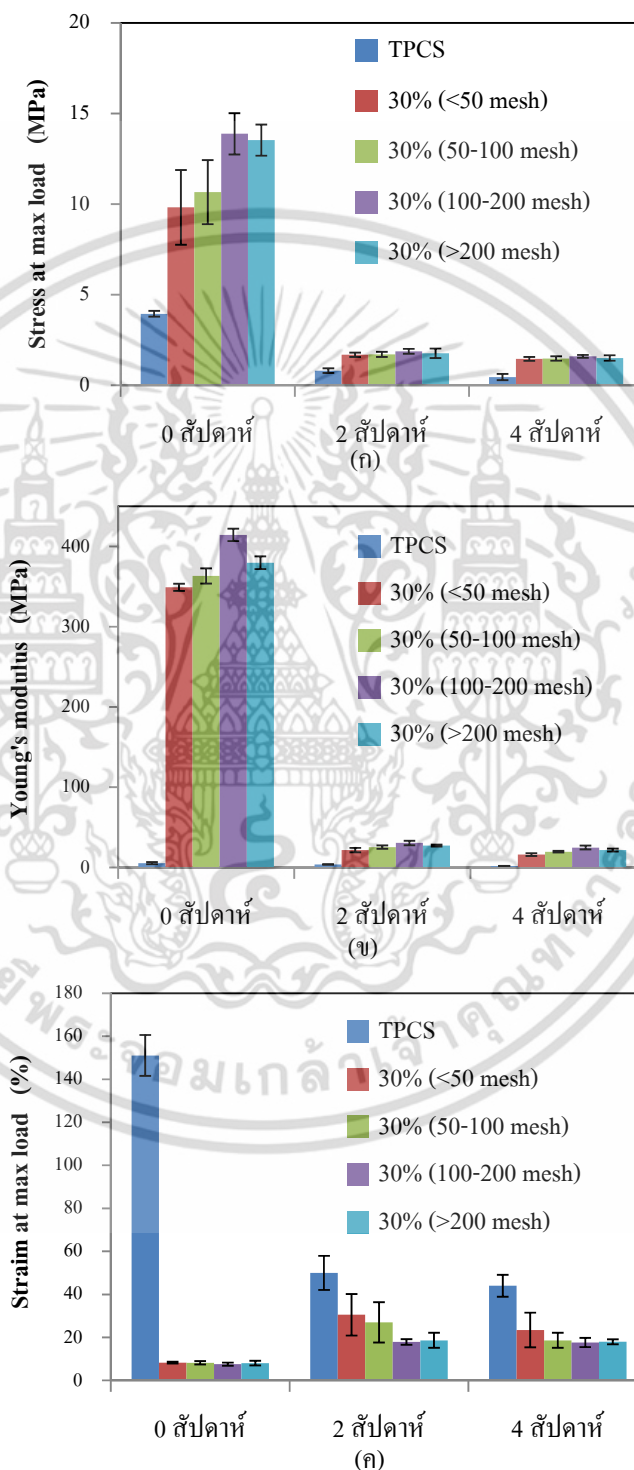
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยใยใ้เลื่อยขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 10%, 20% และ 30% ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

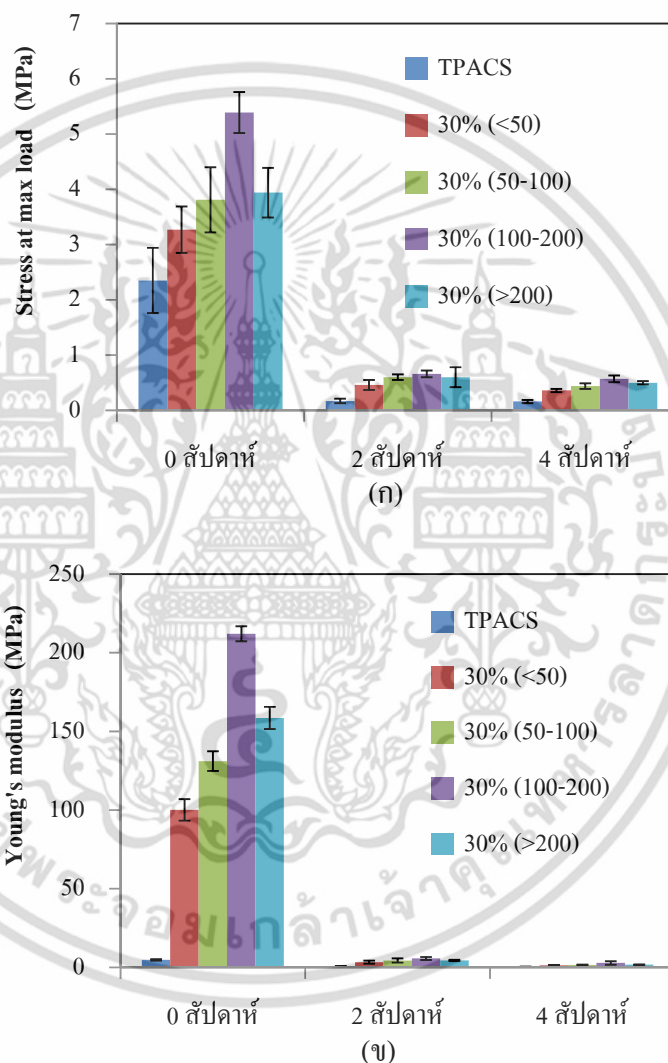
จากการทดสอบการย่อยสลาย ในรูปที่ 4.21-4.22 (ก) และ (ข) แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยใยใ้เลื่อยขนาด 100-200 เมช ที่มีปริมาณต่างๆ กัน ก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ พบว่า ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และ โมดูลัส มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน เนื่องจากชั้นงานมีการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นงานอ่อนและนิ่มตัว โดยสูตรที่มีปริมาณใยใ้เลื่อยน้อยให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าสูตรที่มีปริมาณใยใ้เลื่อยมากกว่า เนื่องจากวัฏภาคใยใ้เลื่อยมีความแข็งมากกว่าวัฏภาคของแป้งซึ่งสามารถดูดความชื้นได้มากกว่า นอกจากนี้ พบว่า TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยใยใ้เลื่อยมีสมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินต่ำที่สุด เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังว่องไวต่อความชื้นและสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าใยใ้เลื่อย

4.1.5.2 ผลของขนาดของซี่เกลียวจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินของ TPCS และ TPACS

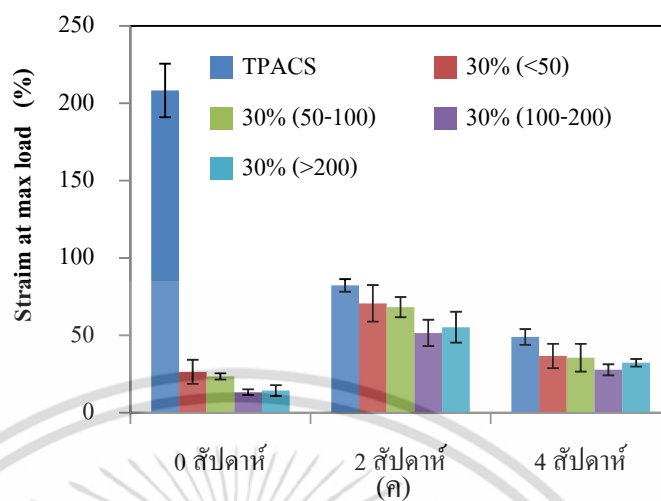


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ก่อนฝังดิน เปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุง และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ก่อนฝังดิน เปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จากการทดสอบการย่อยสลาย ในรูปที่ 4.24-4.25 (ก) และ (ข) แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่มีปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ในขนาดต่างๆ พบว่า ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานมีการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานอ่อนและนุ่มตัวเช่นเดียวกับผลของปริมาณ เมื่อหลังทำการฝังดินที่ขนาดต่างๆ พบว่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของขี้เลื่อยไม่มีผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามกับเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.22-4.25 (ค)) ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณขี้เลื่อยน้อยลงและขนาดขี้เลื่อยที่ใหญ่ขึ้น

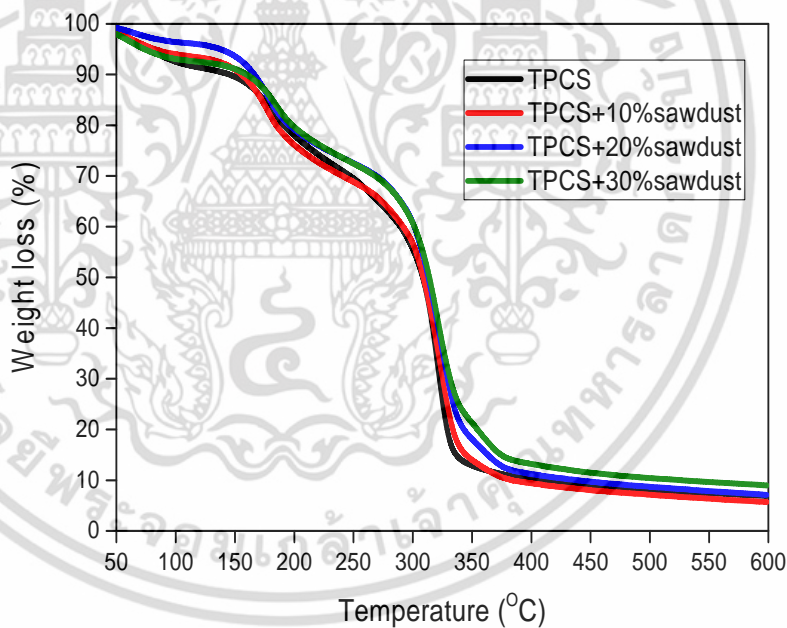
เมื่อพิจารณาสมบัติในการย่อยสลาย พบว่า TPCS และ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยเกิดการย่อยสลายได้มากที่สุด ดังนั้น TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยปริมาณ 30% เกิดการย่อยสลายได้ช้าที่สุด แต่ขนาดของขี้เลื่อยไม่มีผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานมากนัก

4.1.6 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้มีการศึกษาสมบัติของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (% Weight loss) ของ TPCS และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีปริมาณและขนาดอนุภาคแตกต่างกันด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA)

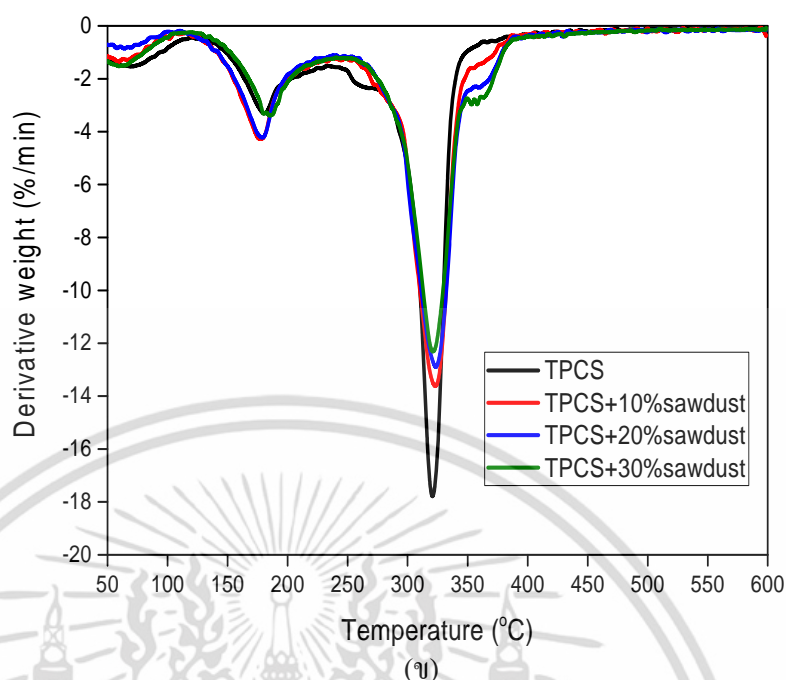
4.1.6.1 ผลของปริมาณของขี้เลื่อยที่มีผลต่อ TPCS และ TPACS

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีปริมาณต่างกัน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



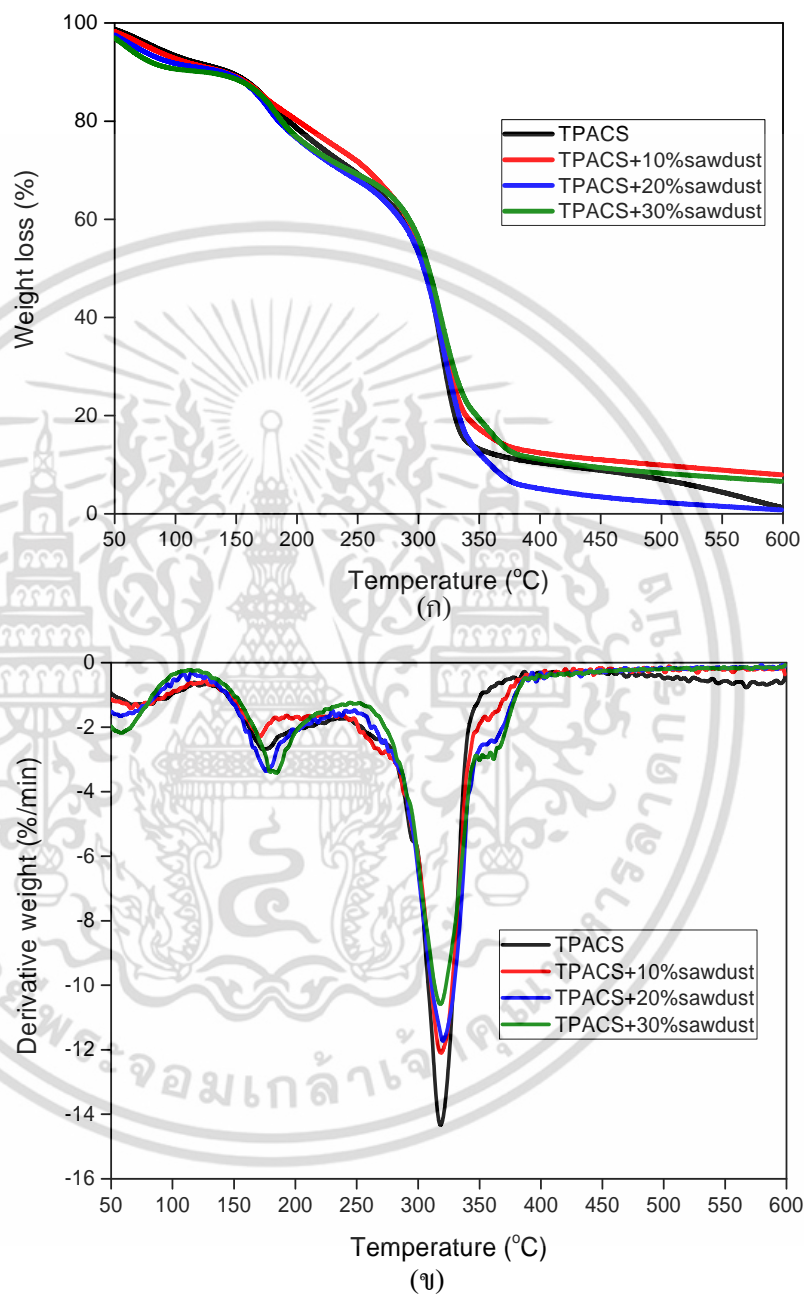
รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมของ TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาโดยใช้อนุภาคของขี้เลื่อย (100 - 200 เมช) ที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณต่างกัน 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ขี้เลื่อย)	
TPCS	180.7	320.7	-	64.22
10% (100-200)	177.3	323.1	363.0	55.57
20% (100-200)	178.9	323.4	364.0	56.57
30% (100-200)	185.4	321.0	358.0	52.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเยอจากไม้สะเคาที่มีปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมของ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเยอจากไม้สะเคาโดยใช้อนุภาคของซีลีเยอ (100 - 200 เมช) ที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

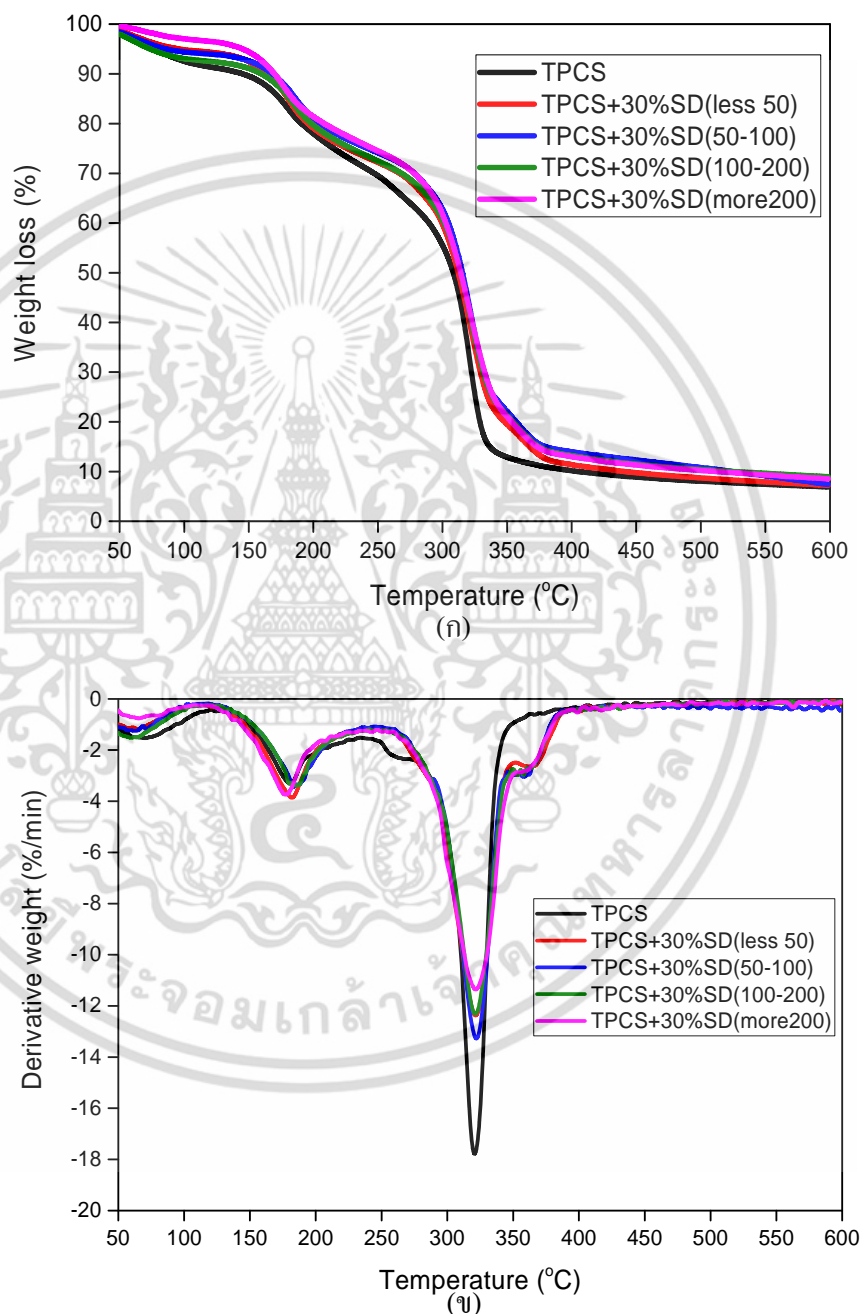
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณต่างกัน 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ขี้เถ้า)	
TPACS	173.7	318.0	-	70.44
10% (100-200)	171.1	318.6	357.0	58.38
20% (100-200)	176.2	320.1	359.7	57.21
30% (100-200)	184.4	318.5	359.0	49.50

จากตารางที่ 4.1-4.2 และ รูปที่ 4.26-4.27 ตามลำดับ พบว่า เมื่อ TPCS และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากสะเดา อุณหภูมิการสลายตัวจะปรากฏขึ้น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 179-181 องศาเซลเซียส [39] ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง ประมาณ 320 องศาเซลเซียส [46] และอุณหภูมิการสลายตัวของสตาร์ชแอซิเตด ประมาณ 318-320 องศาเซลเซียส [45] ช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของขี้เถ้าจากไม้สะเดาในช่วง 363-364 องศาเซลเซียส [41] โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ผสมขี้เถ้าลงไปไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งใน TPCS และ TPACS ที่ไม่มีการผสมขี้เถ้า นอกจากนี้ปริมาณของขี้เถ้าส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยพิจารณาในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดีขึ้น

4.1.6.2 ผลของขนาดอนุภาคของซีลีเนียมที่มีผลต่อ TPCS และ TPACS

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน



รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมของ TPCS และ TPCS มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดา โดยใช้ซีลีเนียมในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

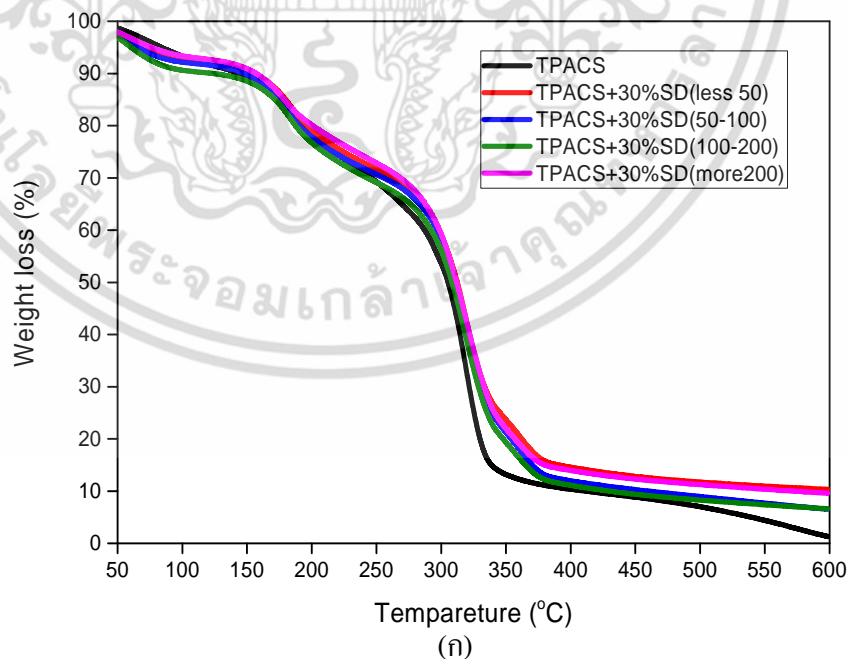
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคที่ต่างกัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช

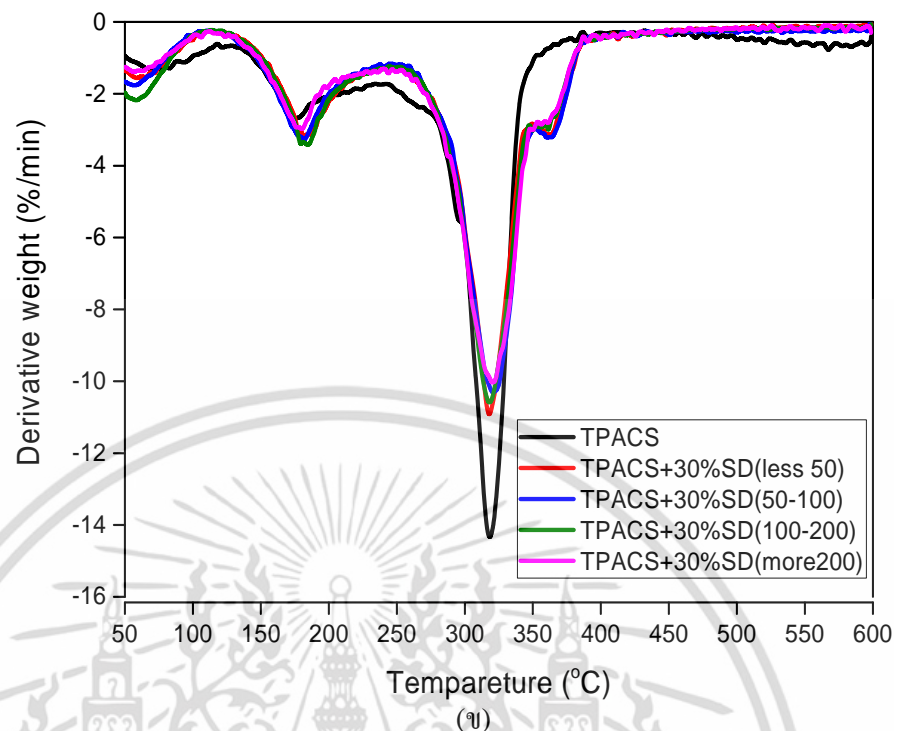
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กาลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ขี้เถ้า)	
TPACS	180.7	320.7	-	64.22
30% (<50)	181.9	321.4	364.8	53.97
30% (50-100)	182.9	322.0	357.8	51.50
30% (100-200)	185.4	321.0	358.0	52.23
30% (>200)	177.2	321.5	364.0	54.93

เทอร์โมแกรมของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ

กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 เทอร์โมแกรมของ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่างจากไม้สะเดา ใน ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPACS ที่ไม่ได้ ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ และ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่างจากไม้สะเดาที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคที่ต่างกัน <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			% น้ำหนักที่ หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ซีลี้อย)	
TPACS	173.7	318.0	-	70.44
30% (<50)	181.8	318.2	360.1	48.38
30% (50-100)	181.9	320.5	362.3	50.02
30% (100-200)	184.4	318.5	359.0	49.50
30% (>200)	180.2	320.3	357.0	52.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3-4.4 และ รูปที่ 4.28-4.29 ตามลำดับ พบว่า เมื่อนำ TPCS และ TPACS มาทำการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมซีลีเนียมจากไม้สะเดาโดยใช้ขนาดอนุภาคต่างกัน คือ <50 เมช, 50-100 เมช, 100-200 เมช และ >200 เมช ในปริมาณที่เท่ากัน (30% โดยน้ำหนัก) พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ผสมซีลีเนียมลงไปมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งใน TPCS และ TPACS ที่ไม่มีการผสมซีลีเนียม อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังไม่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของซีลีเนียม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของซีลีเนียมไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยพิจารณาในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ขนาดของซีลีเนียมต่างกัน พบว่า เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การเปลี่ยนขนาดอนุภาคของซีลีเนียมไม่มีผลต่อความมีเสถียรภาพทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ



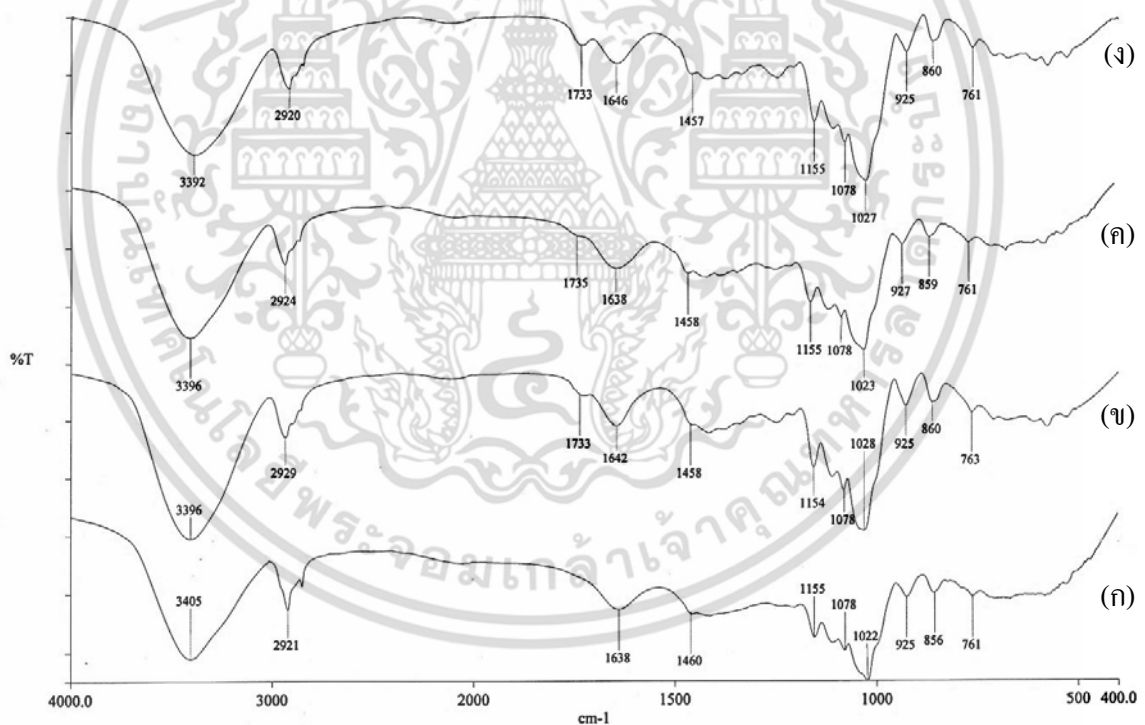
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอสซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)

จากผลการทดลองในตอนๆ 4.1 และ 4.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอสซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณของขี้เลื่อย 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด 100-200 เมช ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุดโดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล และการดูดซึมน้ำ ดังนั้น สำหรับการศึกษสมบัติต่างๆ ในเชิงเปรียบเทียบระหว่าง TPCS และ TPACS ที่ปริมาณขี้เลื่อย 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด 100-200 เมช ซึ่ง TPACS ที่ใช้มีค่าระดับการแทนที่หรือ Degree of substitution (DS) เท่ากับ 0.8 (ข้อมูลจากบริษัท)

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 4.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่ปรับปรุงด้วยขี้เลื่อยปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาค 100-200 เมช (ก) TPCS (ข) TPACS (ค) TPCS+30% sawdust(100-200) และ (ง) TPACS+30% sawdust(100-200)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านของแสงของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีอียปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาค 100-200 เมช สำหรับความเหมือนและความแตกต่างระหว่างของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลีอียปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาค 100-200 เมช (รูปที่ 4.30 (ก)-(ง)) พบว่า

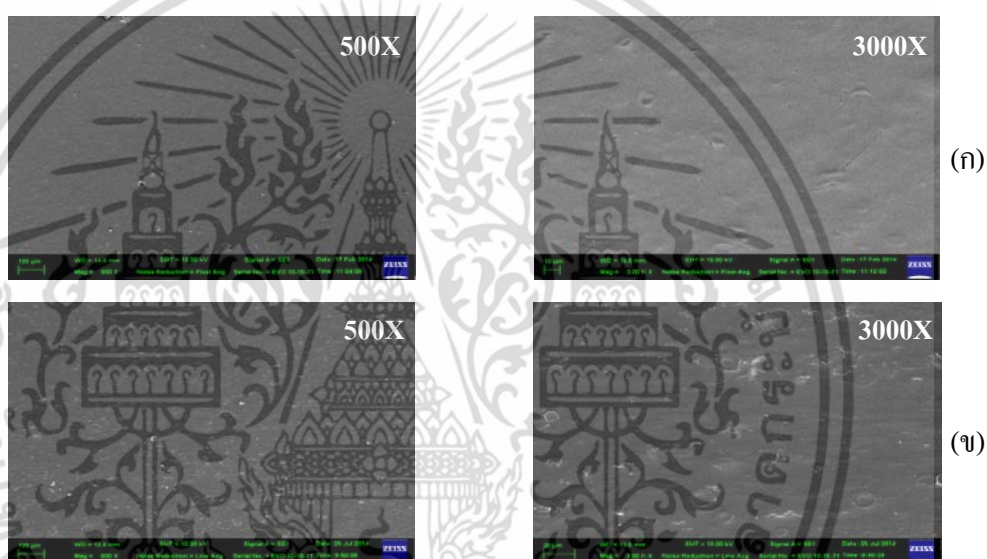
1. พีกที่ 3405 cm^{-1} และ 3396 cm^{-1} ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ในแป้งของ TPCS และ TPACS ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอีย ทำให้พีกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้ แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ [40] ระหว่างแป้งและซีลีอียที่ใส่เข้าไป นอกจากนี้สำหรับ TPACS ไม่เห็นเปลี่ยนแปลงการ Shift ของการสั่นแบบ O-H bending อาจเป็นเพราะการสั่นแบบ O-H bending ต้องใช้พลังงานในการสั่นมากกว่า O-H stretching ซึ่ง TPACS มีหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้างโมเลกุลของแป้ง มีความเกาะเกาะมากกว่าหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งอาจขัดขวางการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้

2. เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอีย จากสเปกตรัมของ TPACS (รูปที่ 4.30 (ข)) พบพีกที่ตำแหน่ง 1733 cm^{-1} ในขณะที่สเปกตรัมของ TPCS (รูปที่ 4.30 (ก)) ไม่พบพีกที่ตำแหน่งนี้ซึ่งเกิดการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชแอทเทคจากแป้งมันสำปะหลัง [28] เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชแอทเทค มี C=O อยู่ในโครงสร้าง

3. เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPCS และ TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอีย (รูปที่ 4.30 (ค)-(ง)) จากรูปแสดงสเปกตรัมที่มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่พบพีกที่ตำแหน่ง 1733 cm^{-1} ของ TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียมีความเข้มของพีกที่มากกว่า TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอีย ซึ่งเกิดจากการซ้อนทับกันของการสั่นแบบ C=O stretching ของทั้งหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่มีอยู่ในซีลีอียจากไม้สะเดา [35] และหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชแอทเทคจากแป้งมันสำปะหลัง [28] ในขณะที่ TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียนั้น พีกที่ตำแหน่ง 1735 cm^{-1} มีความเข้มของพีกที่น้อยกว่า ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ใน โมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในซีลีอียจากไม้สะเดาเท่านั้น

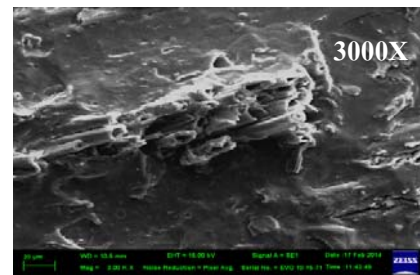
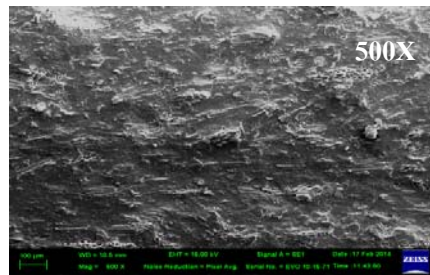
4.2.2 สัณฐานวิทยา

สำหรับการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีลี้อยและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างซีลี้อยกับเมทริกซ์ของแป้ง โดยพิจารณาที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด 100-200 เมช ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ของ TPCS, TPACS และซีลี้อยจากไม้สะเดา ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

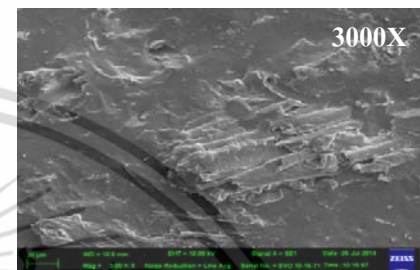
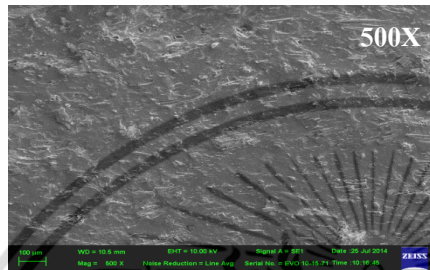


รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยา (ก) TPCS (ข) TPACS ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

จากรูปที่ 4.31 (ก) - (ข) แสดงภาพจาก SEM ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่าของ TPCS และ TPACS โดยพบว่าทั้ง TPCS และ TPACS มีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ แต่พบเม็ดกลมที่เกิดจากเม็ดแป้งหลอมไม่สมบูรณ์ในบางส่วน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 ลักษณะวิทยา (ก) TPCS + 30% sawdust 100-200 เมช (ข) TPACS + 30% sawdust 100-200 เมช ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า

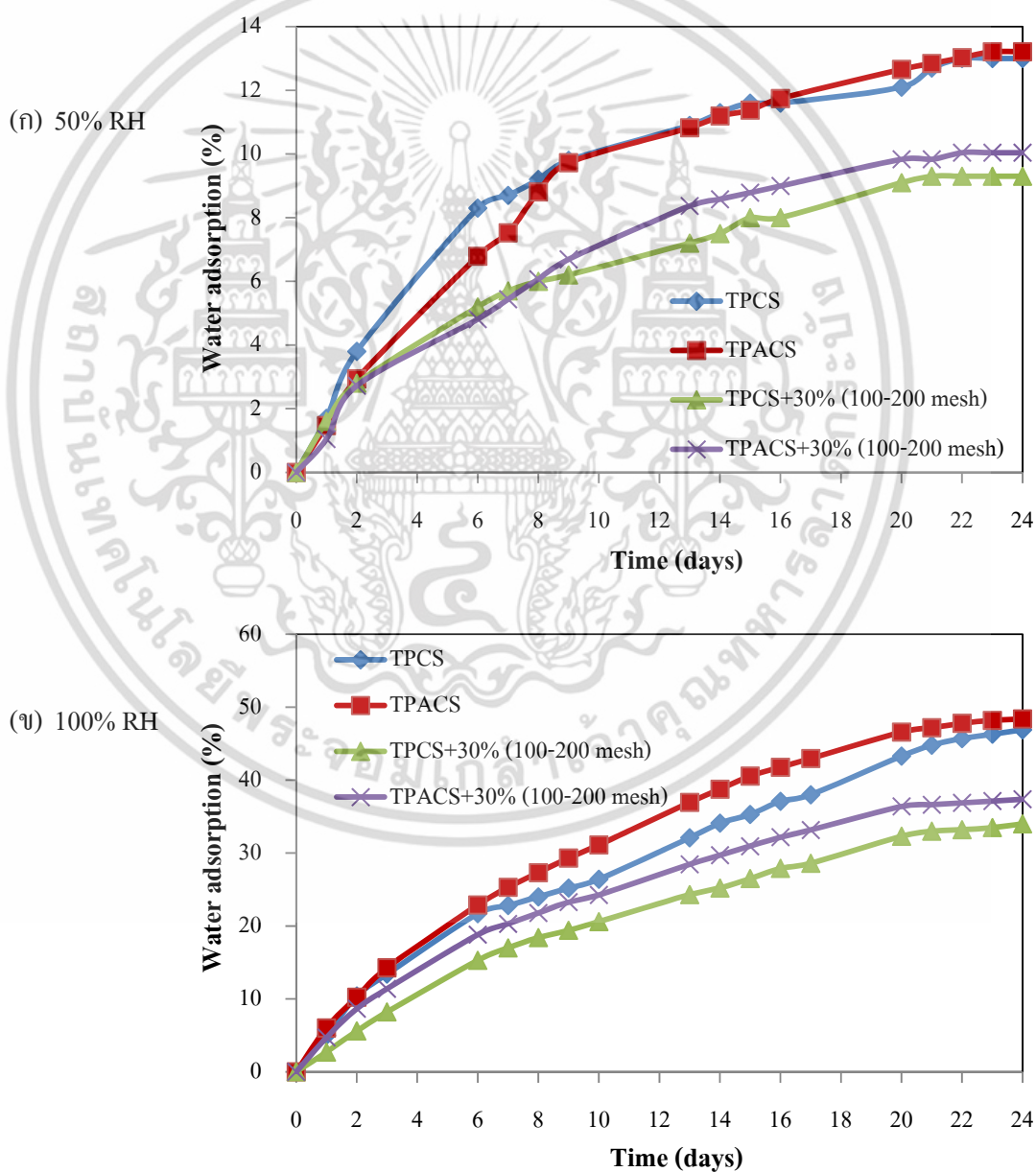
จากภาพ SEM ซึ่งแสดงภาคตัดขวางของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ใยเลื่อยไม้ สะเดาขนาดอนุภาค 100-200 เมช ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.32 (ก)-(ข)) ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า ใยเลื่อยไม้สะเดามีการกระจายตัวบนเมทริกซ์ แป้งและมีการฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ และพื้นผิวของใยเลื่อยถูกปกคลุมด้วยแป้ง ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุแป้งและใยเลื่อย เมื่อใช้กำลังขยาย 3000 เท่า สามารถมองเห็นรูปร่างระหว่าง TPCS, TPACS และใยเลื่อย พบว่าใยเลื่อยมีความเข้ากันได้ดีกับวัสดุของ TPCS และ TPACS โดยสังเกตจากรอยต่อระหว่างวัสดุที่ไม่มีการแยกส่วนกัน การที่ใยเลื่อยสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้กับเมทริกซ์แป้ง เนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงความ มีขั้วเหมือนกันทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุ มีการยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น มีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แป้งกับใยเลื่อยที่แข็งแรง

ดังนั้น จากลักษณะวิทยาของทั้ง TPCS และ TPACS ไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวและรอยต่อระหว่างวัสดุของ TPCS , TPACS และใยเลื่อยจากไม้สะเดา เนื่องจากวัสดุทั้งสองสามารถเข้ากันได้ดี

4.2.3 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

4.2.3.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

เปรียบเทียบผลของ TPCS และ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยซีลีเนียม และที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.33 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงด้วยซีลี้อย่างไม่สะเคา ที่ขนาด 100-200 เมช ในปริมาณ 30% และ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ (ก) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากการทดสอบการดูดซับน้ำภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% ของ TPCS เปรียบเทียบกับ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ (รูปที่ 4.33 (ก) และ (ข)) พบว่า TPACS มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงกว่า TPCS เนื่องจาก โมเลกุลของสตาร์ชแอซิเทคนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก นอกจากนี้ TPACS ที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (ข้อมูลจากบริษัท DS 0.8) มีปริมาณหมู่แอซิเทคนั้นเพียงพอเพื่อแสดงสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ แต่แสดงสมบัติที่ชอบน้ำมากขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วสูงของพันธะ C=O [23,42] ดังนั้น TPACS จึงมีค่าการดูดซับน้ำสูงกว่า TPCS เมื่อนำ TPCS และ TPACS มาปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาด 100-200 เมช พบว่าชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลง เนื่องจากซีลี้อยู่เข้าไปยึดเกาะและมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นกับส่วนของเมทริกซ์มากขึ้น ทำให้น้ำแทรกเข้าสู่ส่วนของเมทริกซ์ได้น้อยลง โดย TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่มีค่าการดูดซับน้ำที่มากกว่า TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ข้างต้น

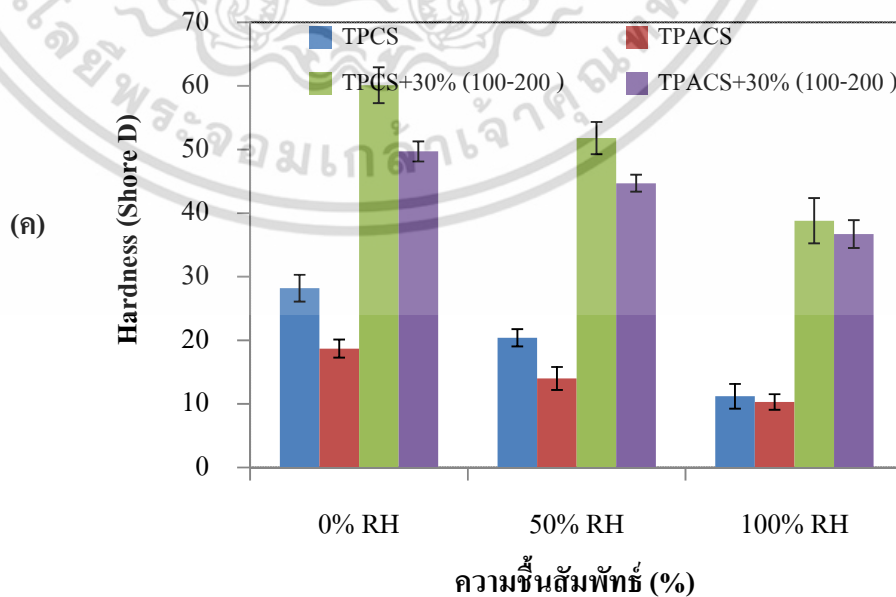
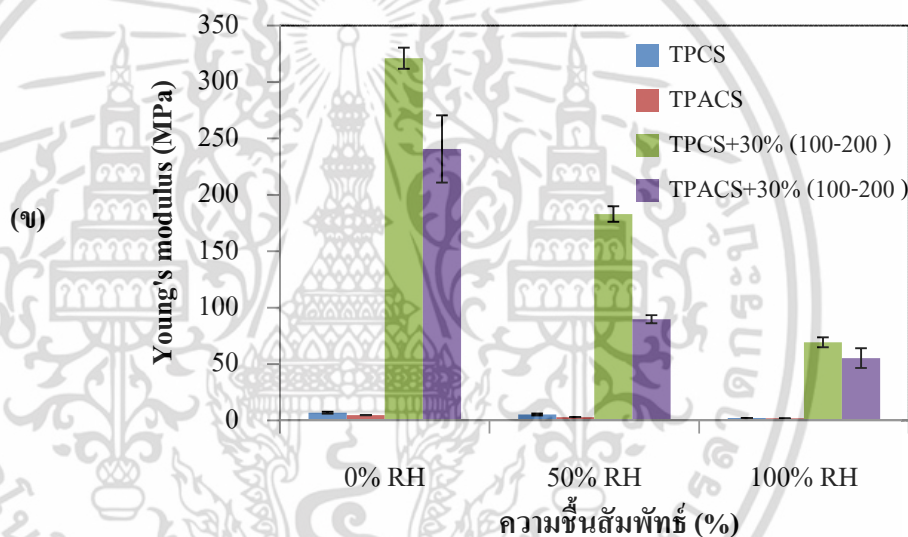
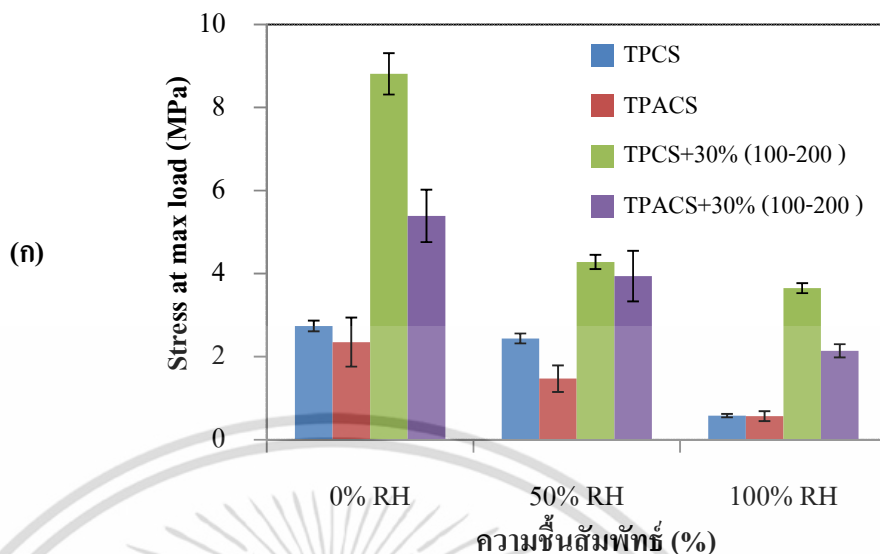
เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% มีค่ามากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS

จากผลการทดลองการดูดซับน้ำ พบว่า TPACS สูตรที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่สามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุดและ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยซีลี้อยู่ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยที่สุด

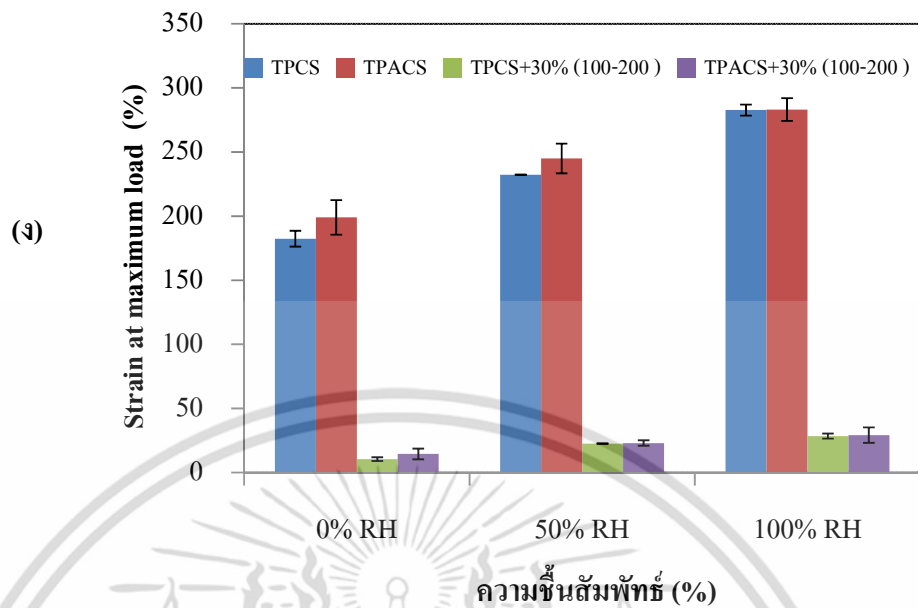
4.2.4 สมบัติเชิงกล

สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาผลของชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรและที่ผ่านการตัดแปรให้เป็นสตาร์ชแอซิเทคนั้น ได้แก่ ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และความแข็งกด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้แก่ 0%, 50% และ 100%RH โดยพิจารณา TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยู่ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ซีลี้อยู่มีขนาด 100-200 เมช ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ 7.16 (ภาคผนวก ค) โดยให้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ไม่ผสมขี้เถ้า และ TPCS, TPACS ที่ผสมด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช และ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส (ค) ความแข็งกด และ (ง) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 4.34 แสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเคาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดของขี้เถ้า 100-200 เมช พบว่า ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และความแข็งกดของ TPCS และ TPACS มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า เนื่องจากขี้เถ้าทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ TPCS และ TPACS นอกจากนี้ยังพบการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและขี้เถ้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งพีคที่ตำแหน่ง O-H stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.30) และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4.32) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัสดุขี้เถ้ากับแป้ง แต่ในทางกลับกันจากรูปที่ 4.32 (ง) แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความแข็งแรง มอดุลัส และความแข็งกด เนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเพราะมีขี้เถ้าเข้าไปช่วยเสริมแรงเนื่องจากสมบัติขององค์ประกอบภายในขี้เถ้ามีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยึดออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า

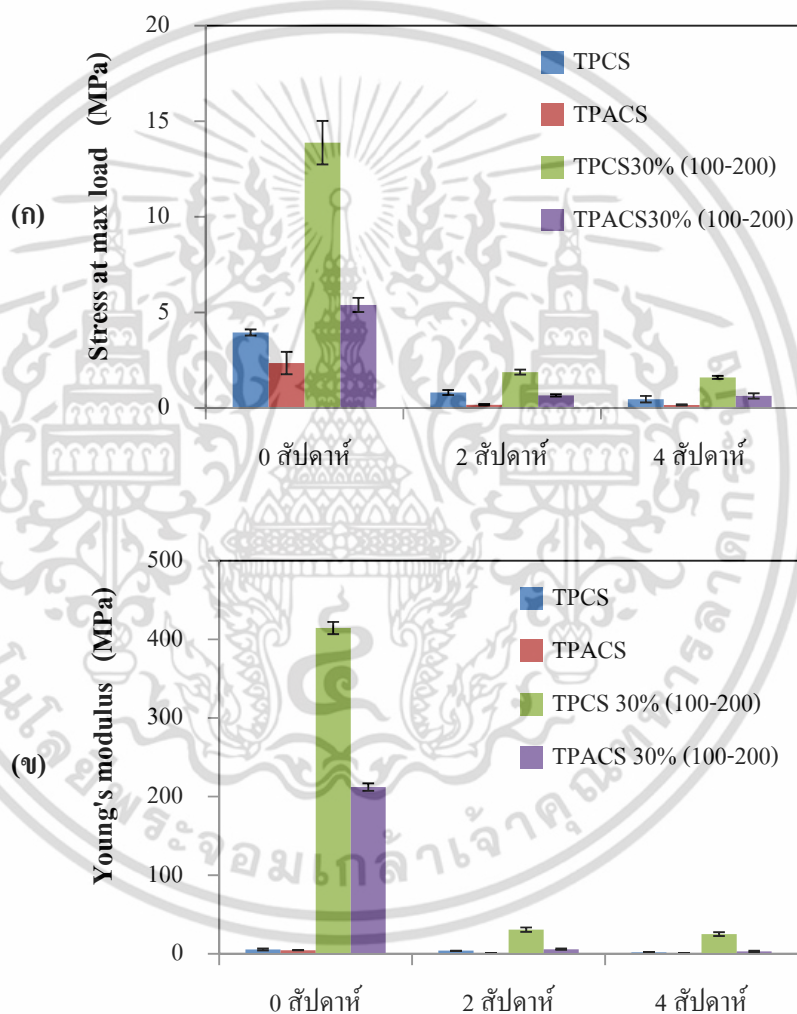
เมื่อพิจารณาชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรทางเคมีแล้ว จากผลการทดลอง พบว่า TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า แสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกดที่ต่ำกว่า TPCS ทั้งที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ TPACS (ข้อมูลจากบริษัท : ค่า Degree of substitution, DS = 0.8) มีหมู่เอซิล (Alkyl groups) ที่เกิดจากการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ขนาดใหญ่กว่าหมู่ไฮดรอกซิล มีความเกาะเกาะมากกว่า ส่งผลให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งเป็นไปได้ยากขึ้น และยังขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้ง [28,42] ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ต่ำกว่า TPCS

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.34 (ก-ง) แสดงผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่า ทั้ง TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้ามีสมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความแข็งแรง โมดูลัส และความแข็งกดของ TPCS, TPACS มีค่าน้อยลง ในทางตรงข้ามเปอร์เซ็นต์ความเคียว ณ จุดแรงดึงสูงสุด หรือการยืดตัวของชิ้นงาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรทางเคมีแล้ว จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้ามีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่า TPCS เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชเอซิเตต มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และมีหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของหมู่เอสเตอร์ในโมเลกุลของสตาร์ชเอซิเตต ซึ่งมีความเป็นขั้วที่สูง ว่องไวต่อความชื้นมาก [23,42] สอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับน้ำ (รูปที่ 4.33 (ก)-(ข)) ทำให้ชิ้นงานสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย นอกจากนี้ น้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว นิ่มตัวมากขึ้น

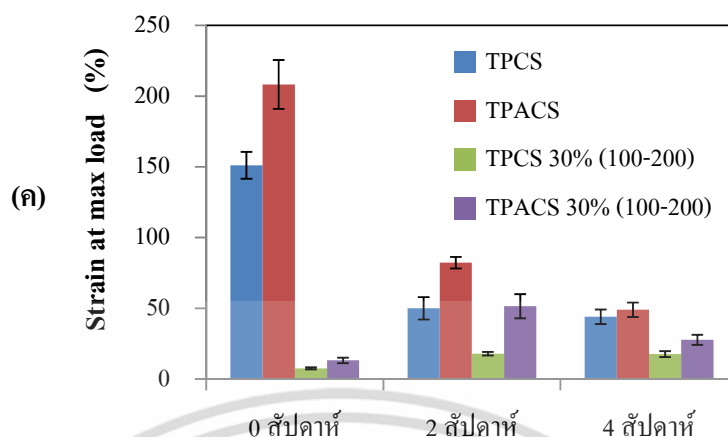
เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช สรุปได้ว่า TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และที่ขนาด 100-200 เมช มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยทำให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็งกด มีค่าสูงสุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 75%, 3365% และ 154% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า และเพิ่มขึ้น 191%, 6081% และ 270% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

4.2.5 การทดสอบการย่อยสลาย

สำหรับการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ของ TPCS และ TPACS ที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดา ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช มาเปรียบเทียบกัน โดยฝังดินที่ความชื้น 5-10% เป็นระยะเวลาในการฝังดิน 0, 2 และ 4 สัปดาห์ แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน ได้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



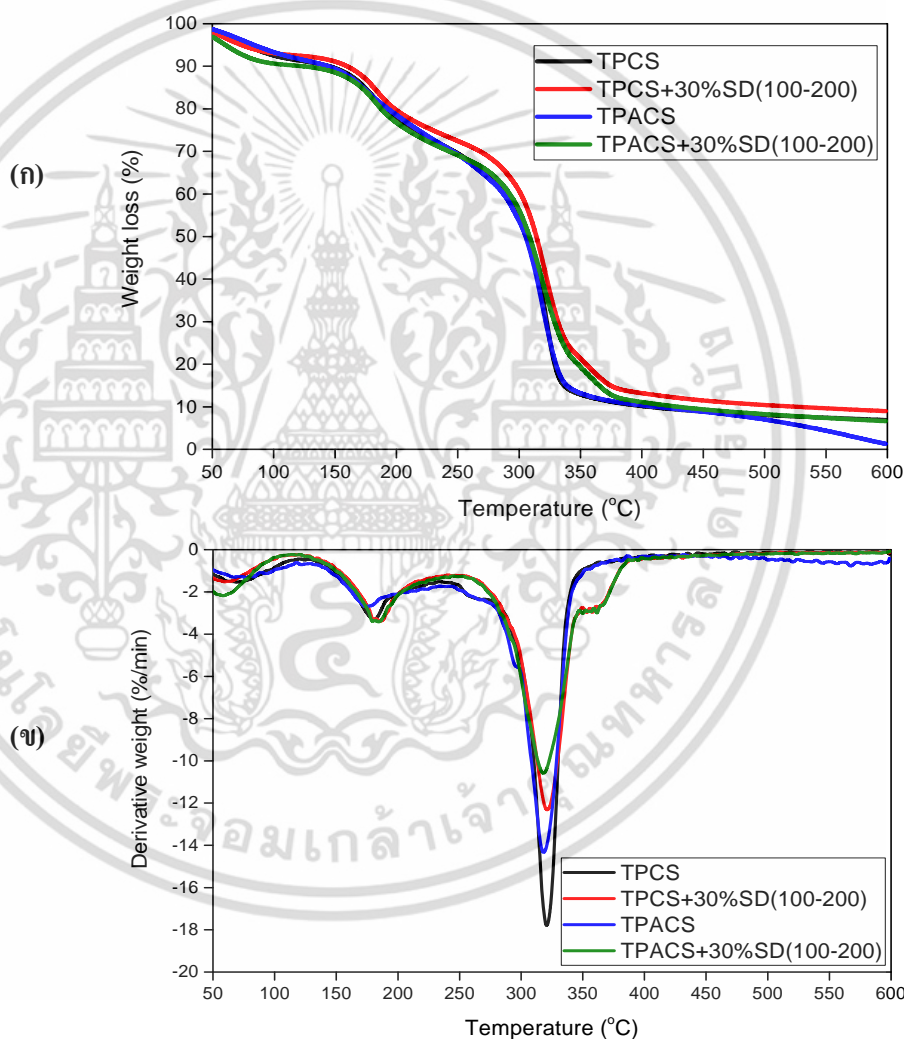
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ผสมจีลีโอ และ TPCS, TPACS ที่ผสมด้วยจีลีโอขนาด 100-200 เมช ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ก่อนฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) มอดูลัส และ(ค) เปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จากการทดสอบการย่อยสลาย ในรูปที่ 4.35 (ก) และ (ข) แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอขนาด 100-200 เมช ที่มีปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ พบว่า ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัส มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก ในทางตรงกันข้ามกับเปอร์เซนต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด ในรูปที่ 4.35 (ค) หลังทำการฝังดินเป็นเวลา 2 สัปดาห์ สูตร TPCS และ TPACS ที่ใส่จีลีโอลงไป พบว่า ชิ้นงานมีการยึดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานมีการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานอ่อนและนิ่มตัว โดยสูตรที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลือนั้นให้สมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินที่ดีกว่าสูตรที่ไม่มีปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอ เนื่องจากวัฏภาคจีลีโอช่วยในการยึดเกาะส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งไว้ ซึ่งจีลีโอความแข็งแรงมากกว่าวัฏภาคของแป้ง และจีลีโอสามารถดูดความชื้นได้น้อยกว่าแป้ง

นอกจากนี้ TPCS มีการดูดซับน้ำที่น้อยกว่า TPACS (จากผลการดูดซับน้ำ รูปที่ 4.33) ซึ่งโดยทั่วไปส่วนที่ย่อยสลายก่อน คือ ส่วนที่เป็นแป้ง จึงส่งผลให้ TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอมีการย่อยสลายได้ช้าที่สุด ดังนั้น TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอ 30% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินสูงที่สุด

4.2.6 สมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องเทอร์โม-กราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ได้มีการศึกษาสมบัติของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%Weight loss) ของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยจีเลี่ยจากไม้สะเดาที่มีปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และขนาด 100-200 เมช



รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรมของ TPCS, TPACS และ TPCS, TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยจีเลี่ยจากไม้สะเดาโดยใช้อุณหภูมิของจีเลี่ย (100 - 200 เมช) ที่มีปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS, TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและ TPCS, TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้สะเดาด้วยขนาดอนุภาค 100-200 เมช ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ซีลี้อย)	
TPCS	180.7	320.7	-	64.22
TPACS	173.7	318.0	-	70.44
TPCS + 30% (100-200)	185.4	321.0	358.0	52.23
TPACS + 30% (100-200)	184.4	318.5	359.0	49.50

จากผลการทดลอง พบว่า TPCS และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้สะเดา มีอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าใกล้เคียงกันและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปโดยเราพิจารณาในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มลดลง กล่าวได้ว่า การเติมซีลี้อยลงไป ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของแป้งระหว่างแป้งที่ไม่ผ่านการคัดแปรทางเคมีและแป้งที่ผ่านการคัดแปรทางเคมี พบว่า TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งสูงกว่า TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย เพราะ TPCS มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งกับแป้ง หรือแป้งกับซีลี้อยได้ดีกว่า ส่งผลทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อทำลายพันธะที่เกิดขึ้นนี้ ต่างจาก TPACS ที่ใช้ อาจเนื่องมาจาก TPACS มีหมู่ไฮดรอกซิลน้อยกว่า เนื่องจากถูกแทนที่ด้วยหมู่เอซิลบางส่วน อาจทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนได้น้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งต่ำกว่า TPCS

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง พบว่า TPCS มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปต่ำกว่า TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย ซึ่งแสดงถึงความ มีเสถียรภาพที่ดีกว่า เพราะมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่ดี และนอกจากนี้ พบว่า TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีค่าใกล้เคียงกับ TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย ซึ่งแสดงให้เห็น

เห็นว่า การใส่ชื่อเดี่ยวลงไป ในเมทริกซ์ของ TPCS และ TPACS ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) โดยนำมาเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยจากไม้สะเดา เพื่อปรับปรุงสมบัติโดยใช้ขี้เลื่อยในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก และขนาดต่างๆ ได้แก่ ขนาด <math>< 50</math> เมช, 50-100 เมช, 100-200 เมช และ >200 เมช ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับ 5.22, 5.82, 7.16 และ 7.36 ตามลำดับ นอกจากนี้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเอซิเทดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) ที่นำมาเสริมแรงด้วยขี้เลื่อยในปริมาณและขนาดที่แตกต่างกัน

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า TPCS และ TPACS เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยลงไป ทำให้พีกที่ตำแหน่ง $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง และเมื่อเติมขี้เลื่อยลงไปทำให้พีกที่ 1735 cm^{-1} ปรากฏเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching เมื่อเปรียบเทียบกับ TPACS ปรากฏพีกที่ 1733 cm^{-1} มีความเข้มของพีกมากกว่า TPCS

2. จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TPCS และ TPACS พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ แต่ยังมีเม็ดกลมที่เกิดจากเม็ดแป้งบางส่วนนั้นหลอมไม่สมบูรณ์ เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน พบว่า ขี้เลื่อยมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้งและฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ มีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของแป้ง นอกจากนี้ขนาดของขี้เลื่อยที่แตกต่างกัน พบว่า ขี้เลื่อยที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มเกาะกลุ่มรวมตัวกันมากกว่าขี้เลื่อยที่มีขนาดเล็ก แต่ไม่ส่งผลต่อรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ TPCS, TPACS และขี้เลื่อย

3. จากการศึกษาการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย พบว่า มีค่าการดูดซับน้ำมากกว่า TPCS และ TPACS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย และเมื่อเพิ่มปริมาณของขี้เลื่อยมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง แต่ผลของขนาดอนุภาคของ ขี้เลื่อยจากไม้สะเดาไม่มีผลต่อการดูดซับน้ำของ TPCS และ TPACS เมื่อศึกษาการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% และ 100% พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ทำให้แป้งมันสำปะหลังสามารถ

ดูดซับน้ำได้มากกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบ TPCS และ TPACS พบว่า TPACS มีค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่า TPCS

4. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ TPCS และ TPACS พบว่า เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPCS และ TPACS ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช พบว่า TPCS มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า TPACS นอกจากนี้ศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่า มีสมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อความชื้นในบรรยากาศเพิ่มขึ้น

5. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า TPCS และ TPACS มีสมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการฝังดิน และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีการย่อยสลายช้าที่สุด แต่ขนาดอนุภาคของขี้เถ้าจากไม้สะเดา ไม่มีผลต่อการย่อยสลายอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPCS และ TPACS พบว่า TPACS ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้ามีการย่อยสลายเร็วที่สุด สำหรับ TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยขนาด 100-200 เมช มีการย่อยสลายที่ช้าที่สุด

6. จากการศึกษาทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า TPCS และ TPACS มีอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า และ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้ามีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกับ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใกล้เคียงกัน สำหรับผลของขนาดของขี้เถ้าจากไม้สะเดา พบว่า ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเปรียบเทียบ TPCS และ TPACS พบว่า TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้ามีอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังสูงกว่า TPACS ทั้งที่ปรับปรุงและที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า

7. จากงานวิจัยนี้ พบว่า TPCS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาด้วยปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 100-200 เมช มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยา สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้โดย

1. เนื่องจากชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ ส่งผลต่อการนำไปใช้ที่ไม่เน้นความสวยงามมากนัก สามารถปรับปรุงสีของชิ้นงานได้โดยศึกษาชนิดของขี้เลื่อย หรือ ไม้ชนิดอื่นๆ ที่ทนความร้อนจากกระบวนการผลิตที่ดีต่อไป

2. ศึกษาวิธีการทำแป้งคัดแปรวิธีอื่น เช่น การทำแป้งครอสลิง (Crosslinked starch) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่มากขึ้น แทนการทำแป้งคัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้คือ สารพวกแอนไฮไดรด์ วิธีนี้ค่อนข้างอันตรายและเป็นสารต้องห้าม

3. ศึกษาสมบัติการย่อยสลายตัวโดยวิธีอื่น เช่น ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปหลังทำการฝังดิน

4. ศึกษาชนิดและอัตราส่วนของแป้งต่างๆ เช่น แป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งคัดแปรต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] พลาสติกชีวฐานจากพืชเศรษฐกิจ. [Online]. Available : <http://www.rdi.ku.ac.th>. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 18 มิถุนายน 2556).
- [2] บทความออนไลน์ “แป้งัดแปลงโครงสร้าง”. [Online]. Available : <http://www.thaitapiocastarch.org> . (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 3 ตุลาคม 2556).
- [3] Ngah W.S., and Hanafiah M.A.K.M., “Removal of heavy metal from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents”, A review : Bioresource Technology, 99 (2008) 3935 – 3948.
- [4] สะเดา. [Online]. Available : <http://www.vegetweb.com>. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 7 ธันวาคม 2556).
- [5] สุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน, สุวัฒน์ เมืองทะ และอารียา หาญชนะ, 2554. “สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิตภาควิชาเคมี สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] ธนาบดี ลีจากภัย. 2549. “พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม”. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [7] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.ussupplyamenity.com> . (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 18 มิถุนายน 2556).
- [8] แผนภาพวัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.lekasina.com>.Page 8. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 18 มิถุนายน 2556).
- [9] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Bioplastic. [Online]. Available : www.worldcentric.org/biocompostable/bioplastic. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 7 มิถุนายน 2554)
- [11] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกฤ ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] บทความออนไลน์ “ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร”. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/>. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 3 ตุลาคม 2556).
- [13] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. ปฏิบัติการตัดแปรรูปโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์. เอกสารประกอบการเรียนการสอน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. บทที่ 12. หน้า 177-196. (File download: www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%2012.pdf)
- [14] มัน สำปะหลัง. [Online]. Available: <http://www.tapiocathai.org>. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 26 มิถุนายน 2556).
- [15] อรทัย ศรีวรรณ. 2552. “การเตรียมสารดูดซับจากการแยกสลายซีลื้อด้วยความร้อน”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [16] มาลินี ชัยสุขกิจสินธุ์. 2546. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 5. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additives). พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] ดร.ชนิ พัทชรากกร. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. เอกสารประกอบการเรียนการสอน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (File download : epg.science.cmu.ac.th/induschem/article-download.php?id=1563)
- [19] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. “กระบวนการแปรรูปพลาสติก”. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] คทาวิฑูร ภาชนะ, อำนวย วัฒนกรศิริ และสุปราณี แก้วภิรมย์. 2555. “คุณสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิล”. โครงการงานพิเศษภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา.

[21] รัฐภูมิ สันตยานนท์. 2544. “การปรับปรุงสมบัติด้านการทนความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ”. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (เทคโนโลยีวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[22] สุชาติ รอดทั้ง. 2548. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/แป้ง/แป้งตัดแปร”. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิทยาศาสตร์ (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[23] สุดารัตน์ จีระชัยมงคล, งามทิพย์ ภู่วโรดม, วาณี ชนเห็นชอบ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2549. “การตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและสมบัติของฟิล์มเอสเทอร์จากสตาร์ชมันสำปะหลัง”. โครงการงานพิเศษภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารคณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[24] Guimaraes J.L., Wypych F., Saul C.K., Ramos L.P., and Satyanarayana K.G., “Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil”. *Carbohydrate Polymers*. 80 (2010) 130–138.

[25] Prachayawarakorn J., Sangnitdej P., and Boonpasith P., “Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene”. *Carbohydrate Polymers*. 81 (2010) 425–433.

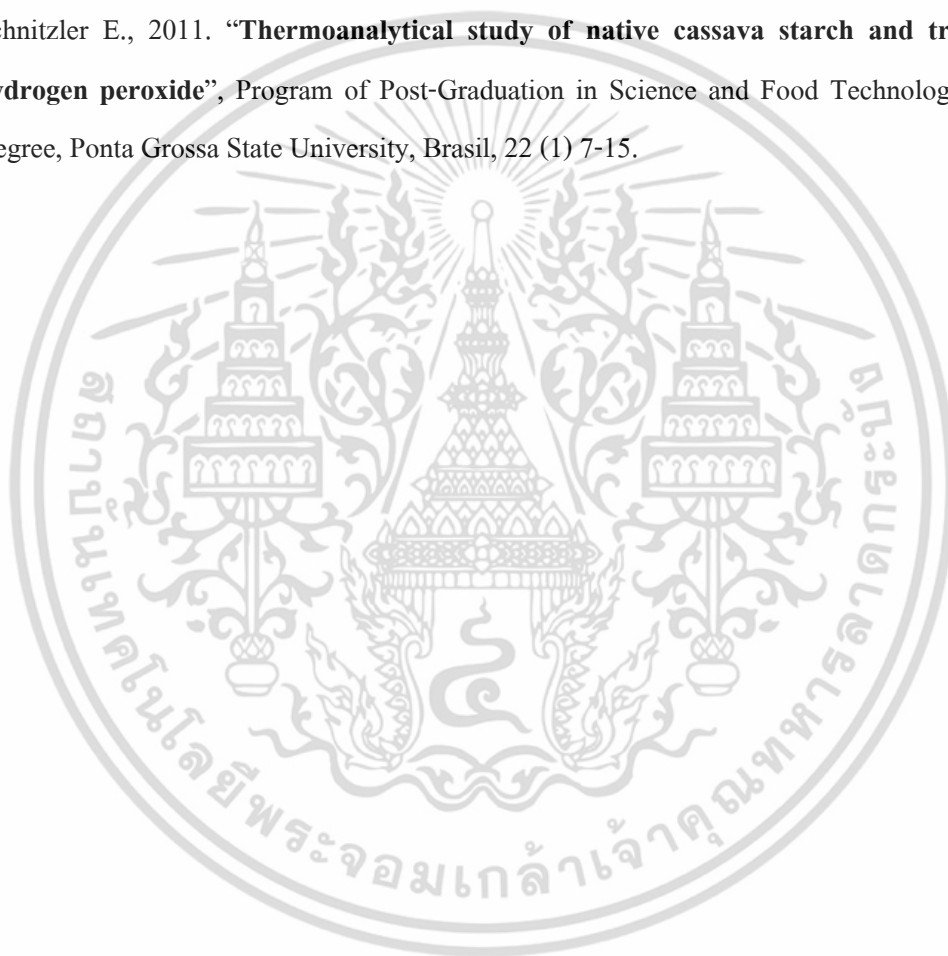
[26] Gironès J., López J.P., Mutjé P., Carvalho A.J.F., Curvelo A.A.S., and Vilaseca F., “Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt processing”. *Composites Science and Technology*. 72 (2012) 858-863.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Jian Z.Y., Lin H., and Hua W., 2002. **“Preparation and Analysis of the Ester Starch of Acetic Acid”**. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi University of Science & Technology.
- [28] Yixiang X., Vesselin M., and Milford A. H., 2004. **“Synthesis and Characterization of Starch Acetates with High Substitution”**. Cereal Chem. 81(6) 735-740.
- [29] Ruchi M., Debasish D., Dinesh G., and Arun G., 2011. **“Bioconversion of Agricultural Waste to Ethanol by SSF Using Recombinant Cellulase from Clostridium Thermocellum”**. The Scientific World Journal, Research Article : Volume 2011 (2011), Article ID 340279, 6 pages
- [30] Keowmaneechai E. 1995. **“Modification of starches in tapioca and rice flours by acetylation”**, M.S. Thesis, Kasetsart University, Bangkok.
- [31] Sriroth K., 1987. **Laboratory in Starch Technology**. Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok.
- [32] Tensile testing. [Online]. Available : www.physicsforums.com (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 7 มิถุนายน 2554)
- [33] **Infrared Spectroscopy**. [Online]. Available : <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm>. (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 16 พฤษภาคม 2557).
- [34] Bower D.I., Maddams W.F., 1996. **“The vibrational spectroscopy of polymers”**, (2nd ed.) Cambridge University Press, Cambridge.
- [35] Vinodhini V., and Nilanjana D., 2009. **“Mechanism of Cr (VI) Biosorption by Neem Sawdust”**, Scientific Research, 4 (4) 324-329.

- [36] Gáspár M., Benkő Z., Dogossy G., Réczey K., and Czigány T., 2005. **“Reducing water absorption in compostable starch-based plastics”**, *Polymer Degradation and Stability*, 90 (3) 563-569.
- [37] Eliangela de M., Cybele L., Ana C., Kelcilene B. Teodoro R., José M., and Luiz H. C., 2011. **“Thermoplastic corn starch reinforced with cotton cellulose nanofibers”**, *Applied Polymer Science*, 120 (4) 2428–2433.
- [38] López J.P., Mutjé P., Carvalho A.J.F., Curvelo A.A.S., and Gironès J., 2013. **“Newspaper fiber-reinforced thermoplastic starch biocomposites obtained by melt processing: Evaluation of the mechanical, thermal and water sorption properties”**, *Industrial Crops and Products*, (44) 300-305.
- [39] Nancy L.G., Laura R., Alain D., Mirta A., and Silvia G., 2011. **“Effect of glycerol on the morphology of nanocomposites made from thermoplastic starch and starch nanocrystals”**, *Carbohydrate Polymers*, 84 (1) 203–210.
- [40] 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.
- [41] Matheus P., Ademir J.Z., Maria Forte M.C., and Ruth Santana M.C., 2012. **“Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size”**. *Bioresource Technology*, 109 148–153.
- [42] Fringant C., Desbrieres J., and Rinaudo M., 1996. **“Physical properties of acetylated starch based materials: relation with their molecular”**, *Polymer*, 37 (13) 2663-2673.
- [43] Kaewtatip K., and Thongmee J., 2012. **“Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites”**, *Materials & Design*, 40 314–318.

- [44] Bodirlau R., Teaca C.A., Spiridon I., 2013. **“Influence of natural fillers on the properties of starch-based biocomposite films”**, Composites Part B: Engineering, 44 (1) 575–583.
- [45] Mina J., Valadez-Gonzalez A., Herrer-Franco P., Zuluaga F., Delvasto S., 2011. **“Physicochemical characterization of natural and acetylated thermoplastic cassava starch”**, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 166-173.
- [46] Costa F.J.O.G., Almeida R.R., Lacerda L.G., Carvalho-Filho M.A.S., Bannach G., and Schnitzler E., 2011. **“Thermoanalytical study of native cassava starch and treated with hydrogen peroxide”**, Program of Post-Graduation in Science and Food Technology, Master’s Degree, Ponta Grossa State University, Brasil, 22 (1) 7-15.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ลักษณะชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณและขนาดต่างๆ กัน



(ก) TPCS

(ข) TPACS

รูปที่ 1 เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPCS) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แอซิเตดจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS) ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้า



< 50 mesh

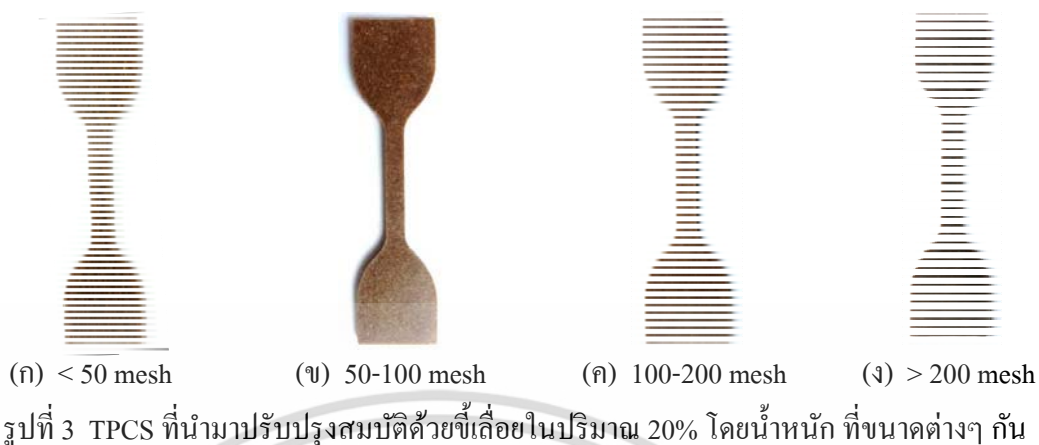
(ข) 50-100 mesh

(ค) 100-200 mesh

(ง) > 200 mesh

รูปที่ 2 TPCS ที่นำมาปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าในปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) < 50 mesh

(ข) 50-100 mesh

(ค) 100-200 mesh

(ง) > 200 mesh

รูปที่ 5 TPACS ที่นำมาปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าในขนาดต่างๆ กัน ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



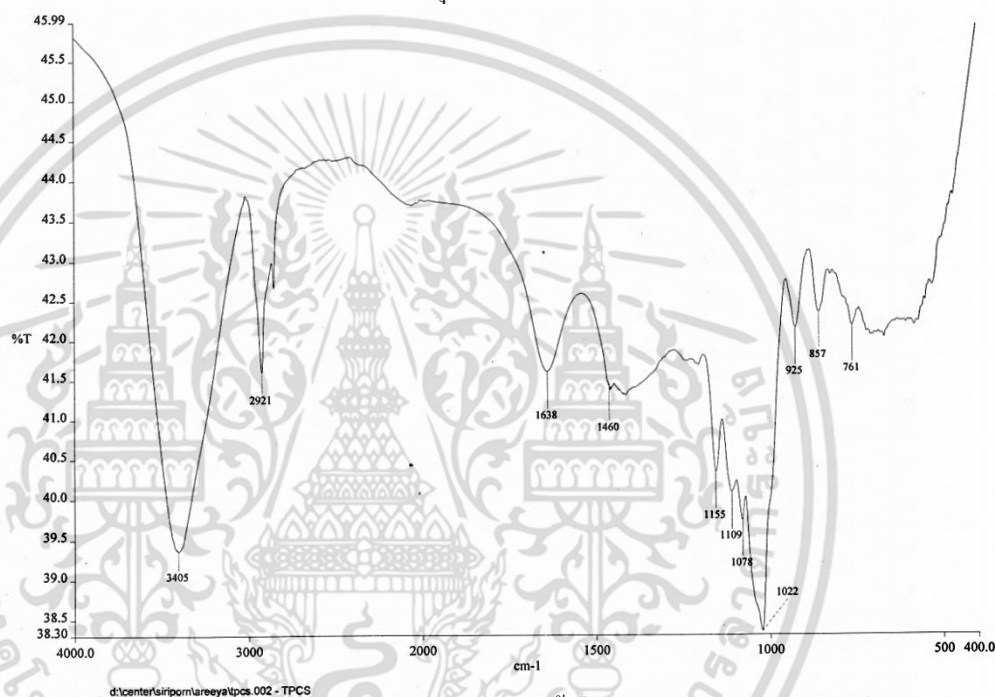
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

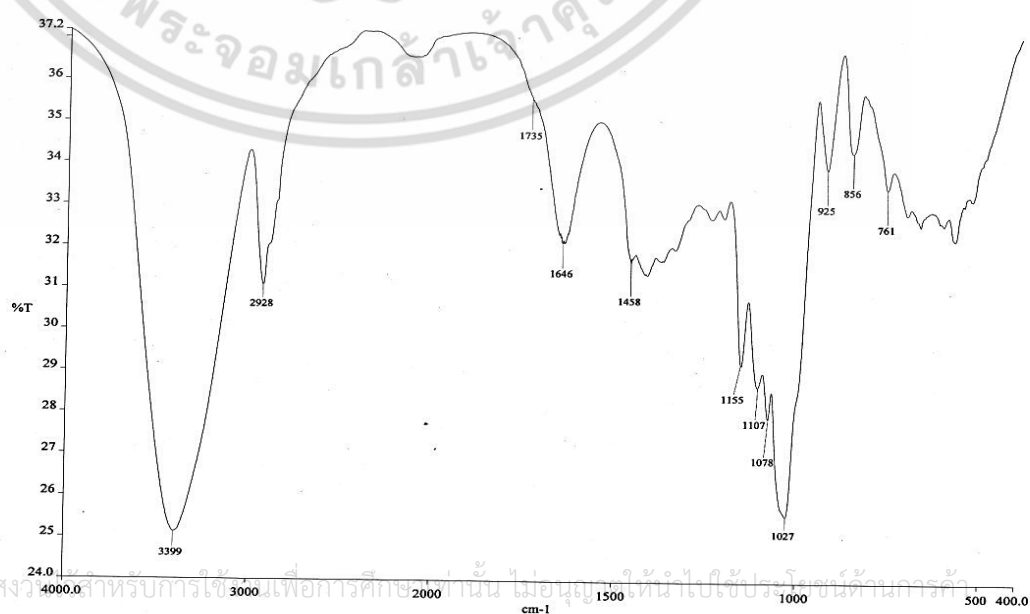
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

1. อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยและ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออย

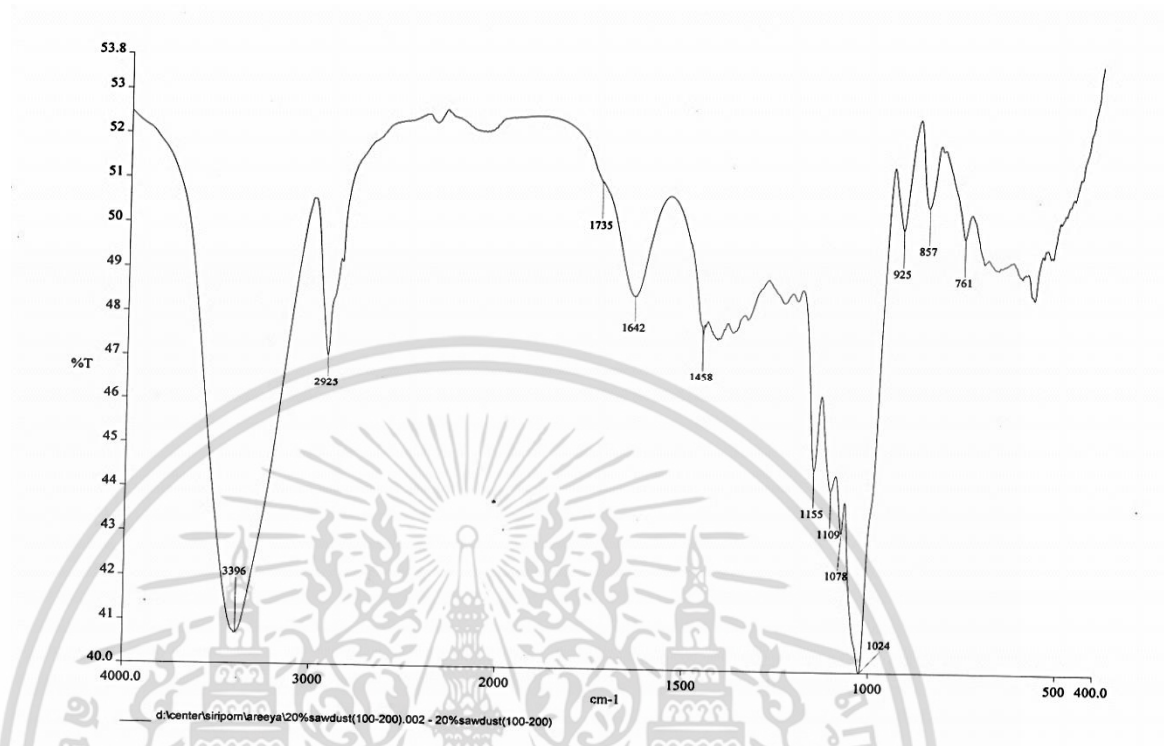
(1.1) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออย



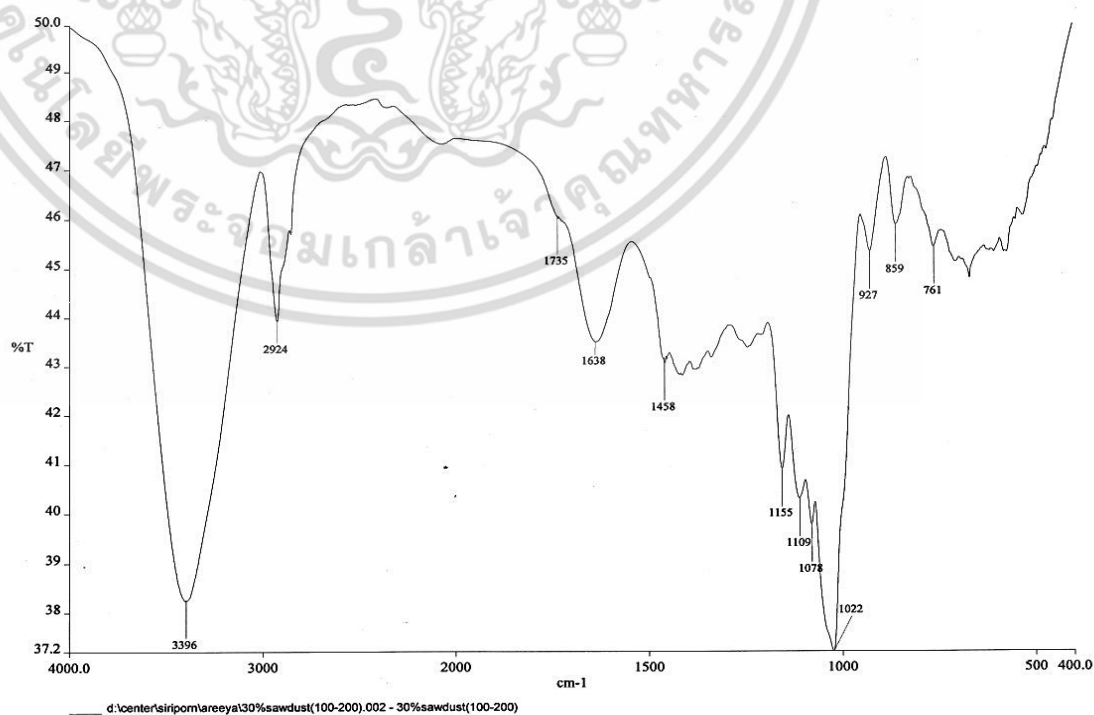
(1.2) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด 100-200 เมช ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก



(1.3) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าขนาด 100-200 เมช ที่ ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

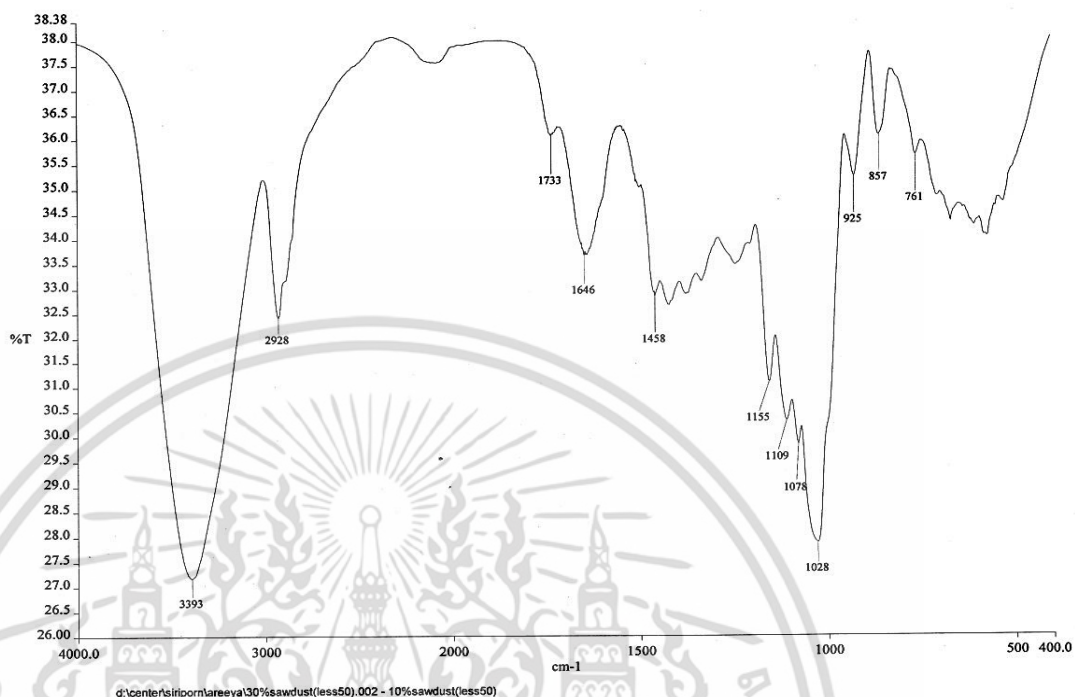


(1.4) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าขนาด 100-200 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก

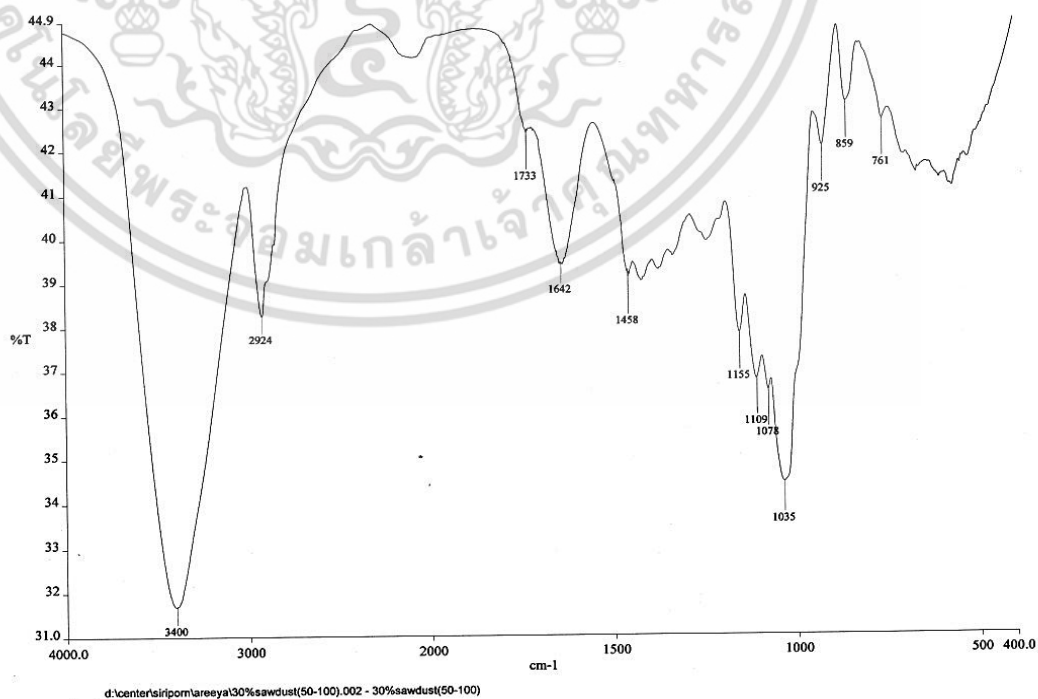


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.5) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีโอขนาด < 50 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก

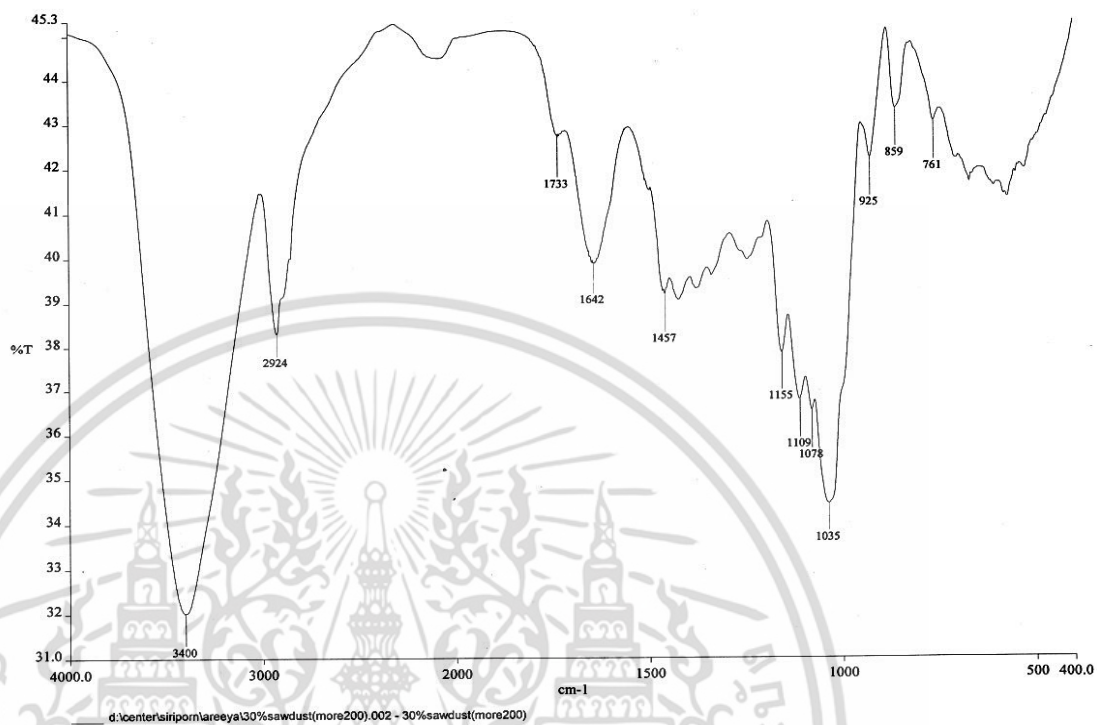


(1.6) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีโอขนาด 50-100 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



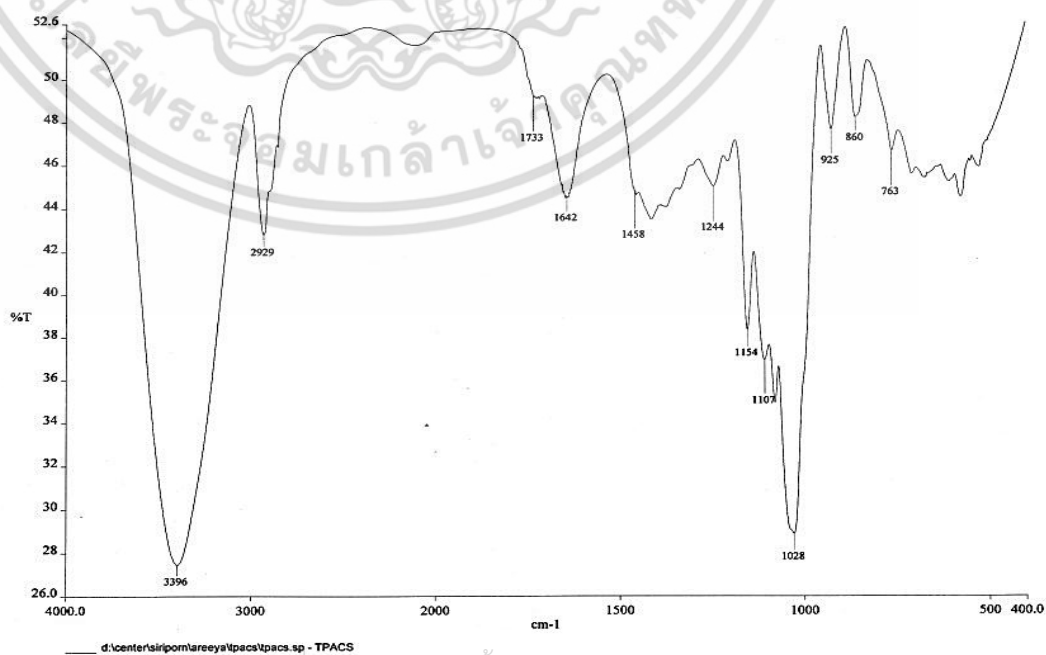
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.7) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยขนาด > 200 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



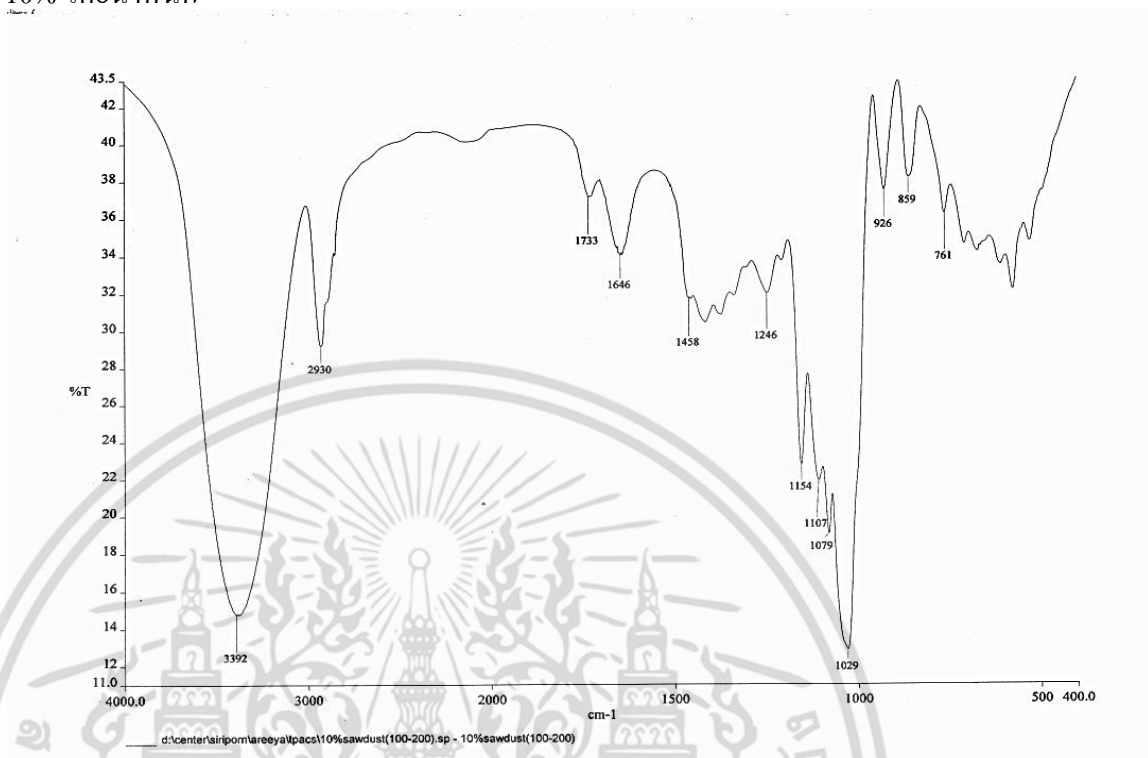
2. อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยและ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย

(2.1) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย

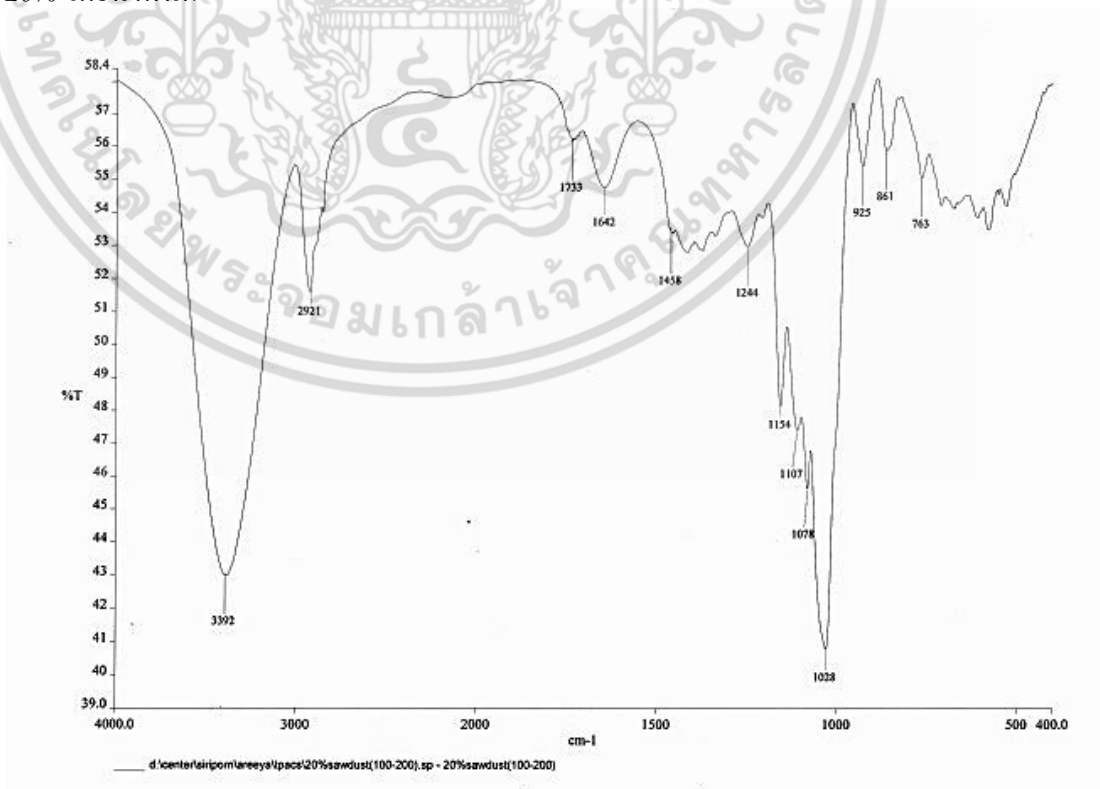


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.2) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด 100-200 เมช ที่ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก

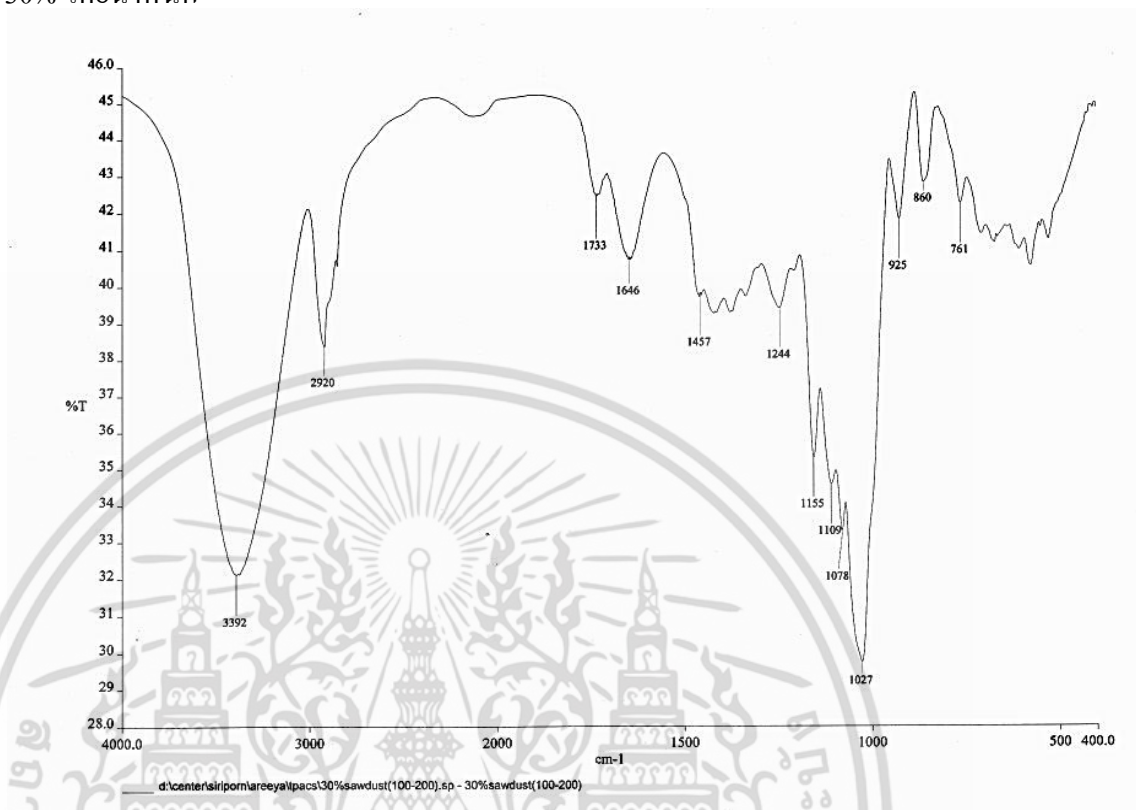


(2.3) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด 100-200 เมช ที่ ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

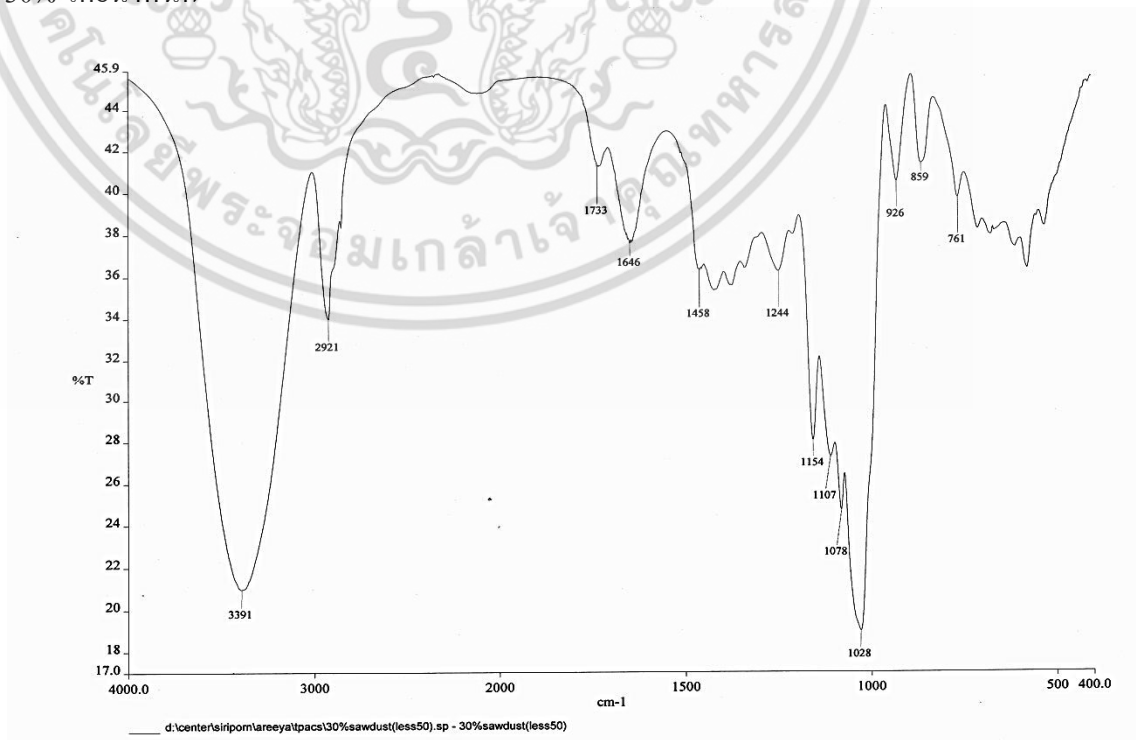


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.4) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด 100-200 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



(2.5) อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPACS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยขนาด < 50 เมช ที่ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

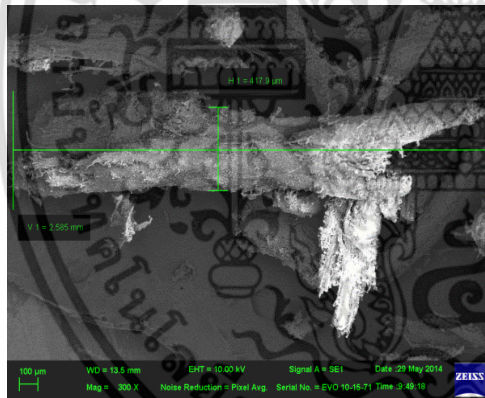
ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยา

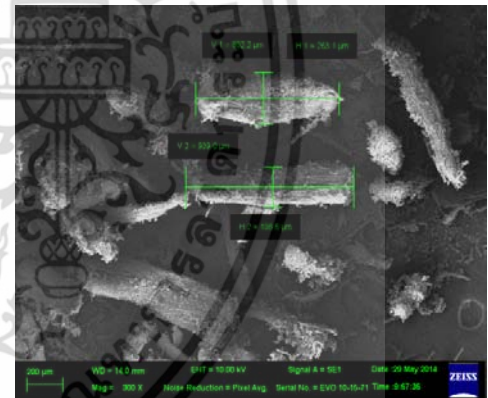
ตารางที่ 1 ค่า L/D ratio ของขี้เลื่อยแต่ละขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาคของขี้เลื่อย	L/D ratio
น้อยกว่า 50 เมช	5.22 ± 2.86
50-100 เมช	5.82 ± 3.57
100-200 เมช	7.16 ± 4.59
มากกว่า 200 เมช	7.36 ± 4.08

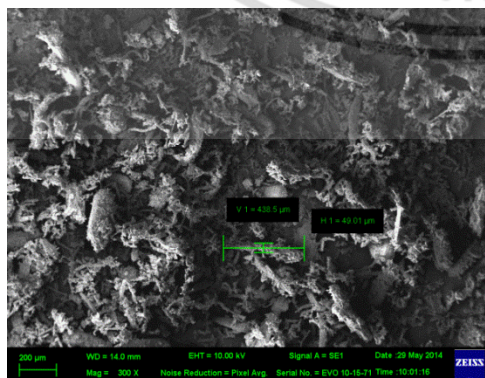
สถาบันวิทยาของขี้เลื่อย ที่กำลังขยาย 300 เท่า



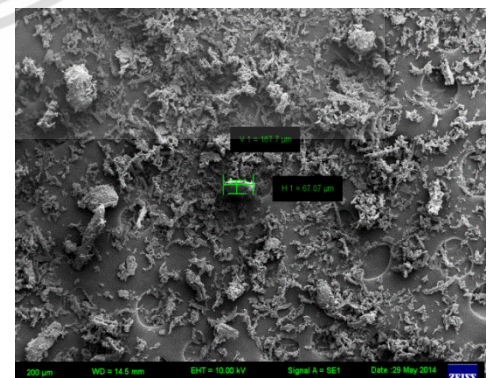
ขนาดขี้เลื่อย < 50 เมช



ขนาดขี้เลื่อย 50-100 เมช



ขนาดขี้เลื่อย 100-200 เมช



ขนาดขี้เลื่อย >200 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การดูดซับน้ำ

ตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว CaCl_2 ของ TPCS ที่ไม่มีการปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยจีลีโอจากไม้สะเดา

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำ (%)						
	TPCS	TPCS+10% (100-200 เมช)	TPCS+20% (100-200 เมช)	TPCS+30% (100-200 เมช)	TPCS+30% (<50 เมช)	TPCS+30% (50-100 เมช)	TPCS+30% (>200 เมช)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1.73	3.05	2.49	1.55	2.32	1.81	2.17
2	3.76	3.35	3.05	2.85	3.24	2.94	2.90
3	5.20	4.27	4.43	4.40	3.94	3.62	3.38
4	6.07	6.10	5.26	4.40	4.27	4.52	4.35
6	8.38	6.71	6.65	5.18	5.56	5.66	5.56
7	8.67	7.62	7.76	5.70	6.25	5.66	6.04
8	9.25	7.93	8.03	5.96	6.71	6.11	6.52
9	9.83	8.54	8.31	6.22	6.94	6.56	6.52
10	9.83	8.84	8.86	6.48	7.18	6.79	6.76
13	10.98	9.15	9.70	7.25	8.56	8.14	7.73
14	11.27	9.45	9.97	7.51	8.80	8.37	8.45
15	11.56	9.76	10.25	8.03	9.49	8.82	8.45
16	11.56	10.06	10.53	8.03	9.49	9.05	8.70
17	11.56	10.37	10.53	8.29	9.49	9.28	9.70
20	12.14	10.67	10.80	9.07	9.95	9.96	9.42
21	12.72	11.28	10.80	9.33	10.18	10.18	9.42
22	13.01	11.58	11.36	9.33	10.18	10.41	9.90
23	13.01	11.89	11.36	9.33	10.18	10.41	9.90
24	13.01	11.89	11.36	9.33	10.65	10.63	10.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยใช้น้ำกลั่น ของ TPCS ที่ไม่มีการปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดา

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำ (%)						
	TPCS	TPCS+10% (100-200 เมฆ)	TPCS+20% (100-200 เมฆ)	TPCS+30% (100-200 เมฆ)	TPCS+30% (<50 เมฆ)	TPCS+30% (50-100 เมฆ)	TPCS+30% (>200 เมฆ)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	5.04	6.00	4.74	2.66	5.37	3.44	3.12
2	10.39	10.21	7.65	5.58	7.41	5.97	6.56
3	13.35	14.41	10.02	8.25	9.46	8.73	9.61
4	16.91	16.81	12.66	11.65	11.76	10.57	11.05
6	21.66	21.62	18.47	15.29	16.11	15.40	15.38
7	22.85	23.12	19.78	16.99	18.15	16.55	16.58
8	24.04	23.72	21.10	18.44	19.43	17.47	17.78
9	25.22	24.62	22.69	19.42	20.97	19.31	18.99
10	26.41	26.42	23.48	20.63	21.48	20.23	20.19
13	32.14	30.93	27.44	24.27	25.83	24.59	25.00
14	34.12	33.03	28.76	25.24	26.85	25.28	26.20
15	35.31	34.53	30.60	26.45	27.87	26.89	27.40
16	37.09	35.14	31.92	27.91	29.15	28.04	28.12
17	37.98	36.94	32.72	28.64	30.69	28.73	28.84
20	43.32	40.24	37.47	32.28	34.01	33.10	32.69
21	44.81	41.14	38.25	33.01	34.52	35.17	33.41
22	45.70	41.74	39.05	33.25	34.78	35.40	33.89
23	46.29	42.34	39.31	33.49	35.80	36.32	34.37
24	46.88	43.24	39.84	33.98	37.34	36.32	35.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว CaCl_2 ของ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดา

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำ (%)						
	TPACS	TPACS+10% (100-200 เมฆ)	TPACS+20% (100-200 เมฆ)	TPACS+30% (100-200 เมฆ)	TPACS+30% (<50 เมฆ)	TPACS+30% (50-100 เมฆ)	TPACS+30% (>200 เมฆ)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1.46	1.35	1.20	1.04	1.32	1.13	0.92
2	2.93	2.70	2.41	2.72	2.43	2.71	1.84
5	5.87	5.40	5.06	4.44	4.99	5.88	3.91
6	6.78	6.30	5.78	4.81	6.19	6.33	4.83
7	7.52	7.20	6.50	5.43	6.63	6.78	5.53
8	8.80	7.88	7.47	6.06	7.08	7.69	6.22
9	9.72	8.55	8.19	6.69	7.52	8.14	6.68
12	10.27	10.13	9.39	8.15	8.84	9.27	8.29
13	10.82	10.24	9.44	8.36	8.84	9.28	8.52
14	11.19	10.36	9.62	8.57	9.07	9.50	8.75
15	11.37	10.58	9.73	8.78	9.51	9.72	8.98
16	11.74	10.81	10.12	8.99	9.95	9.73	8.98
19	12.47	11.48	10.84	9.62	10.39	10.18	9.67
20	12.66	11.71	10.84	9.83	10.39	10.18	9.90
21	12.84	11.93	10.84	9.83	10.61	10.40	10.13
22	13.02	12.16	11.08	10.04	10.61	10.63	10.13
23	13.21	12.16	11.08	10.04	10.84	10.63	10.36
24	13.21	12.16	11.08	10.04	10.84	10.63	10.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักราคาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยใช้น้ำหนักแห้งของ TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยจากไม้สะเดา

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักราคาที่ความชื้นสัมพัทธ์ (%)						
	TPACS	TPACS+10% (100-200 เมช)	TPACS+20% (100-200 เมช)	TPACS+30% (100-200 เมช)	TPACS+30% (<50 เมช)	TPACS+30% (50-100 เมช)	TPACS+30% (>200 เมช)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	6.01	6.38	5.09	4.70	5.67	4.56	4.66
2	10.24	10.14	9.22	8.66	9.79	8.17	8.08
3	14.25	14.20	12.62	11.39	12.36	11.29	11.76
6	22.89	22.90	21.60	18.81	19.84	19.71	19.12
7	25.33	25.22	23.54	20.29	21.65	21.64	21.07
8	27.31	26.38	25.48	21.78	23.43	23.32	23.04
9	29.32	28.41	27.43	23.27	24.48	25.00	24.26
10	31.12	29.27	29.37	24.26	26.28	25.96	26.22
13	26.95	33.62	32.77	28.46	31.43	30.77	30.88
14	38.76	35.07	33.74	29.70	32.73	31.97	31.62
15	40.56	36.23	34.47	30.94	34.02	33.17	32.10
16	41.77	37.39	36.41	32.18	35.04	33.65	33.56
17	42.97	38.26	38.35	33.17	35.82	34.12	35.04
20	46.59	42.03	41.26	36.39	37.78	37.44	37.25
21	47.19	42.32	41.75	36.63	38.14	37.74	37.49
22	47.79	42.90	42.48	36.88	38.66	37.98	37.75
23	48.19	43.48	42.92	37.13	38.92	38.21	37.98
24	48.39	43.77	43.69	37.38	39.42	38.21	38.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกล

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่างไม่สะดวก

1.สมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ปริมาตร 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ขนาดต่างๆ กัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100%

Maximum load (N)				
แรงดึงสูงสุด				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%				
0%	36.96 ± 1.58	36.96 ± 1.58	36.96 ± 1.58	36.96 ± 1.58
10%	48.78 ± 1.07	54.03 ± 0.31	59.07 ± 7.64	58.01 ± 7.35
20%	104.82 ± 2.80	118.54 ± 6.05	134.60 ± 5.77	120.74 ± 7.80
30%	113.91 ± 6.35	133.28 ± 5.07	145.98 ± 4.48	136.14 ± 9.60
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	31.39 ± 1.82	31.39 ± 1.82	31.39 ± 1.82	31.39 ± 1.82
10%	37.93 ± 4.64	47.08 ± 3.51	52.52 ± 5.51	49.21 ± 6.07
20%	44.52 ± 1.83	51.60 ± 0.98	63.30 ± 3.84	58.82 ± 1.81
30%	48.78 ± 3.73	52.63 ± 2.86	68.89 ± 3.30	59.92 ± 1.74
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	9.33 ± 0.50	9.33 ± 0.50	9.33 ± 0.50	9.33 ± 0.50
10%	10.26 ± 0.62	11.61 ± 0.36	18.33 ± 2.93	13.05 ± 0.65
20%	19.43 ± 1.56	22.99 ± 3.88	35.18 ± 2.58	28.41 ± 5.22
30%	33.26 ± 2.37	44.44 ± 3.95	61.40 ± 0.95	55.33 ± 2.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stress at maximum load (MPa)				
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
	ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%			
0%	2.74 ± 0.13	2.74 ± 0.13	2.74 ± 0.13	2.74 ± 0.13
10%	3.46 ± 0.22	3.73 ± 0.28	4.22 ± 0.28	4.17 ± 0.28
20%	6.21 ± 0.18	6.90 ± 0.19	8.33 ± 0.42	7.45 ± 0.40
30%	6.23 ± 0.18	7.24 ± 0.49	8.81 ± 0.50	7.54 ± 0.24
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	2.44 ± 0.12	2.44 ± 0.12	2.44 ± 0.12	2.44 ± 0.12
10%	2.62 ± 0.12	2.89 ± 0.15	3.73 ± 0.36	3.40 ± 0.08
20%	2.65 ± 0.12	3.26 ± 0.16	3.89 ± 0.20	3.53 ± 0.31
30%	2.71 ± 0.17	3.28 ± 0.16	4.28 ± 0.17	3.73 ± 0.30
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	0.58 ± 0.04	0.58 ± 0.04	0.58 ± 0.04	0.58 ± 0.04
10%	0.73 ± 0.02	0.91 ± 0.07	1.24 ± 0.16	1.12 ± 0.06
20%	1.42 ± 0.18	1.63 ± 0.18	2.49 ± 0.18	2.07 ± 0.27
30%	1.77 ± 0.18	2.40 ± 0.20	3.65 ± 0.12	3.32 ± 0.20

Extension at maximum load (mm)				
การดึงยืด				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
	ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%			
0%	48.44 ± 3.34	48.44 ± 3.34	48.44 ± 3.34	48.44 ± 3.34
10%	36.96 ± 1.24	32.36 ± 1.92	26.42 ± 1.34	29.35 ± 1.56
20%	8.99 ± 0.88	6.39 ± 0.47	4.58 ± 0.22	5.28 ± 0.36
30%	4.28 ± 0.36	3.62 ± 0.24	2.61 ± 0.56	2.98 ± 0.26
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	62.78 ± 3.04	62.78 ± 3.04	62.78 ± 3.04	62.78 ± 3.04
10%	43.64 ± 3.02	36.04 ± 0.88	25.10 ± 2.84	31.49 ± 1.28
20%	12.94 ± 0.44	11.06 ± 0.64	7.65 ± 0.73	8.98 ± 0.40
30%	8.98 ± 0.44	7.74 ± 0.40	6.01 ± 0.77	6.76 ± 0.79
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	72.90 ± 2.66	72.90 ± 2.66	72.90 ± 2.66	72.90 ± 2.66
10%	45.77 ± 0.75	39.29 ± 1.72	29.70 ± 1.91	33.26 ± 1.19
20%	20.62 ± 0.92	18.14 ± 1.00	14.05 ± 1.63	15.59 ± 1.08
30%	11.09 ± 0.60	9.62 ± 0.34	8.84 ± 0.37	9.17 ± 0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strain at maximum load (%)				
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%				
0%	182.3 ± 6.19	182.3 ± 6.19	182.3 ± 6.19	182.3 ± 6.19
10%	145.51 ± 4.98	133.71 ± 2.37	109.18 ± 4.34	121.75 ± 2.90
20%	34.05 ± 2.24	23.28 ± 1.34	17.84 ± 0.88	19.24 ± 1.63
30%	15.71 ± 1.61	12.33 ± 0.28	10.47 ± 1.49	11.40 ± 0.84
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	244.97 ± 11.62	244.97 ± 11.62	244.97 ± 11.62	244.97 ± 11.62
10%	169.18 ± 13.11	145.47 ± 2.91	125.47 ± 3.35	131.64 ± 5.90
20%	51.24 ± 1.62	46.44 ± 2.29	36.52 ± 1.64	40.97 ± 1.60
30%	33.58 ± 3.68	28.32 ± 0.20	22.98 ± 0.20	27.87 ± 0.20
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	283.08 ± 8.88	283.08 ± 8.88	283.08 ± 8.88	283.08 ± 8.88
10%	173.28 ± 4.53	157.59 ± 8.44	133.01 ± 2.58	140.09 ± 2.13
20%	79.31 ± 2.89	65.26 ± 1.78	51.41 ± 4.03	59.41 ± 3.96
30%	43.64 ± 0.60	38.94 ± 0.34	29.19 ± 0.37	35.35 ± 0.60

Young's modulus (MPa)				
มอดุลัส				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%				
0%	6.84 ± 0.89	6.84 ± 0.89	6.84 ± 0.89	6.84 ± 0.89
10%	53.73 ± 8.47	55.27 ± 4.47	78.18 ± 13.60	60.97 ± 10.64
20%	178.8 ± 11.08	212.37 ± 11.22	294.32 ± 9.88	246.14 ± 13.03
30%	217.66 ± 23.3	250.22 ± 33.13	321.53 ± 29.81	292.77 ± 28.70
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	5.28 ± 0.86	5.28 ± 0.86	5.28 ± 0.86	5.28 ± 0.86
10%	30.96 ± 6.31	46.01 ± 3.23	66.26 ± 8.89	57.74 ± 4.75
20%	69.73 ± 9.05	70.64 ± 12.71	74.59 ± 9.40	72.88 ± 7.38
30%	125.31 ± 4.32	138.98 ± 7.63	182.97 ± 6.92	143.95 ± 3.55
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	2.23 ± 0.09	2.23 ± 0.09	2.23 ± 0.09	2.23 ± 0.09
10%	2.88 ± 0.18	3.23 ± 0.29	4.85 ± 0.50	3.25 ± 0.20
20%	14.56 ± 3.71	17.99 ± 5.07	37.11 ± 4.76	24.98 ± 5.19
30%	20.8 ± 2.94	34.39 ± 5.10	69.28 ± 4.45	40.95 ± 4.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hardness (Shore D)				
ความแข็งกด				
สูตร	< 50 เมช	50-100 เมช	100-200 เมช	> 200 เมช
	ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%			
0%	28.2 ± 2.10	28.2 ± 2.10	28.2 ± 2.10	28.2 ± 2.10
10%	36 ± 1.82	38.5 ± 1.08	43.7 ± 2.06	37.3 ± 2.83
20%	49.1 ± 1.20	49.5 ± 1.65	51.7 ± 2.06	47.6 ± 2.01
30%	55.2 ± 1.55	59.3 ± 1.64	60.1 ± 2.81	56.7 ± 2.79
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%				
0%	20.4 ± 1.35	20.4 ± 1.35	20.4 ± 1.35	20.4 ± 1.35
10%	30.6 ± 2.41	32.3 ± 1.95	33.8 ± 1.75	30.9 ± 1.45
20%	38.1 ± 2.08	38.7 ± 1.34	42.9 ± 2.13	38.0 ± 1.49
30%	48.4 ± 2.18	50.1 ± 2.72	51.8 ± 2.53	50.8 ± 2.35
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%				
0%	10.3 ± 1.95	10.3 ± 1.95	10.3 ± 1.95	10.3 ± 1.95
10%	15.8 ± 1.83	16.1 ± 1.10	19.6 ± 2.17	17.7 ± 1.06
20%	22.0 ± 1.49	22.8 ± 3.05	27.7 ± 3.13	24.0 ± 1.56
30%	35.8 ± 1.91	36.1 ± 1.03	36.7 ± 3.56	36.3 ± 2.63

2.สมบัติเชิงกลของ TPACS ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักที่ขนาด 100-200 เมช และ ขนาดต่างๆ กัน ได้แก่ <50, 50-100, 100-200 และ >200 เมช ที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 100%

Maximum load (N)			
แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	20.39 ± 3.10	13.36 ± 2.04	11.81 ± 2.71
+ 10% (100-200 เมช)	26.88 ± 4.67	20.17 ± 2.47	16.55 ± 3.71
+ 20% (100-200 เมช)	42.76 ± 7.02	31.00 ± 5.02	23.32 ± 3.57
+ 30% (100-200 เมช)	91.34 ± 4.27	62.63 ± 5.88	40.20 ± 5.36
+ 30% (<50 เมช)	67.96 ± 6.77	37.18 ± 2.17	29.58 ± 4.20
+ 30% (50-100 เมช)	69.84 ± 4.51	41.49 ± 4.77	30.88 ± 4.45
+ 30% (>200 เมช)	77.05 ± 3.98	62.64 ± 1.69	38.38 ± 0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stress at maximum load (MPa) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	2.35 ± 0.59	1.47 ± 0.32	0.57 ± 0.12
+ 10% (100-200 เมช)	2.81 ± 0.53	2.64 ± 0.40	0.86 ± 0.21
+ 20% (100-200 เมช)	4.37 ± 0.37	3.03 ± 0.63	1.30 ± 0.15
+ 30% (100-200 เมช)	5.39 ± 0.63	3.94 ± 0.61	2.14 ± 0.16
+ 30% (<50 เมช)	3.53 ± 0.50	1.64 ± 0.34	1.40 ± 0.30
+ 30% (50-100 เมช)	3.60 ± 0.29	2.76 ± 0.58	1.74 ± 0.28
+ 30% (>200 เมช)	4.01 ± 0.36	3.33 ± 0.20	1.90 ± 0.44

Extension at maximum load (mm) การดึงยืด			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	57.34 ± 5.92	57.52 ± 6.04	72.34 ± 3.45
+ 10% (100-200 เมช)	27.27 ± 3.53	28.87 ± 5.37	29.59 ± 4.44
+ 20% (100-200 เมช)	11.67 ± 5.49	14.67 ± 4.17	18.07 ± 3.80
+ 30% (100-200 เมช)	4.14 ± 0.52	4.18 ± 1.30	6.27 ± 2.28
+ 30% (<50 เมช)	6.21 ± 0.60	7.69 ± 1.79	10.72 ± 1.85
+ 30% (50-100 เมช)	6.09 ± 1.47	6.48 ± 0.99	9.19 ± 0.43
+ 30% (>200 เมช)	4.25 ± 2.42	6.34 ± 2.20	8.61 ± 1.47

Strain at maximum load (%) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	198.96 ± 13.48	232.27 ± 24.6	282.71 ± 4.33
+ 10% (100-200 เมช)	116.99 ± 17.98	111.37 ± 11.1	135.47 ± 3.62
+ 20% (100-200 เมช)	40.01 ± 5.32	46.68 ± 5.40	51.44 ± 13.82
+ 30% (100-200 เมช)	14.53 ± 4.17	22.59 ± 2.12	28.42 ± 6.03
+ 30% (<50 เมช)	24.84 ± 2.42	30.78 ± 7.14	42.87 ± 7.41
+ 30% (50-100 เมช)	24.36 ± 5.87	25.92 ± 3.97	36.78 ± 1.72
+ 30% (>200 เมช)	16.55 ± 2.09	25.38 ± 4.16	34.45 ± 7.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young's modulus (MPa)			
มอดูลัส			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	4.81 ± 0.47	2.96 ± 0.52	1.82 ± 0.44
+ 10% (100-200 เมช)	48.79 ± 5.54	23.41 ± 5.37	9.53 ± 1.84
+ 20% (100-200 เมช)	107.14 ± 8.74	53.31 ± 7.70	14.73 ± 0.23
+ 30% (100-200 เมช)	240.67 ± 9.39	89.73 ± 4.86	55.25 ± 8.88
+ 30% (<50 เมช)	142.22 ± 4.16	36.84 ± 6.78	34.37 ± 3.98
+ 30% (50-100 เมช)	157.07 ± 6.12	61.08 ± 5.08	48.58 ± 4.93
+ 30% (>200 เมช)	160.12 ± 6.54	78.79 ± 8.95	52.22 ± 9.84

Hardness (Shore D)			
ความแข็งกด			
สูตร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		
	0%RH	50%RH	100%RH
TPACS	18.7 ± 1.42	14.0 ± 1.82	11.2 ± 1.23
+ 10% (100-200 เมช)	32.6 ± 2.50	22.3 ± 3.33	20.1 ± 1.20
+ 20% (100-200 เมช)	39.7 ± 0.67	33.0 ± 1.82	28.3 ± 1.16
+ 30% (100-200 เมช)	49.7 ± 1.58	44.7 ± 1.34	38.8 ± 2.20
+ 30% (<50 เมช)	43.0 ± 2.31	40.9 ± 1.60	34.2 ± 2.62
+ 30% (50-100 เมช)	43.9 ± 2.18	41.7 ± 1.57	36.8 ± 1.32
+ 30% (>200 เมช)	44.5 ± 2.21	42.2 ± 1.32	38.5 ± 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

สมบัติการย่อยสลาย

สมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการฝังดิน เป็นระยะเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ ของเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเอซิทจากแป้งมันสำปะหลัง ในปริมาณและขนาดต่างๆ ของขี้เลื่อยจากไม้สะเดา

- (1) ตารางแสดงแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังทำการฝังดินของ TPCS และ TPACS ในปริมาณและขนาดต่างๆ ของขี้เลื่อยจากไม้สะเดา

สูตร	Maximum load (N) แรงดึงสูงสุด		
	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	34.82 ± 4.37	14.20 ± 1.40	7.19 ± 0.45
TPCS + 10% (100-200 เมช)	71.16 ± 0.61	17.49 ± 0.54	13.95 ± 1.28
TPCS + 20% (100-200 เมช)	168.88 ± 4.19	33.93 ± 3.21	28.41 ± 2.76
TPCS + 30% (100-200 เมช)	232.7 ± 3.87	39.88 ± 6.14	36.49 ± 3.77
TPCS + 30% (<50 เมช)	185.56 ± 7.59	33.90 ± 1.77	31.71 ± 2.19
TPCS + 30% (50-100 เมช)	204.00 ± 11.36	37.27 ± 2.86	32.48 ± 2.04
TPCS + 30% (>200 เมช)	212.70 ± 11.44	37.32 ± 1.25	34.29 ± 4.46
TPACS	23.71 ± 3.39	4.25 ± 1.41	3.99 ± 0.46
TPACS + 10% (100-200 เมช)	29.28 ± 2.85	5.87 ± 0.84	4.01 ± 0.66
TPACS + 20% (100-200 เมช)	45.34 ± 6.51	9.60 ± 1.61	7.95 ± 0.77
TPACS + 30% (100-200 เมช)	91.25 ± 5.83	14.69 ± 0.98	13.97 ± 1.67
TPACS + 30% (<50 เมช)	66.41 ± 6.17	12.20 ± 1.18	8.69 ± 1.26
TPACS + 30% (50-100 เมช)	67.20 ± 6.49	13.53 ± 4.38	10.61 ± 0.79
TPACS + 30% (>200 เมช)	77.36 ± 7.04	13.86 ± 0.73	11.84 ± 0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) ตารางแสดงค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังทำการฝังดินของ TPCS และ TPACS ในปริมาณและขนาดต่างๆ ของขี้เถ้าจากไม้สะเดา

Stress at maximum load (MPa)			
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	3.95 ± 0.16	0.81 ± 0.13	0.46 ± 0.17
TPCS + 10% (100-200 เมช)	7.22 ± 0.23	0.94 ± 0.04	0.65 ± 0.03
TPCS + 20% (100-200 เมช)	10.95 ± 1.02	1.57 ± 0.17	1.36 ± 0.15
TPCS + 30% (100-200 เมช)	13.88 ± 1.14	1.88 ± 0.13	1.60 ± 0.08
TPCS + 30% (<50 เมช)	9.82 ± 2.06	1.69 ± 1.77	1.46 ± 0.86
TPCS + 30% (50-100 เมช)	10.66 ± 0.12	1.71 ± 0.14	1.88 ± 0.26
TPCS + 30% (>200 เมช)	13.53 ± 0.11	1.77 ± 0.12	1.51 ± 0.15
TPACS	2.35 ± 0.59	0.17 ± 0.04	0.16 ± 0.03
TPACS + 10% (100-200 เมช)	2.81 ± 0.53	0.18 ± 0.04	0.16 ± 0.07
TPACS + 20% (100-200 เมช)	4.37 ± 0.37	0.45 ± 0.04	0.23 ± 0.03
TPACS + 30% (100-200 เมช)	4.89 ± 0.35	0.66 ± 0.06	0.63 ± 0.14
TPACS + 30% (<50 เมช)	3.27 ± 0.42	0.46 ± 0.09	0.36 ± 0.03
TPACS + 30% (50-100 เมช)	3.81 ± 0.59	0.60 ± 0.05	0.44 ± 0.05
TPACS + 30% (>200 เมช)	3.94 ± 0.45	0.60 ± 0.18	0.50 ± 0.03

- (3) ตารางแสดงการดึงยึด ก่อนและหลังทำการฝังดินของ TPCS และ TPACS ในปริมาณและขนาดต่างๆ ของขี้เถ้าจากไม้สะเดา

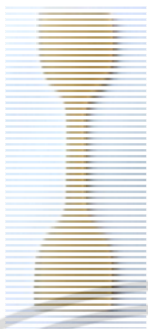

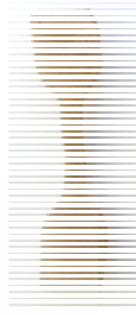









Extension at maximum load (mm)			
การดึงยึด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	37.27 ± 4.58	12.21 ± 2.39	11.00 ± 1.28
TPCS + 10% (100-200 เมช)	6.43 ± 1.65	11.70 ± 2.87	9.49 ± 2.42
TPCS + 20% (100-200 เมช)	2.78 ± 0.19	6.48 ± 2.03	5.64 ± 1.06
TPCS + 30% (100-200 เมช)	1.89 ± 0.18	4.47 ± 0.32	4.06 ± 0.25
TPCS + 30% (<50 เมช)	2.06 ± 0.11	7.63 ± 2.49	7.27 ± 3.48
TPCS + 30% (50-100 เมช)	2.20 ± 0.20	6.75 ± 2.34	4.66 ± 0.87
TPCS + 30% (>200 เมช)	2.05 ± 0.26	4.83 ± 0.14	4.42 ± 0.22
TPACS	56.48 ± 4.34	19.04 ± 1.78	17.16 ± 3.04
TPACS + 10% (100-200 เมช)	27.59 ± 3.89	18.85 ± 1.23	15.97 ± 2.38
TPACS + 20% (100-200 เมช)	12.43 ± 3.29	17.65 ± 2.96	15.22 ± 3.83
TPACS + 30% (100-200 เมช)	3.56 ± 0.89	12.87 ± 2.12	8.87 ± 2.23
TPACS + 30% (<50 เมช)	3.30 ± 0.47	17.07 ± 1.85	11.08 ± 1.26
TPACS + 30% (50-100 เมช)	5.85 ± 0.51	18.19 ± 2.32	12.38 ± 0.76
TPACS + 30% (>200 เมช)	6.59 ± 1.95	13.80 ± 2.48	14.65 ± 3.14

- (4) ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังทำการฝังคืนของ TPCS และ TPACS ใน ปริมาณและขนาดต่างๆ ของซี่เกลียวจากไม้สะเดา


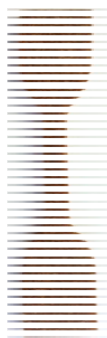
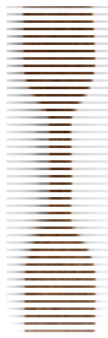






Strain at maximum load (%) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังคืน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	151.09 ± 9.51	49.98 ± 7.93	44.00 ± 5.11
TPCS + 10% (100-200 เมช)	33.72 ± 4.46	43.54 ± 6.14	34.19 ± 7.49
TPCS + 20% (100-200 เมช)	11.10 ± 0.75	23.91 ± 3.88	22.56 ± 4.25
TPCS + 30% (100-200 เมช)	7.56 ± 0.72	17.89 ± 1.30	17.63 ± 2.11
TPCS + 30% (<50 เมช)	8.26 ± 0.46	30.54 ± 9.67	23.43 ± 8.05
TPCS + 30% (50-100 เมช)	8.21 ± 0.81	27.01 ± 9.37	18.65 ± 3.48
TPCS + 30% (>200 เมช)	8.08 ± 1.08	18.65 ± 3.48	17.98 ± 1.18
TPACS	208.23 ± 17.27	82.22 ± 4.07	48.94 ± 5.10
TPACS + 10% (100-200 เมช)	117.77 ± 4.88	76.44 ± 9.23	48.40 ± 9.40
TPACS + 20% (100-200 เมช)	55.06 ± 1.89	72.37 ± 8.50	40.04 ± 3.46
TPACS + 30% (100-200 เมช)	13.19 ± 1.89	51.48 ± 7.52	27.71 ± 3.58
TPACS + 30% (<50 เมช)	26.34 ± 7.79	70.62 ± 11.82	36.62 ± 7.85
TPACS + 30% (50-100 เมช)	23.41 ± 2.05	68.17 ± 6.53	35.48 ± 8.92
TPACS + 30% (>200 เมช)	14.24 ± 3.54	55.20 ± 9.93	32.22 ± 2.46

- (5) ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังทำการฝังคืนของ TPCS และ TPACS ใน ปริมาณและขนาดต่างๆ ของซี่เกลียวจากไม้สะเดา

Young's modulus (MPa) มอดุลัส			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังคืน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	5.42 ± 1.27	3.77 ± 0.12	1.76 ± 0.10
TPCS + 10% (100-200 เมช)	21.30 ± 3.16	5.27 ± 0.74	4.24 ± 1.11
TPCS + 20% (100-200 เมช)	271.25 ± 9.24	17.76 ± 3.16	14.71 ± 3.28
TPCS + 30% (100-200 เมช)	414.35 ± 7.77	30.59 ± 2.80	24.9 ± 2.44
TPCS + 30% (<50 เมช)	349.00 ± 4.42	21.68 ± 2.78	16.10 ± 1.67
TPCS + 30% (50-100 เมช)	363.21 ± 9.57	25.38 ± 2.19	19.62 ± 1.06
TPCS + 30% (>200 เมช)	379.70 ± 8.00	27.31 ± 1.22	21.72 ± 1.76
TPACS	4.81 ± 0.47	0.72 ± 0.13	0.43 ± 0.17
TPACS + 10% (100-200 เมช)	48.79 ± 5.54	0.79 ± 0.23	0.76 ± 0.27
TPACS + 20% (100-200 เมช)	107.14 ± 8.74	1.66 ± 0.19	1.37 ± 0.42
TPACS + 30% (100-200 เมช)	212.03 ± 4.80	5.70 ± 0.92	2.82 ± 1.14
TPACS + 30% (<50 เมช)	100.10 ± 6.85	3.37 ± 0.99	1.39 ± 0.18
TPACS + 30% (50-100 เมช)	131.11 ± 6.28	4.37 ± 1.32	1.58 ± 0.20
TPACS + 30% (>200 เมช)	158.58 ± 7.05	4.47 ± 0.40	1.73 ± 0.15
















ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างของ TPCS ก่อนและหลังทำการฝังดิน เป็นระยะเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ ในความชื้น 5-10%			
สูตรผสม	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 4
TPCS, 0%			
TPCS, 10% sawdust, (100-200 เมช)			
TPCS, 20% sawdust, (100-200 เมช)			
TPCS, 30% sawdust, (100-200 เมช)			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPCS, 30% sawdust, (< 50 เมช)			
TPCS, 30% sawdust, (50-100 เมช)			
TPCS, 30% sawdust, (>200 เมช)			



ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างของ TPACS ก่อนและหลังทำการฝังดิน เป็นระยะเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ ในความชื้น 5-10%			
สูตรผสม	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 4
TPACS, 0%			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPACS, 10% sawdust, (100-200 เมช)			
TPACS, 20% sawdust, (100-200 เมช)			
TPACS, 30% sawdust, (100-200 เมช)			
TPACS, 30% sawdust, (< 50 เมช)			
TPACS, 30% sawdust, (50-100 เมช)			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPACS, 30% sawdust, (>200 เมช)			
--------------------------------------	---	--	---

รูปแสดง การเตรียมฝึงคลบชั้นงานในกล่อง

- ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ก่อนทำการฝึงคลบชั้นงาน



- วางชั้นงาน ให้ลึกจากขอบภาชนะลึกประมาณ 10 เซนติเมตร

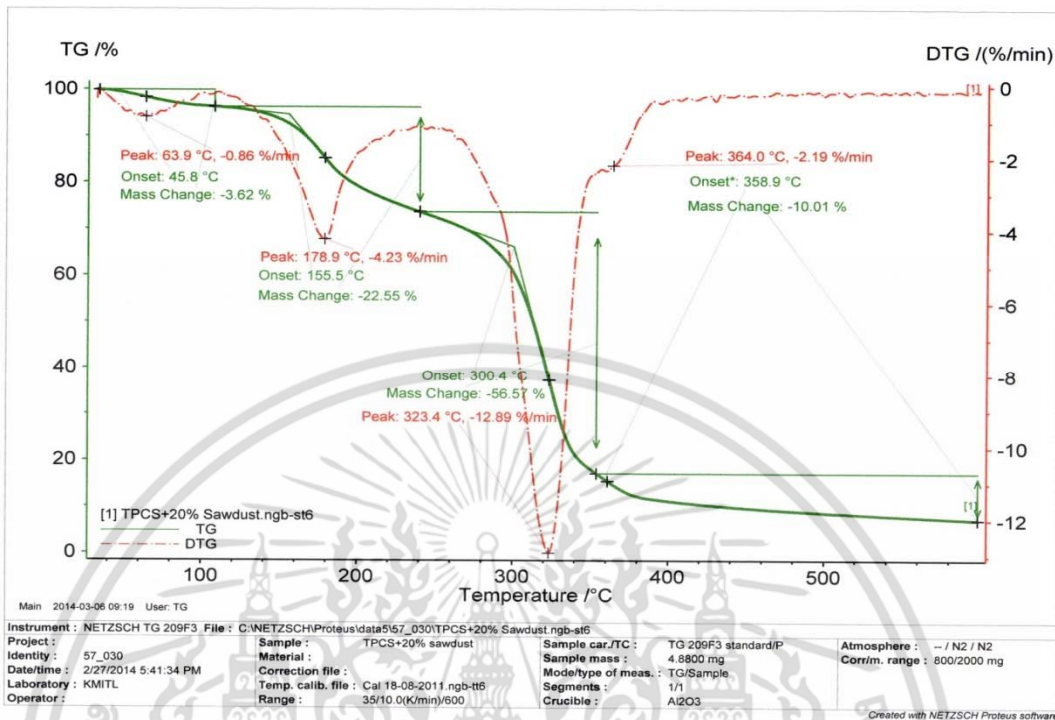


- นำดินฝึงคลบชั้นงานจนเต็มภาชนะ

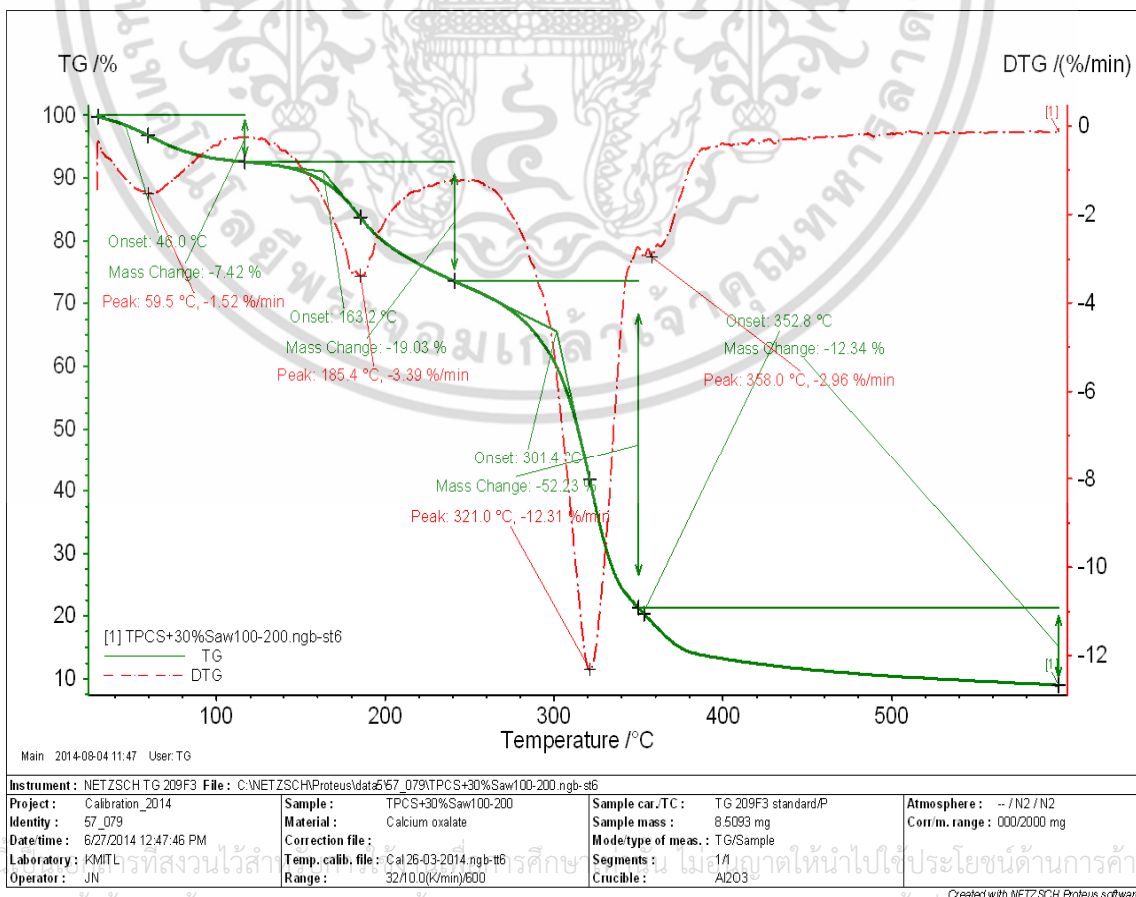


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.3) เทอร์โมแกรม TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเคาในปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช

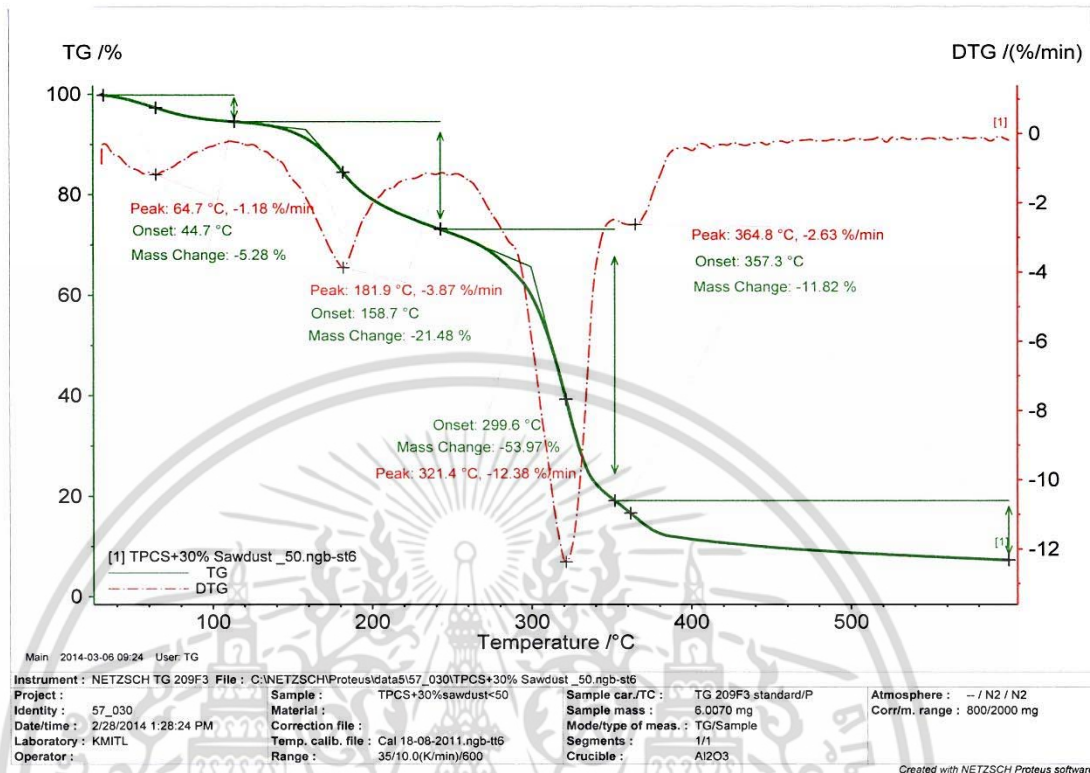


(1.4) เทอร์โมแกรม TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเคาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช

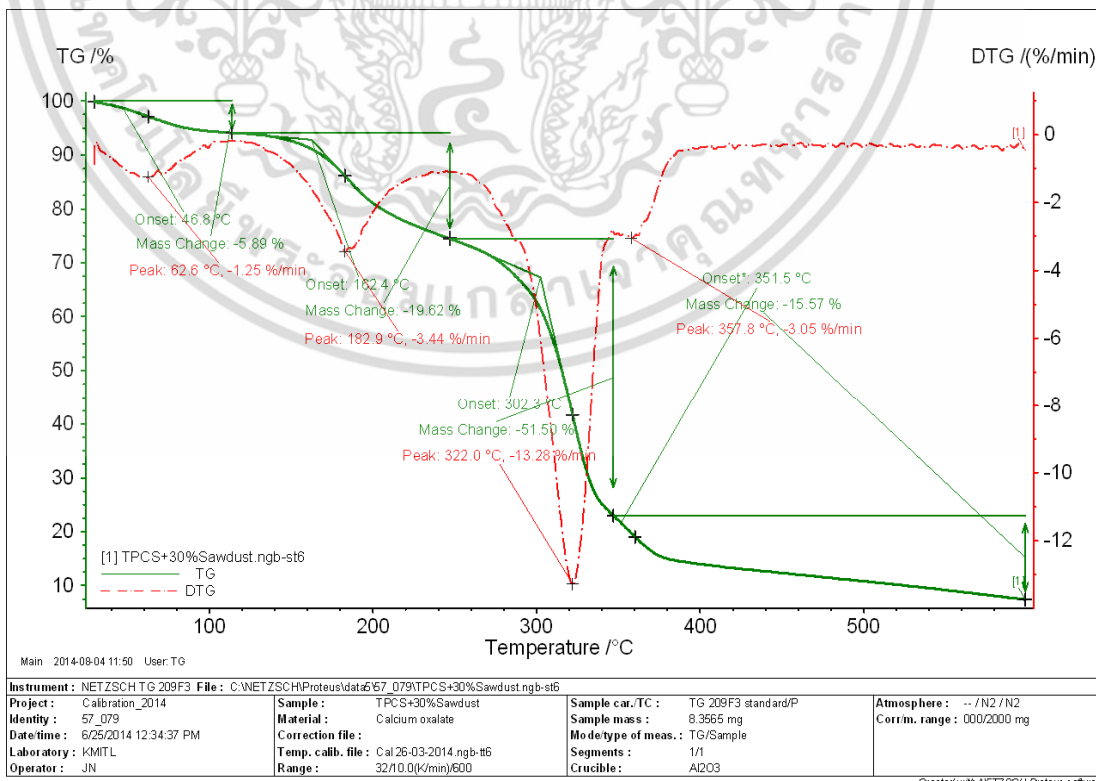


เอกสารนี้ ไม่สามารถให้ซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ไม่ว่าการฉ้อโกง ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.5) เทอร์โมแกรม TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด < 50 เมช

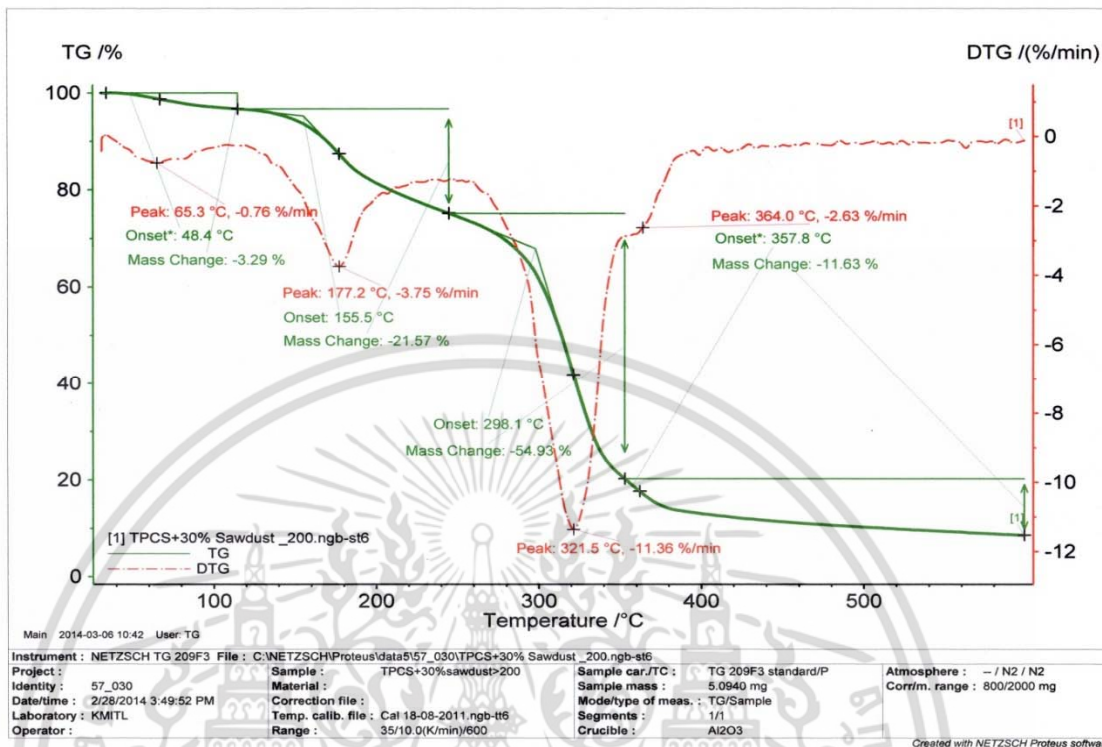


(1.6) เทอร์โมแกรม TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 50-100 เมช



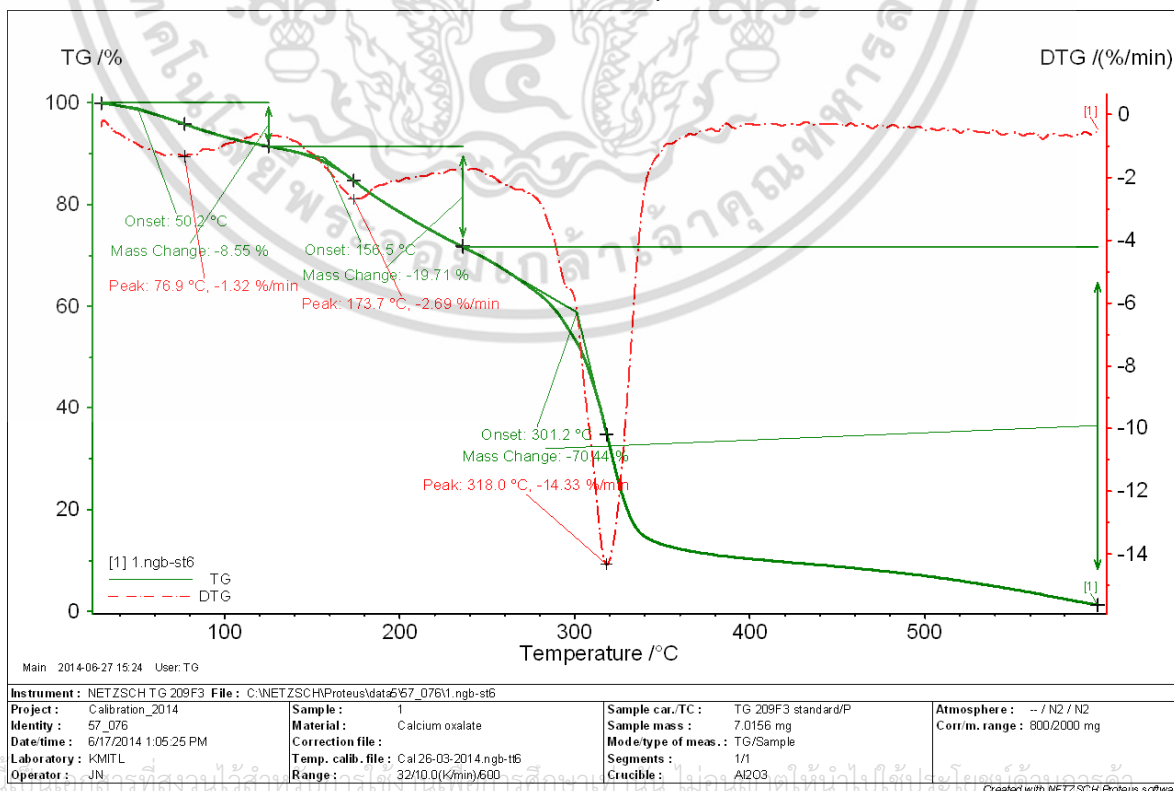
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.7) เทอร์โมแกรม TPCS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเคาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด >200 เมช



2. เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์เอชไอทีจากแป้งมันสำปะหลัง (TPACS)

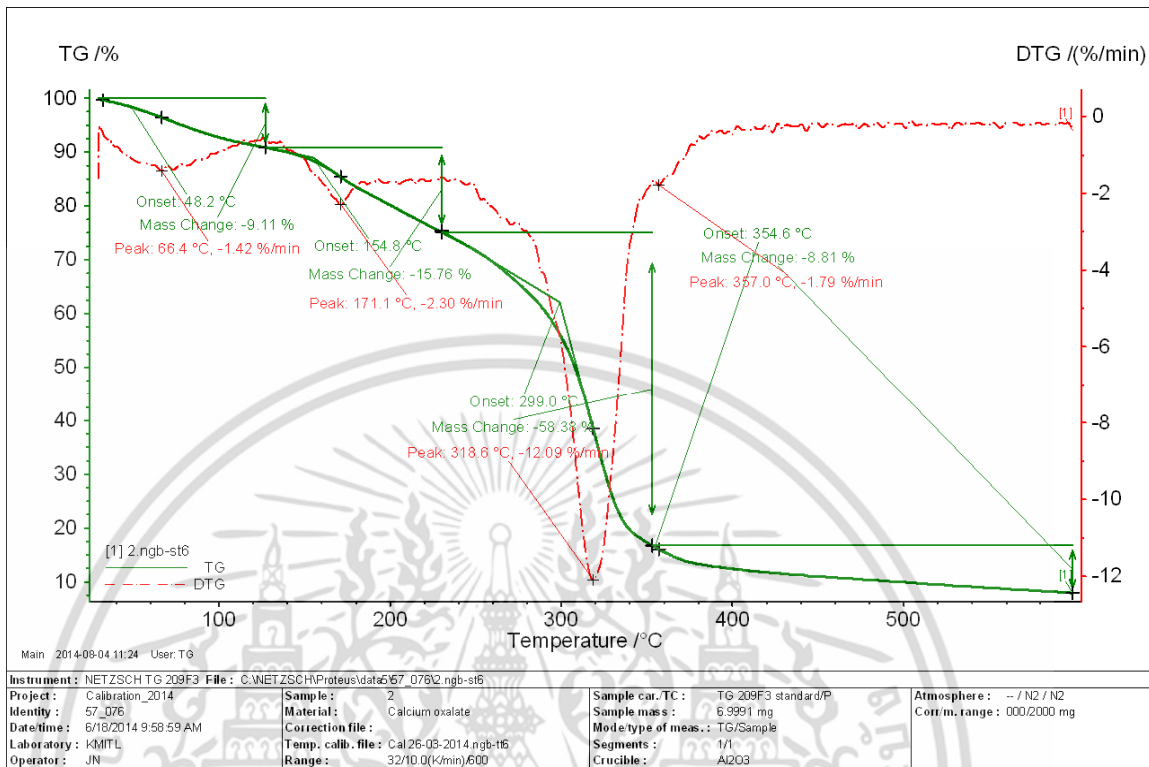
(2.1) เทอร์โมแกรม TPACS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้สะเคา



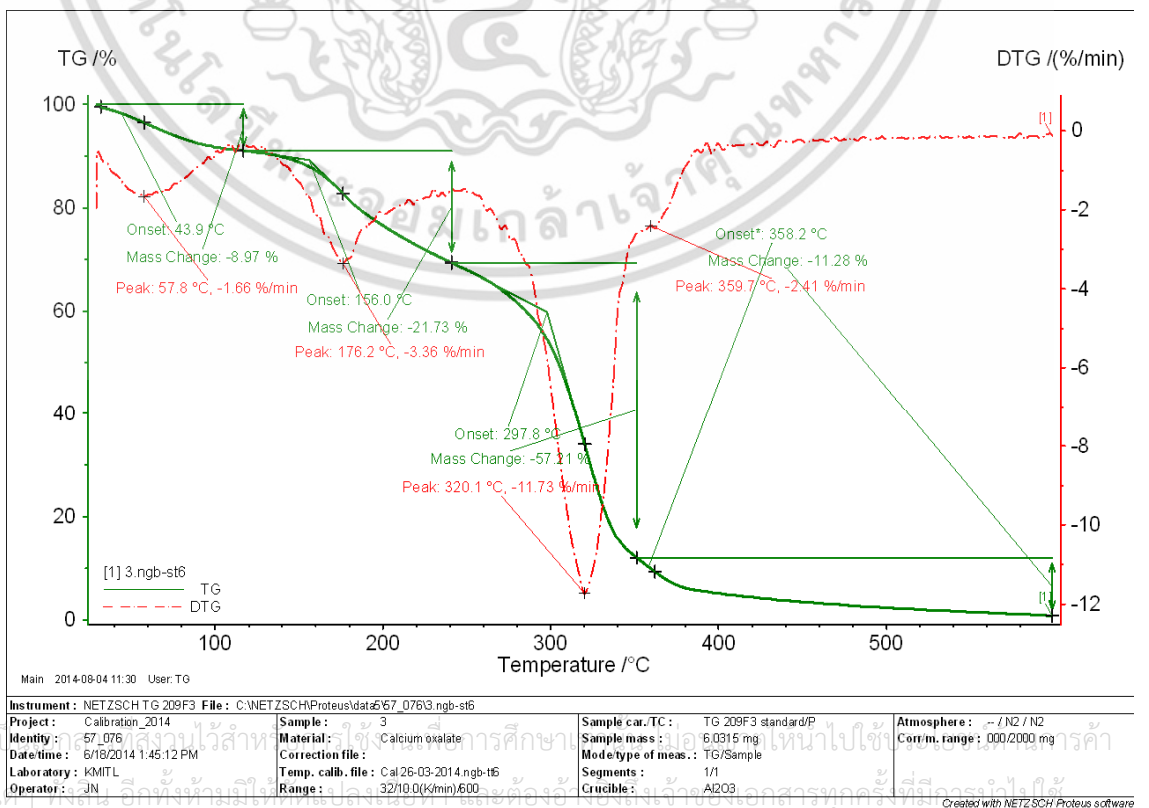
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.2) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาในปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช

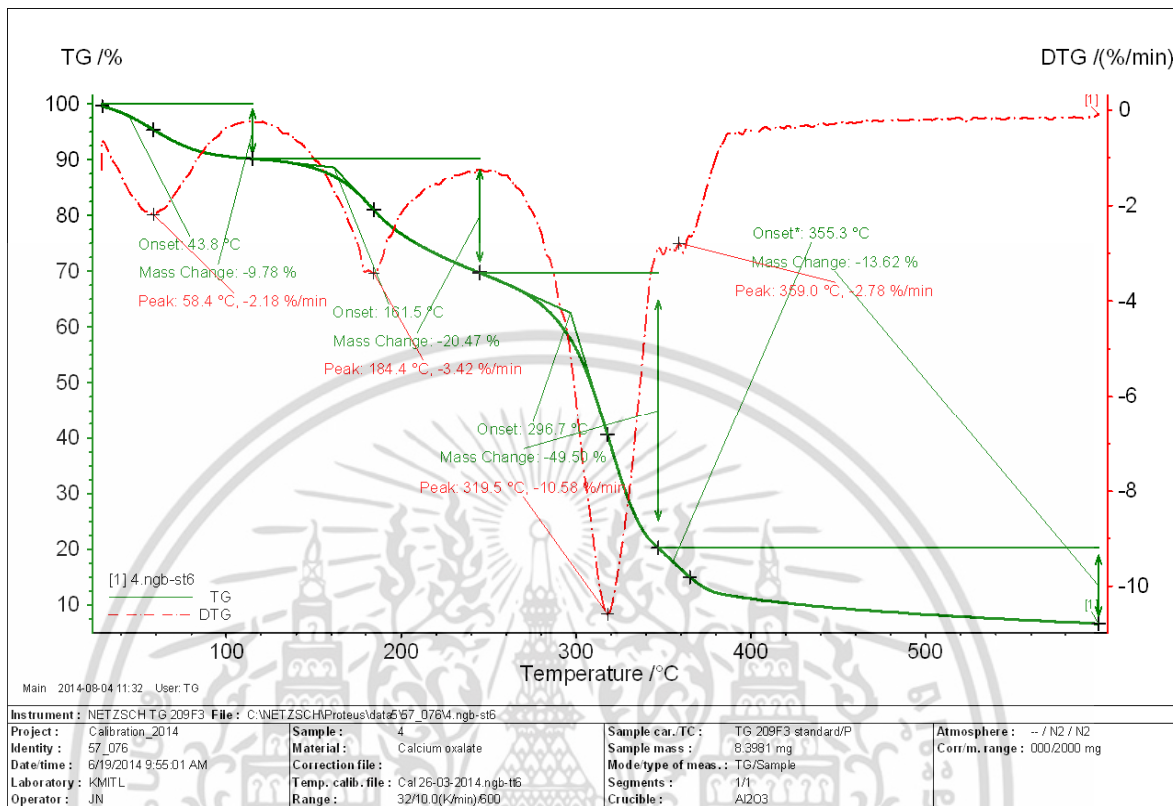


(2.3) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาในปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช

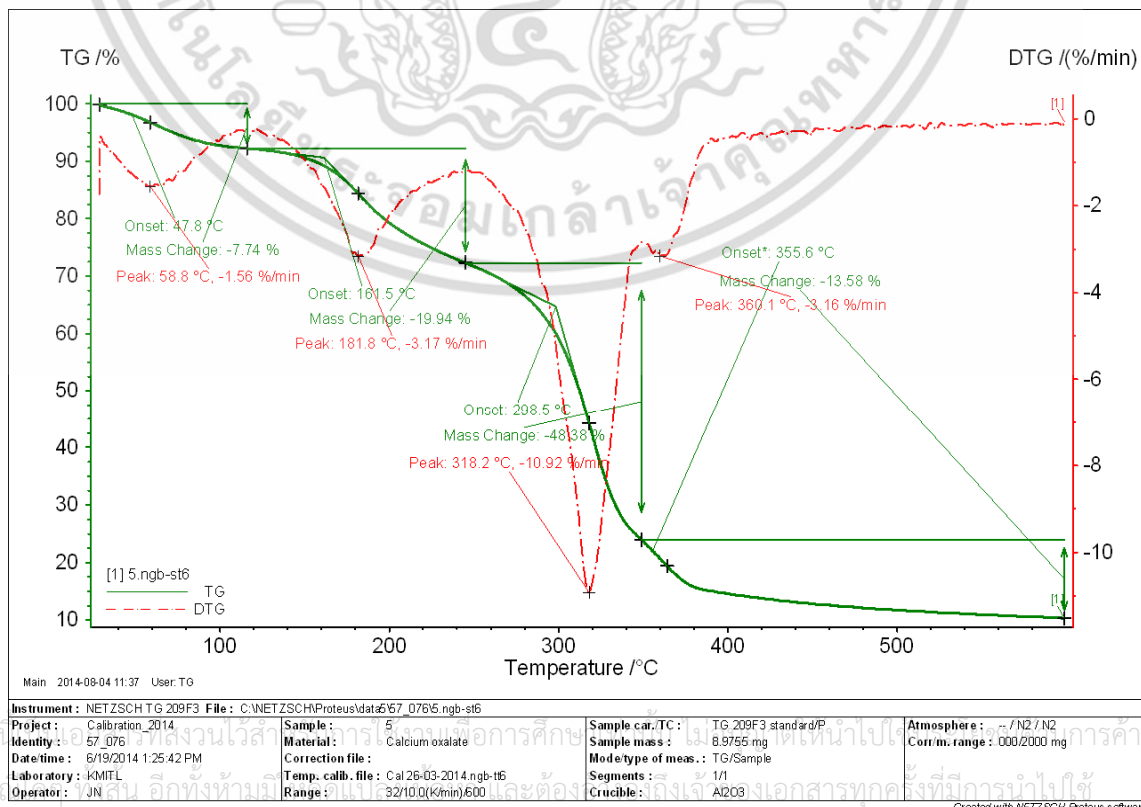


เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

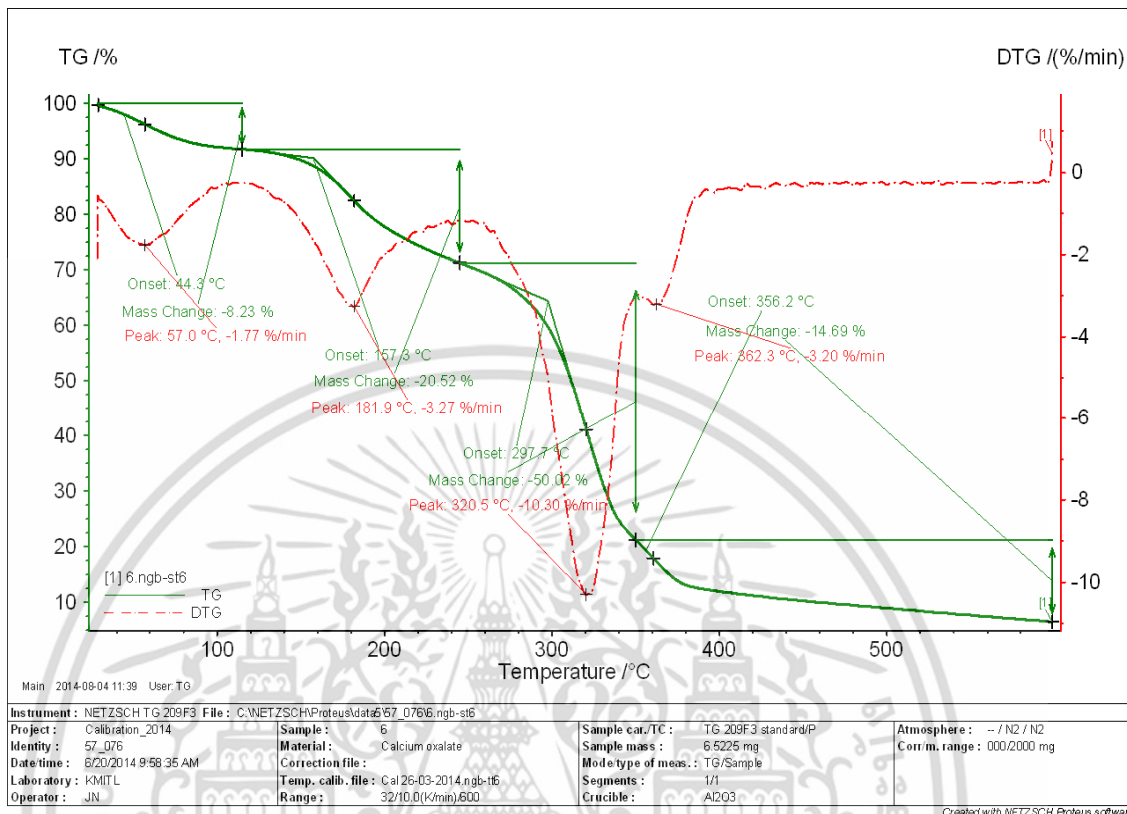
(2.4) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 100-200 เมช



(2.5) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด < 50 เมช



(2.6) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 50-100 เมช



(2.7) เทอร์โมแกรม TPACS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้สะเดาในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ขนาด > 200 เมช

