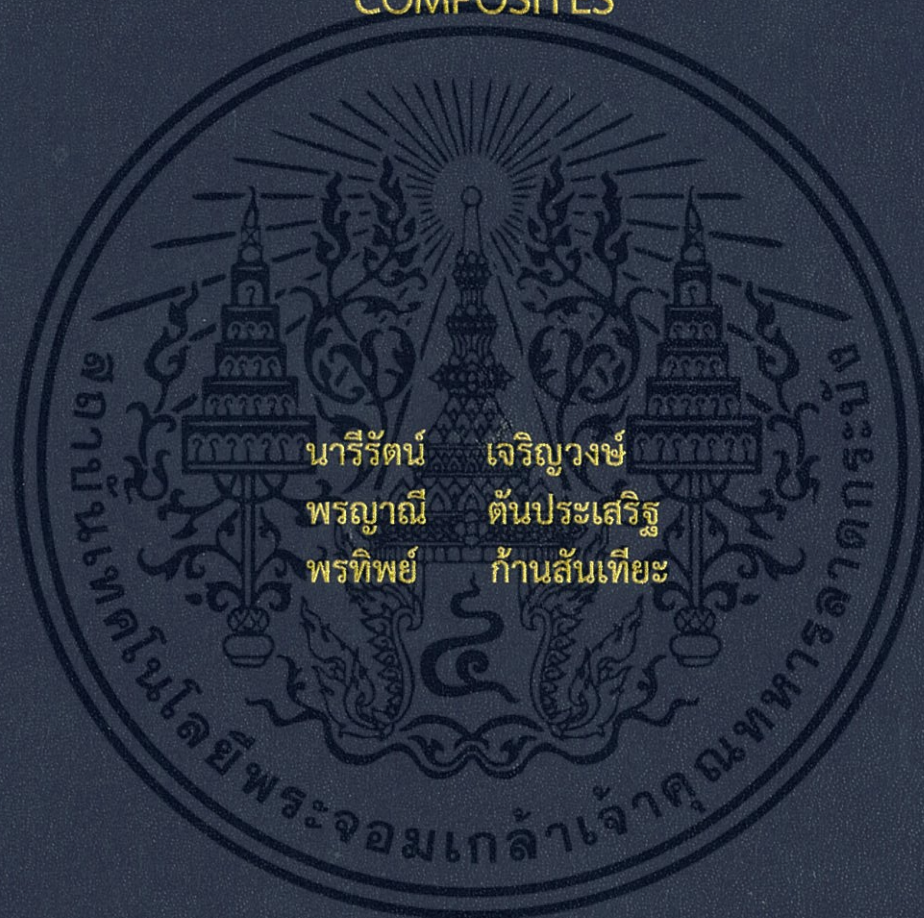


ผลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของ
คอมโพสิทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับอนุภาคของขุยมะพร้าว

EFFECT OF STARCH TYPES ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC STARCH/ COCONUT COIR PARTICLE
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ผลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของ
คอมโพสิทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับอนุภาคของขุยมะพร้าว

EFFECT OF STARCH TYPES ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC STARCH/ COCONUT COIR PARTICLE
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF STARCH TYPES ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC STARCH/ COCONUT COIR PARTICLE
COMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

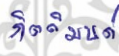

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับอนุภาคของขุยมะพร้าว
Effect of starch types on properties of thermoplastic
starch/ coconut coir particle composites

ชื่อนักศึกษา นางสาวนารีรัตน์ เจริญวงษ์ รหัสนักศึกษา 56050517
นางสาวพรญาณี ตันประเสริฐ รหัสนักศึกษา 56050538
นางสาวพรทิพย์ ก้านสันเทียะ รหัสนักศึกษา 56050539

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

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

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

T149 541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับอนุภาคของขุยมะพร้าว
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนารีรัตน์ เจริญวงษ์ รหัสนักศึกษา 56050517 นางสาวพรญาณี ตันประเสริฐ รหัสนักศึกษา 56050538 นางสาวพรทิพย์ ก้านสันเทียะ รหัสนักศึกษา 56050539
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วนผสมแป้งกับกลีเซอรอลเป็น 65 : 35 นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล (TPS) คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน พบพีคที่ตำแหน่ง 1737 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของอนุภาคของขุยมะพร้าวเข้าไปในเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ซึ่งทำให้พีคช่วง O-H stretching และพีคช่วง O-H bending มีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้งข้าวเหนียว และการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าวในเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ทำให้ความเป็นผลึกของวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 15 % มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเหนียวมีการดูดซับความชื้นได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า อนุภาคของขุยมะพร้าวมีการกระจายตัวที่ดีและมีความเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของอนุภาคขุยมะพร้าว ทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของยังสูงขึ้น แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่ลดลง โดยเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเหนียว และวัสดุประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวสามารถย่อยสลายได้มากกว่าวัสดุประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง และการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้มีการย่อยสลายได้ลดลง สุดท้ายอุณหภูมิกการสลายตัวทางความร้อนลดลง ในทุกๆ ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว เนื่องจากมีการซ้อนทับกันของอุณหภูมิกในการสลายตัวขององค์ประกอบแป้งและอนุภาคของขุยมะพร้าว

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตาบิล แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และอนุภาคของขุยมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Effect of starch types on properties of thermoplastic starch/ coconut coir particle composites
Students	Miss Nareerat Charoenwong Student ID 56050517 Miss Pornyaneer Tanprasert Student ID 56050538 Miss Porntip Kansanthia Student ID 56050539
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This special project aimed to study and improve properties of biodegradable polymer prepared from thermoplastic cassava starch (TPCS) and thermoplastic waxy rice starch (TPWRS) using glycerol as a plasticizer at the ratio of starch : glycerol ; 65 : 35. Properties of the thermoplastic starch (TPS) composites were modified by different contents of coconut coir particle (CC) i.e., 0 5 10 and 15 % by weight. Cassava starch or waxy rice starch and glycerol were mixed using an internal mixer and shaped by a compression molding machine. Then, properties of TPS were examined. It was found from FT-IR spectra that the wavenumber of 1737 cm^{-1} was observed by the incorporation of CC into TPS. Moreover O-H stretching and O-H bending peaks shifted to lower wavenumber. From x-ray diffraction study, it was observed that crystallinity of cassava starch was higher than waxy rice starch and the incorporation of CC into TPS matrix increased the crystallinity of the TPS composites. In addition, the lowest percentage moisture uptake was found in TPCS with 15 % of CC and moisture uptake in TPWRS was higher than TPCS. From morphology, CC particles were well distributed and compatible with TPCS or TPWRS matrix. Furthermore, stress and Young's modulus increased but percentage strain decreased with increasing CC content. Besides, mechanical properties of TPCS composites were greater than TPWRS composites. Additionally, TPWRS/CC composite could degrade more than TPCS/CC composite and the addition of CC could decrease the biodegradation. Finally, thermal degradation temperature was decreased in all of the modified TPS with CC due to the overlapped degradation temperature from both starch and CC components.

Keywords : Cassava starch, Coconut coir particle, Thermoplastic starch and Waxy rice starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของ
ทุกๆ ท่าน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่เป็นอาจารย์ให้คำปรึกษา ดูแลอย่าง
ใกล้ชิด และให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่อง เกี่ยวกับการทำโครงการพิเศษนี้
จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ และ ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติคุณย์ ที่กรุณาเป็น
กรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ โดยกรุณาช่วยตรวจทาน ให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำช่วยเหลือใน
การทำโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน
ทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้
คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไป
ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้
ความช่วยเหลือ และสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรม
สั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึง
เพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นารีรัตน์ เจริญวงศ์
พรญาณี ตันประเสริฐ
พรทิพย์ ก้านสันเทียะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.2 การเปลี่ยนแป้งให้กลายเป็นพลาสติก	7
2.3 แป้ง	10
2.4 แป้งมันสำปะหลัง	19
2.5 แป้งข้าวเหนียว	22
2.6 อนุภาคของขุยมะพร้าว	23
2.7 วัสดุประกอบ	25
2.8 พลาสติกไฮเซอร	26
2.8.1 ก्लीเซอรอล	26
2.9 สารหล่อลื่น	28
2.9.1 แมกนีเซียมสเตียเรท	28
2.10 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน	28
2.11 การอัดขึ้นรูปพลาสติก	29
2.12 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	30
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	36
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	37
3.3 วิธีการทดลอง	40
3.3.1 การเตรียมอนุภาคของขุยมะพร้าว	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว.....	40
3.3.3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว	40
3.3.4 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว... 41	41
3.3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ	41
3.3.5.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	41
3.3.5.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)	42
3.3.5.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)	42
3.3.5.4 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)	42
3.3.5.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	43
3.3.5.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)	43
3.3.5.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	45
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	46
4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)	51
4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)	55
4.4 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)	59
4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	68
4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)	71
4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการวิจัย	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก	90
ภาคผนวก ข	96
ภาคผนวก ค	98
ภาคผนวก ง	99
ภาคผนวก จ	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติสำคัญที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน	11
2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส	12
2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกทิน	13
2.4 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด	15
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	20
2.6 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลส	22
2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวโดยทั่วไป	23
2.8 องค์ประกอบทางเคมีของขุยมะพร้าว	24
2.9 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล	27
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	36
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว	36
3.3 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วย อนุภาคของขุยมะพร้าว	41
3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้	43
4.1 ค่าย่อและสัญลักษณ์แทนสูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากการทดลอง ...	45
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว	46
4.3 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ...	53
4.4 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์	59
4.5 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์	62
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 % ในวันที่ 7 และ 14	66
4.7 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว	80
4.8 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของอนุภาคขุยมะพร้าว	80
4.9 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	คำจำกัดความของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป	6
2.2	โครงสร้างของอะไมโลส	11
2.3	ลักษณะเกลียวของอะไมโลส	12
2.4	โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน	13
2.5	โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง แบบ A และ B	14
2.6	X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน	15
2.7	การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	17
2.8	การเกิดรีโทรเกรเดชัน (รูปถ่าย) และกลไกการคืนตัวของแป้ง (รูปขวา)	19
2.9	โครงสร้างของกลีเซอรอล	27
2.10	โครงสร้างของแมกนีเซียมสเตียเรท	28
2.11	เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	29
2.12	เครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding)	29
3.1	แผนผังการดำเนินงานของแป้งมันสำปะหลัง	38
3.2	แผนผังการดำเนินงานของแป้งข้าวเหนียว	39
4.1	สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของอนุภาคของขุยมะพร้าว	47
4.2	สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) แป้งมันสำปะหลัง และ (ข) แป้งข้าวเหนียว	47
4.3	สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน (ก) 0 (ข) 5 (ค) 10 และ (ง) 15 % โดยน้ำหนัก	48
4.4	สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน (ก) 0 (ข) 5 (ค) 10 และ (ง) 15 % โดยน้ำหนัก	48
4.5	ดิฟแฟรกโทแกรมของอนุภาคขุยมะพร้าว	51
4.6	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) แป้งมันสำปะหลัง และ (ข) แป้งข้าวเหนียว	51
4.7	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPCS/0%CC (ข) TPCS/5%CC (ค) TPCS/10%CC และ (ง) TPCS/15%CC	52
4.8	ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPWRS/0%CC (ข) TPWRS/5%CC (ค) TPWRS/10%CC และ (ง) TPWRS/15%CC	52
4.9	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคขุยมะพร้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า	55
4.10	แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวที่ไม่มีและมีการปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 500 และ 1000 เท่า	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์ 64
4.12	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์ 65
4.13	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 เปอร์เซ็นต์ 65
4.14	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ 68
4.15	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ 68
4.16	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 69
4.17	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน เป็นระยะเวลา 10 วัน 71
4.18	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน เป็นระยะเวลา 10 วัน 72
4.19	สมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด..... 73
4.20	สมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด..... 74
4.21	(ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว 76
4.22	(ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของอนุภาคขุยมะพร้าว 77
4.23	(ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	(ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก แป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
TPCS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง
TPWRS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว
CS	แป้งมันสำปะหลัง
WRS	แป้งข้าวเหนียว
CC	อนุภาคของขุยมะพร้าว
TPCS/0%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว
TPCS/5%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 5 % โดยน้ำหนัก
TPCS/10%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 10 % โดยน้ำหนัก
TPCS/15%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 15 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/0%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว
TPWRS/5%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 5 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/10%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 10 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/15%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 15 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้มีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกกันมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก ทนทานต่อสารเคมีต่างๆ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นที่นิยมนำไปใช้ในการผลิตเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เครื่องใช้ต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากสลายตัวได้ยาก เมื่อถูกทิ้งให้เป็นขยะ จะตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน ยากต่อการกำจัด เนื่องจากเมื่อเผาจะก่อให้เกิดควันที่เป็นแก๊สพิษ และทำให้ภาวะโลกร้อนรุนแรงขึ้น หากนำไปฝัง ก็จะทำให้ดินบริเวณนั้นเสื่อมสภาพ ไม่สามารถเพาะปลูกได้ นอกจากนี้การทิ้งขยะพลาสติกโดยขาดการจัดการที่ดี ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาได้

แนวทางการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพลาสติกที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน คือ การลดการใช้ (Reduce) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) และการรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งทั้ง 3 แนวทางนี้จะส่งผลให้มีการยืดอายุการใช้งานของพลาสติกให้ยาวขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะส่งผลให้การผลิตพลาสติกใหม่ลดลง อีกแนวทาง คือ การใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastics) ซึ่งจะแก้ปัญหาคาการสะสมตัวของพลาสติกและลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอีกด้วย [1]

การใช้พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพแทนที่พลาสติกสังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ทางธรรมชาติ (Renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งาน โดยพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพนั้น จะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้ แบ่งจึงจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่างมาก ในการนำมาผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากแบ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้เองและมีปริมาณมากเป็นอันดับ 2 รองมาจากเซลลูโลส หาง่าย ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ [2] โดยเรียกพลาสติกที่ทำมาจากแป้งนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ซึ่งหมายถึงพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหรือวัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้โดยการใช้ความร้อนและความดันสูง [3]

ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช คือ ขึ้นงานจากแป้งจะมีสมบัติเชิงกลไม่ดี มีการดูดความชื้นและมีความว่องไวต่อน้ำมาก เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของ TPS นั้น มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริง จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การตัดแปรรโครงสร้างทางเคมีหรือการผสมทางกายภาพระหว่าง TPS กับพอลิเมอร์หรือเส้นใยชนิดอื่นๆ (Composite material) [4] เพื่อให้ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากมีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำ ไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย แป้งเหนียวติดภาชนะ หนืดข้นขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใย ติดกันหมด เนื้อแป้งใสเป็นเงา พอเย็นแล้วจะติดกันเป็นก้อนเหนียว ติดภาชนะ มีอะไมโลเพกทินเป็นองค์ประกอบมากกว่า อะไมโลเพกทิน [5] ทำให้จับกันอย่างหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวสูง

แป้งข้าวเหนียว (Waxy rice starch) เป็นแป้งที่ได้จากข้าวเหนียวขาว ลักษณะของแป้งมีสีขาว มีกลิ่นตามธรรมชาติของแป้งข้าวเหนียว ไม่มีกลิ่นอับ มีอะไมโลเพกทินเป็นองค์ประกอบเกือบทั้งหมด ทำให้มีสมบัติในการดูดซับน้ำและขยายตัวน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า จึงมีความเหนียวมากกว่า [6]

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) [7] เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ป่าน ปอกระเจา เส้นใยไม้ เส้นใยฝ้าย เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อนุภาคของขุยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่หาง่าย มีราคาถูก น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้ว อนุภาคหรือเส้นใยทางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากมีความแข็งแรงและความหนาแน่นต่ำ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเส้นใยปอ [8] เส้นใยป่าน [8] เส้นใยฝ้าย [9] โดยใช้เทคนิคการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่า การเติมเส้นใยปอ เส้นใยป่าน หรือเส้นใยฝ้าย ส่งผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นและการดูดซับน้ำลดลง [8-9] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาอิทธิพลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมย่อยสลายได้ ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งถั่วเขียว แป้งข้าวเหนียว และแป้งท้าวยาย้ม่อม [10] โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งแต่ละชนิด ส่งผลทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น มีการดูดซับน้ำสูงขึ้น และทำให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มในการย่อยสลายโดยการฝังดินเร็วขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวและ LDPE แสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีที่สุด [10]

คณะผู้วิจัยจึงได้มีการนำงานวิจัยดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว ที่มีปริมาณอะไมโลเพกทินและอะไมโลเพกทินแตกต่างกัน โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยใช้อนุภาคของขุยมะพร้าว เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างไปจากเส้นใยเซลลูโลสชนิดอื่น โดยมีปริมาณเซลลูโลส และลิกนินที่สูง จึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยเซลลูโลสชนิดอื่น [8-9] นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่หาง่าย มีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย

คณะผู้วิจัยคาดว่า เมื่อได้ทำการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ทำมาจากแป้งต่างชนิดกัน ด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว จะส่งผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น และการดูดซับความชื้นลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวเป็นส่วนเสริมแรงโดยกระบวนการกดอัด

1.2.2 เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำมาจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว โดยการใช้อุณหภูมิของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนผสมต่างๆ

1.3.2 ศึกษาถึงผลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว

1.3.3 ศึกษาถึงผลของปริมาณของอนุภาคของขุยมะพร้าวที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ได้แก่ 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก

1.3.4 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ ดังนี้

1.3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

1.3.4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

1.3.4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

1.3.4.4 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

1.3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1.3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

1.3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวได้

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ผสมกับอนุภาคของขุยมะพร้าว

1.4.3 ช่วยลดการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและช่วยลดปริมาณขยะ ไม่ให้กลายเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมทั้งในปัจจุบันและอนาคต

1.4.4 ช่วยเพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และอนุภาคของขุยมะพร้าวให้มากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบัน ได้รับการยอมรับในปลายปีคริสต์ศักราช 1960 ด้วยแนวคิดที่ว่า จะทำให้เป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายจึงได้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวางและในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำและมีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น โดยมีกฎข้อบังคับ เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic หรือ Compostable plastic) มักเรียกว่า พลาสติกชีวภาพ เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ จึงทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าว ต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้นและสามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ซึ่งวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น [11]

2.1.1 ความเป็นมาของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา มนุษย์ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบ น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งประมาณการได้ว่า จะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยเฉพาะการเผาไหม้ ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะ ซึ่งได้ขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศน์ของโลก ทำให้การคิดค้นและพัฒนากระบวนการใหม่ รวมถึงเกิดการสร้างนวัตกรรมเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีอย่างครบวงจรภายในเวลาอันรวดเร็ว และเป็นสิ่งหนึ่งที่ทุกประเทศจำเป็นต้องพัฒนา ทั้งนี้นอกจากจะหมายถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีของประเทศของตนแล้ว ยังหมายถึงการเพิ่มศักยภาพและโอกาสในการแข่งขัน อันจะเชื่อมโยงไปสู่ความเป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศอีกด้วย ดังนั้นพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำและสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้น จะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity Plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้ [12]

2.1.2 คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จุลินทรีย์ หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้ว จะเหลือเพียงน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีกระบวนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักๆ อยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก จะเป็นการย่อยสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้ จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอ ก็จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่ 2 ภายในเซลล์ ผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) นี้ก็คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass) [12]

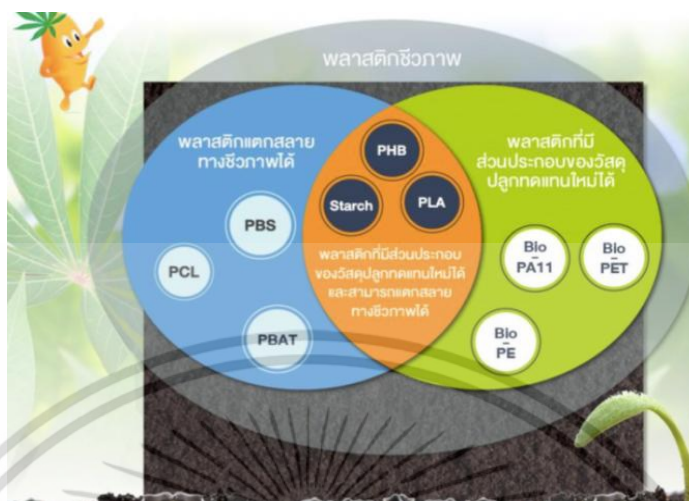
นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝน และแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมน้ำต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่าพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือพลาสติกสีเขียว (Green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน [12]

พลาสติกชีวภาพตามคำจำกัดความของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป (European Bioplastics, EuBP) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ความหมาย ได้แก่

1. พลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable plastics) คือ พลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดทั้งจากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (Bio-based materials/renewable) หรือจากปิโตรเคมี (Petro-based materials/non-renewable) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ที่เมื่อผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพ (Composting) หลังการใช้งานจะสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอนินทรีย์ มวลชีวภาพ และต้องไม่ทิ้งสิ่งที่ยังมองเห็นด้วยตาเปล่า สิ่งแปลกปลอม หรือสารพิษไว้ ตามที่ระบุไว้ตามมาตรฐานการทดสอบ ดังนี้ สหภาพยุโรป : EN 13432 / สหรัฐอเมริกา : ASTM D-6400 / ไทย : มอก. 17088 / ระดับนานาชาติ ISO 17088: 2008 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการรับรองจะได้รับตราสัญลักษณ์ตามมาตรฐานที่ได้

2. พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ (Bio-based plastics) คือ พลาสติกที่ผลิตมาจากแหล่งวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุลของแป้ง น้ำตาล น้ำมันพืช หรือเซลลูโลส โดยมีพืชที่นำมาใช้ผลิต ได้แก่ ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าวสาลี อ้อย และไม้ โดยสัดส่วนของแหล่งคาร์บอนในผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการตรวจสอบวัดตามมาตรฐานของ ASTM D-6866 โดยพลาสติกในกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติทั้งสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) หรือไม่สลายตัวได้ทางชีวภาพ

(Non-degradable) ซึ่งในประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาสัญลักษณ์ “Biomass Pla” เพื่อแสดงว่าเป็นพลาสติกที่ผลิตมาจากวัสดุที่ปลูกทดแทนใหม่อย่างน้อย ร้อยละ 25 [13]



รูปที่ 2.1 คำจำกัดความของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป [13]

นอกจากนี้ยังมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ขึ้นและให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ดังนี้

- BPS Japan (1994) – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้ เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ
- CEN (1993) – วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่เกิดการย่อยสลาย อันเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือแก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย
- DIN FNK 103.2 (1993) – วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมและมีอัตราการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ อยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน
- ISO 472:1998 – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ อันเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าว ต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นพลาสติก

การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) แบ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย มีมากในธรรมชาติ และมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ใน Polyolefin ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด กลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายกับ LDPE ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เพราะแป้งจะยังไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงจำเป็นที่จะต้องเติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล, เอทานอลามีน, พอร์มาไมด์ และซอร์บิทอล ลงไปภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอที่จะสามารถทำให้แป้งหลอมและไหลจนสามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ [3]

2.2.1 ความเป็นมาของการเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นพลาสติก

ในอดีตหากกล่าวถึงแป้ง คนส่วนใหญ่คงคิดถึงผลิตภัณฑ์จากอาหารนานาชนิด ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตาม ยังมีการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับอาหารอีกด้วย ซึ่งปัจจุบัน ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความรวดเร็วไปอย่างรวดเร็ว นวัตกรรมทางด้านแป้งเกิดขึ้นอย่างมากมาย การประยุกต์ใช้แป้งในอุตสาหกรรมที่แปลกใหม่ที่เรายังไม่เคยคาดคิดมาก่อน ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขับเคลื่อนรถยนต์ที่ผลิตจากแป้ง (แก๊สโซฮอลล์) ไฮโดรเจล หรือเจลที่สามารถดูดซับน้ำได้อย่างมหาศาล (Superabsorbable gel) ที่ผลิตจากแป้ง หรือแม้กระทั่งพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง

งานวิจัยเพื่อพัฒนาการนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เกิดขึ้นครั้งแรกในราว 40 ปีที่แล้ว (ในช่วงทศวรรษที่ 1970) ซึ่งในระยะแรก งานวิจัยด้านนี้ยังไม่ได้รับความสนใจมากนัก อย่างไรก็ตาม ด้วยภาวะโลกร้อนและปัญหามลพิษก่อกับภาวะการขาดแคลนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมีที่เกิดขึ้นในโลกขณะนี้ ทำให้ระยะหลัง งานวิจัยในการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ได้รับความสนใจและมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทั้งในแง่ของการวิจัยด้านเทคโนโลยีการผลิตและพัฒนาทางการตลาด ซึ่งถึงแม้จะมีราคาที่สูงกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอย่างมาก แต่เนื่องจากความตื่นตัวของผู้บริโภคที่มีต่อสิ่งแวดล้อม การยอมรับของผู้บริโภคต่อพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจึงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพนั้น หมายถึงพลาสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความแข็งแรงทนทานและมีสมบัติการใช้ประโยชน์ที่ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป (Conventional plastics) แต่มีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยน้ำย่อย (Enzymes) จากเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อสิ้นอายุการใช้งานของพลาสติกแล้ว จะสามารถย่อยสลายได้ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม [3]

ถึงแม้ว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อาจผลิตได้จากวัตถุดิบกลุ่มปิโตรเคมี (Petroleum-based resource) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ จะมุ่งเน้นการพัฒนาการผลิตจากวัตถุดิบชีวมวลจากธรรมชาติ (Bio-based materials) เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable) และถือเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในบรรดาชีวมวลจากธรรมชาติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหลาย แบ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณมาก หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ [3]

จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลในเบื้องต้นของสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ สามารถสรุปได้ว่า วัสดุชีวภาพ ซึ่งมีโอกาสพัฒนาเป็นธุรกิจนวัตกรรมในเชิงรุก เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรของประเศมี 3 ชนิด

1. พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) หรือ PLA วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต พอลิแลคติกแอซิด คือ แป้งที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ซึ่งได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพดและมันสำปะหลัง โดยมีกระบวนการผลิต เริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาลและนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ เกิดเป็นกรดแลคติก ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายกับการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้ มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่า Lactide หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์ของ Lactide ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่า PLA ซึ่งการกำหนด ความยาวของสายพอลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการ จะเป็นสิ่งที่ทำให้คุณสมบัติของ PLA เปลี่ยนไปตาม ลักษณะการใช้งาน ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับ เม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม อีกทั้ง PLA ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีความใส ไม่ย่อยสลาย ในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน นอกจากนี้ยังมี พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate) หรือ PBS เป็นพลาสติกสลายได้ ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ที่ผลิตจากมอนอเมอร์หลัก 2 ชนิด คือ กรดซัคซินิก (Succinic acid) ที่ผลิตมาจากพืช และ 1,4-Butanediol ที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดย PBS มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน มีลักษณะขุ่น สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายในหลากหลาย กระบวนการ โดยเฉพาะการฉีดขึ้นรูปและการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่ง PBS สามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 80-95 องศาเซลเซียส และมีความยืดหยุ่นที่ดี อีกทั้งยังสามารถนำไปผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุง คุณสมบัติให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หลายประเภทได้

2. พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Polyhydroxyalkanoates) หรือ PHAs เป็นสาร พอลิเมอร์ตั้งต้นที่สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ แป้งหรือน้ำตาลที่มาจาก ทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ซึ่งได้แก่ พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็น องค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิต เริ่มต้นจาก การบดหรือโม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาลและนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ชนิดพิเศษชื่อ Eschericia Coli ซึ่งกินน้ำตาลเป็นอาหารและสามารถ เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลภายในตัวจุลินทรีย์เองเป็น PHAs ซึ่งสามารถแยกออกมาได้โดย การกะเทาะแยกเปลือกนอกหุ้มจุลินทรีย์ออก เนื่องจาก PHAs มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) ที่กว้างตั้งแต่ 50-180 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีคุณสมบัติในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ พลาสติกได้หลากหลาย

3. โพรเพนไดออล (Propanediol) หรือ PDO เพื่อผลิตเส้นใยชีวภาพสำหรับ อุตสาหกรรมสิ่งทอ PDO เป็นมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตขึ้นโดยอาศัยแป้งจาก ทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ เช่น ข้าวโพดและมันสำปะหลัง ซึ่งกระบวนการผลิตจะคล้ายกับ การผลิต PLA โดยเริ่มจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลและทำการใช้สารเร่งปฏิกิริยาชนิดชีวภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Biocatalyst) เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็น PDO ซึ่งสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยชีวภาพได้ [11]

2.2.2 ความหมายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) หมายถึง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหรือวัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้โดยการใช้ความร้อนและความดันสูง โดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก แต่จะสามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additives) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินเป็นอิสระมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงค่อนข้างนำแป้งมาทำการขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ จึงทำให้สามารถเรียกพลาสติกที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช [3]

2.2.3 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หมายถึง พอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนตัวและหลอมเหลวได้ เมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อทำให้เย็นลงจะสามารถแข็งตัวและคงรูปร่างได้ พลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ภาชนะ และขึ้นรูปทรงต่างๆ ได้ การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติก มีข้อจำกัด คือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แทนที่จะหลอมเหลวแกรนูลแป้ง จะเกิดการเผาไหม้และสลาย อย่างไรก็ตาม หากมีการเติมสารเติมแต่งที่เรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ จะช่วยให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงเชิงกล ได้สารที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เม็ดพลาสติก TPS ที่ผลิตได้ สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เครื่องอัดรีด เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยง่าย จึงทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิต TPS สารที่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการผลิต TPS ได้แก่ กลีเซอรอล เนื่องจาก TPS สามารถหลอมตัวได้ เมื่อได้รับความร้อนและแรงเชิงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้ TPS เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ผลิตจาก TPS มีข้อจำกัดที่สำคัญ 2 ประการ คือ มีสมบัติเชิงกลไม่ดีและไม่ทนน้ำ จึงทำให้นักวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้ง 2 ด้านของ TPS ให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่การตัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมีและการผสม TPS กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ [3]

2.2.4 การใช้ประโยชน์จากพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน

2.2.4.1 การใช้แป้งเป็นสารตัวเติมในพลาสติก (Filler) การใช้แป้งในลักษณะนี้จะเป็นการผสมแป้งเข้ากับพลาสติกในเครื่องอัดรีด (Extruder) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อพลาสติกที่มีเม็ดแป้งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ การผสมแป้งกับพลาสติกในลักษณะนี้ จะเติมแป้งลงไปได้ในปริมาณไม่มากนัก โดยเฉพาะการผลิตฟิล์มบาง มักจะผสมแป้งได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแรกการผสมแป้งในพลาสติกส่วนใหญ่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ของพลาสติกผสม อย่างไรก็ตาม การที่ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตขึ้นจะย่อยสลายได้หรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแป้งด้วย หากเป็นพอลิเมอร์ที่

ย่อยสลายไม่ได้ เช่น พอลิเอทิลีน พลาสติกผสมที่ผลิตได้ จะเกิดการย่อยสลายเฉพาะในส่วนที่เป่งเท่านั้น

2.2.4.2 โฟมจากเป่ง ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนโฟมที่ผลิตจากพอลิสไตรีน ซึ่งใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เม็ดโฟมกันกระแทก (Loose-fill) ถาดหรือจานโฟม และผลิตภัณฑ์โฟมอื่นๆ โฟมที่ผลิตจากเป่งนอกจากจะสามารถย่อยสลายได้แล้ว ยังมีกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เพียงน้ำเป็นสารช่วยให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างโฟม (Blowing agent) เนื่องจากองค์ประกอบหลัก คือ เป่ง ทำให้โฟมที่ผลิตได้ ไม่ทนน้ำและยังมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าโฟมจากพอลิสไตรีน การนำพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, พอลิคาโพรแลคโตน และพอลิแลคติกแอซิด มาผสมกับเป่ง เป็นแนวทางที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของโฟมเป่ง

2.2.4.3 การใช้เป่งเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการหมัก เนื่องจากเป่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส จึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับกระบวนการหมัก เพื่อการผลิตสารหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์แอลดีไฮด์-เอสเทอร์ และกรด เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น ถุง ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ของเล่น และอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ หรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนในรถยนต์ [3]

2.3 เป่ง

เป่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว [15] ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสทั้งหมด เป่งในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อยู่่น้อยมาก ส่วนเป่งที่ผลิตโดยทั่วไป ที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) แต่เมื่อสกัดสิ่งเจือปน อันได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่นๆ ออกไป จนเหลือเป่งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็น เป่งสตาร์ช (Starch) และเนื่องจากเป่งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง เป่งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูปนิยมเรียกว่า เป่งดิบ (Raw starch หรือ Native starch) ส่วนเป่งที่มีการตัดแปรหรือแปรรูปแล้ว เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช หรือเป่งตัดแปร [15] ซึ่งเป่งที่พบในธรรมชาติ จะพบอยู่ในรูปเม็ดเป่งขนาด 1-100 ไมครอน [16]

2.3.1 องค์ประกอบภายในเป่ง

เป่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ [15] เป่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบไปด้วย Anhydroglucose unit มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลเป่งจะมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group ซึ่งวางอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของเป่ง จะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ เป่งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง [16]

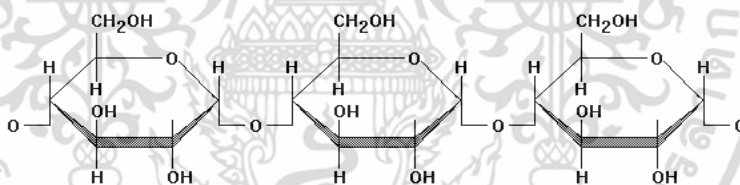
แบ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) ซึ่งอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติสำคัญที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน [15]

คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
1. ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
2. พันธะที่จับ	α -1, 4	α -1, 4 และ α -1, 6
3. ขนาด	200–2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
4. การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
5. การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
6. การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.3.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α -1, 4) [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



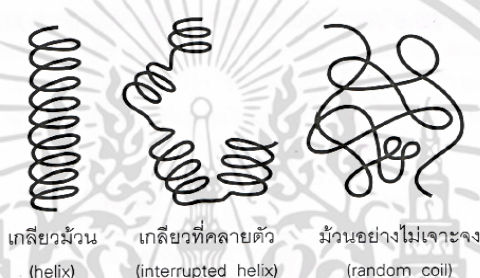
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [17]

ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่มีไม่มาก โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมาก จะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง [16] อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส และสามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล (Butanol), กรดไขมัน (Fatty acid), ฟีนอล (Phenol) และไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ [15]

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก

(Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลลาทีนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับ อะไมโลเพกทินอยู่ในใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิด อะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของ อะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ [15]



รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [15]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [15]

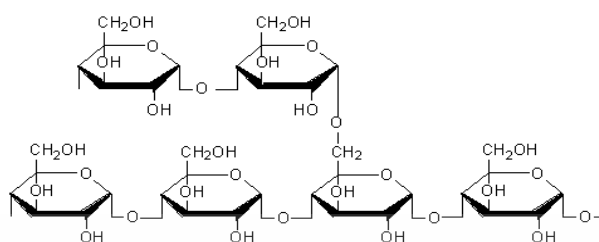
แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโลส (%)	β - Amylolysis Limit (%)	ขนาด โมเลกุล (DP) เฉลี่ย	จำนวน สาย เฉลี่ย (NC)	ความ ยาวสาย เฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
1. แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
2. แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
3. แป้งข้าวเจ้า	17					
- พันธุ์อินดิกา		73	1,000	4.0	250	49
- พันธุ์จาโปนิก		81	1,100	3.4	320	31
4. แป้งมัน สำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
5. แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	

2.3.1.2 อะไมโลเพกทิน (Amylopectin)

อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของ กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [18]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และเนื่องจากอะไมโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง จึงมีอัตราการคืนตัวต่ำ [15]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [15]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโล เพกทิน (%)	ขนาด โมเลกุล (DP) เฉลี่ย	ความ ยาวสาย เฉลี่ย (CL)	จำนวน สาย เฉลี่ย (NC)	ความยาว สายภายนอก เฉลี่ย (ECL)	ความยาว สายภายใน เฉลี่ย (ICL)
1. แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
2. แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
3. แป้งข้าวเจ้า	83					
- พันธุ์อินดิกา		4,700	21	220	14	6
- พันธุ์จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
4. ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
5. แป้งมัน สำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
6. แป้งมันฝรั่ง	83					

2.3.1.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช ส่วนปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลส อะไมโลเพกทิน และสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่

กับสภาพการเพาะปลูก เช่น ปริมาณน้ำฝนระหว่างเพาะปลูก และเวลาในการเพาะปลูก เป็นต้น [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จากเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

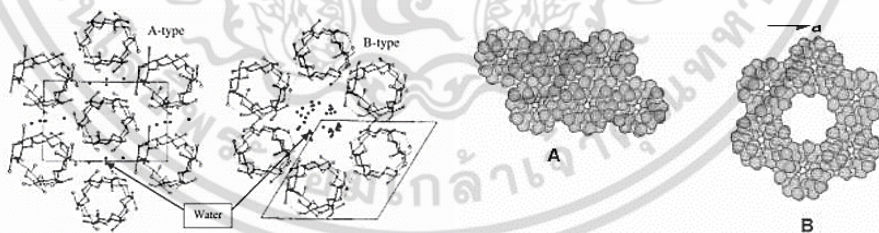
2.3.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

- ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) เช่น โปรตีนที่ไม่ละลาย และ ฟังก์ชันัล ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
- ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) สามารถสกัดออกได้โดยไม่ทำลายเม็ดแป้ง
- ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น สารประกอบไนโตรเจนในแป้ง ไขมันในแป้งธัญพืช และหมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง [15]

2.3.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก จะพบว่าเม็ดแป้งมีขนาดรูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน สายโซ่สั้นของอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ [15] ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำ จะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V [19]

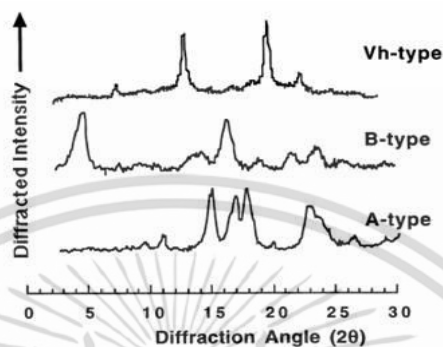


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง แบบ A และ B [20]

โครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงแตกต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ให้รูปแบบของ X-ray diffraction แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 2 θ เท่ากับ 17 และ 18 และพีคเดี่ยวที่ 2 θ เท่ากับ 23 แต่ไม่มีพีคที่ 2 θ เท่ากับ 5.6 ส่วนแป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 2 θ เท่ากับ 5.6 และ 17 แต่ไม่มีพีคที่ 2 θ เท่ากับ 18 และมีพีคคู่ (Doublet) ที่ 2 θ เท่ากับ 22 และ 24 แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 2 θ เท่ากับ 5.6

เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 17.9 แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติ (Treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งชั้นที่ถูกบ่มไว้นานที่อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส, 30 นาที : Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนไปเป็นชนิด A จากเดิมที่เป็นชนิด B [19]



รูปที่ 2.6 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [20]

ตารางที่ 2.4 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด [15]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิด เจลลิ่งในเซชัน (°C) ¹⁾	ปริมาณอะไมโลส (%)
โครงสร้าง A			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวไรน์	34	61.3	26
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
ข้าวโพดเหนียว	40	72.7	0
เผือกแตงจีน	45	79.4	16
อะไมโลเดกซ์ทริน	48	88.5	-
โครงสร้าง B			
ข้าวโพดอะไมโลเมส	15 - 22	86.0	55 - 75
สาคุ	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	38	70.0	20
Horse chestnut	37	69.0	25
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

¹⁾ จุดกึ่งกลางในช่วงการเกิดเจลลิ่งในเซชัน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สมบัติของแป้ง

2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสภาวะสมดุลระหว่างความชื้นในภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมลงไป และความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมี 3 รูปแบบ ได้แก่ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$ [15]

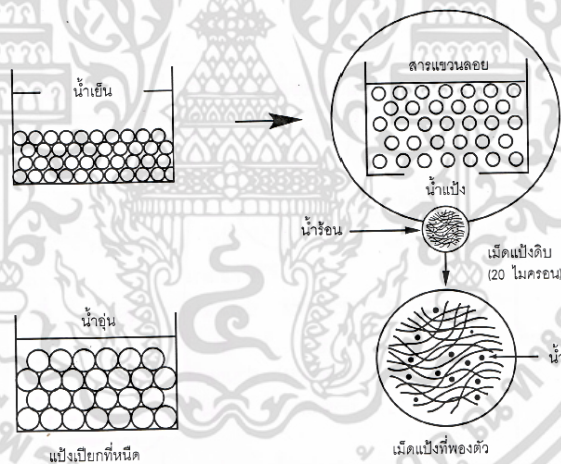
ของเหลวสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) ลงไป พบว่า สีหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งนั้นประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็น Molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้งหรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติ แต่เกิดการขยายขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ [15] และการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินภายในเม็ดแป้ง ในส่วนผลึกโมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ ส่วนอสัณฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้าง [21] แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย การจับกันของโมเลกุลในส่วนผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้ความหนืด การละลาย และความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง ลักษณะร่างแหในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดที่มีรูปแบบแตกต่างกันไป เป็นต้น เมื่อทำการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง จะเกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา

กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ [16]

2.3.3.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) การจัดเรียงตัวลักษณะนี้ ทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อทำการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย เม็ดแป้งจะสามารถดูดน้ำแล้วพองตัวได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดและใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากจึงเกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด [15]



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [15]

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้ง แบ่งได้ 3 ระยะ โดยระยะแรก เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเย็นได้จำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดระนาบโพลาริซได้ โดยเมื่อนำไปอบแห้ง จะได้แป้งที่มีลักษณะและสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในส่วนที่เป็นผลึกจับตัวกันอย่างหนาแน่นและแข็งแรง จึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ

65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งเอนกสารนี้เป็นเอกลักษณ์ที่สังเกตเห็นได้ชัดในพืชที่รับประทานได้ เมื่อนำแป้งที่ได้ไปใช้จะไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาทีนในเซชัน มีการเปลี่ยนรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดระนาบ แสงโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้ จะเริ่มละลาย ออกมา เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน มีการละลาย ของแป้งเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจล การเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้ง จะทำให้ หมูไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น ระดับอุณหภูมิในการเกิด เจลาทีนในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง [16] เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี โครงสร้างส่วนของผลึกที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความ สม่าเสมอของการเกิดเจลาทีนในซีที่ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกัน จากแหล่งเดียวกัน อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนในเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้ง ขนาดใหญ่จะเกิดเจลาทีนในซีได้ก่อนขนาดเล็ก [21]

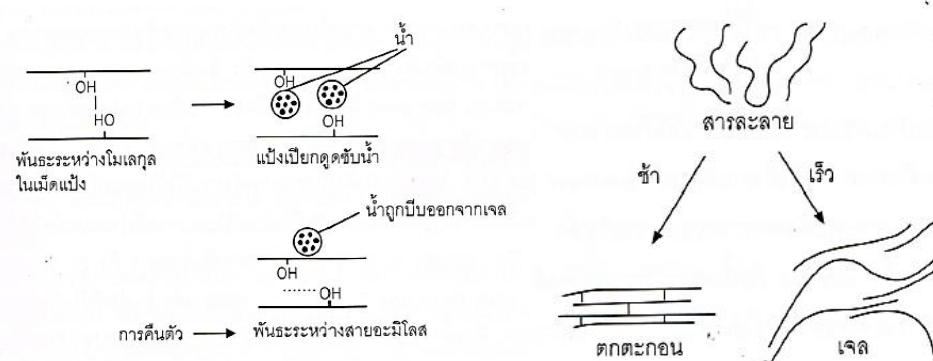
2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีนในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้ เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็ก จะกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิด การจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้ สามารถอุ้มน้ำและไมดูดน้ำเข้ามาในโครงสร้างอีก มีความหนืดคงตัวเพิ่มขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุล ของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบมาออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis เจลจะมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ด้านซ้าย)

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้ง ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะ ขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้ง ที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลของน้ำถูกบีบให้ออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ด้านขวา)

ปัจจัยในการคืนตัวของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกทิน และองค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง แป้งที่มีปริมาณ อะไมโลสสูง เกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกทินสูง [15] อะไมโลเพกทิน จะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก และการคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความ เข้มข้นสูงและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นในแป้งแต่ละชนิดจึงมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (รูปซ้าย) และกลไกการคั่นตัวของแป้ง (รูปขวา) [15]

2.4 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Manihotesculenta Crantz* มีชื่อสามัญเรียกหลายชื่อตามภาษาต่างๆ ที่ได้ยินกันมากได้แก่ Cassava, Yuca, Mandioa, Manioc และ Tapioca

2.4.1 ลักษณะของต้นมันสำปะหลัง

ต้นมันสำปะหลังจัดเป็นไม้พุ่ม มีลำต้นตั้งตรง เป็นไม้เนื้อแข็ง ที่มีความสูงของลำต้นประมาณ 1-5 เมตร มีรากสะสมอาหารเป็นแท่งหนาอยู่ใต้ดินมีประมาณ 5-10 รากต่อต้น [22-23] รากมันสำปะหลังหรือหัวมันสำปะหลังเป็นแบบระบบรากฝอย เมื่อนำหัวมันสำปะหลังมาตัดตามขวาง จะมีส่วนประกอบดังนี้ คือ เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นใน และส่วนสะสมแป้งหรือที่เรียกว่าไส้กลาง [23] ส่วนอีกข้อมูลหนึ่งระบุว่า รากมันสำปะหลังจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ รากจริงและรากสะสมอาหาร (ทั่วไปเรียกว่าหัว) ที่มีปริมาณแป้งประมาณ 15-40 เปอร์เซ็นต์ รากสะสมอาหารจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-15 เซนติเมตร และยาวประมาณ 15-100 เซนติเมตร [24]

2.4.2 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีการเก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะทำการสะสมคาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้งไว้ในราก โดยความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในรากนั้น จะมีความแตกต่างกันออกไปบ้าง เนื่องจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว อายุการเก็บเกี่ยว และปัจจัยด้านอื่นๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังอาจจะแตกต่างกันไป [19]

2.4.3 ลักษณะการผลิตและแปรรูปแป้งมันสำปะหลัง

1. แป้งมันสำปะหลัง (Native starch) คือ แป้งที่ได้จากหัวมันสดด้วยกระบวนการแยกกากโปรตีน โดยจะมีกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 2-2.5 ล้านตันต่อปี

2. แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modify starch) คือ แป้งที่ได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์ เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้มีความเหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [25]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	0.3
ไขมัน	1.1
ความชื้น	0.5
ซีเถ้า	0.2
คาร์โบไฮเดรต	85.0
-อะไมโลส	16.4
-อะไมโลเพกทิน	83.6

จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ก็คือ แป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อย และความหนาแน่นของหัวจะสูง ดังนั้นในการตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้ง (เชื้อแป้ง) อย่างเร็ว ที่นิยมทำกันคือ การตรวจสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อย แสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำมาก และมีแป้งน้อย แต่ถ้าในกรณีกลับกัน ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมาก ก็แสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก [6]

2.4.4 สมบัติที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังจะมีคุณสมบัติเป็นแป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวแป้งเปียกใส และมีความเหนียวสูง จับผิวสัมผัสของแป้ง จะเนียนนุ่มลื่นมือ เมื่อทำให้สุก จะเหลวเหนียวหนืด เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียวคงตัว ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสะดวกและพร้อมที่จะนำไปใช้ผสมกับอาหารที่ต้องการความเหนียวหนืดใส รวมถึงใช้ผสมกับสารแต่งกลิ่นรสและสารแต่งสี นอกจากนี้ มันสำปะหลังยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอีกมากมาย หัวมันสำปะหลังสดจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 20

2.4.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายถ้วย มีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำที่เรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกทินและยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline หรือ Micelles ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง โดย Crystalline regions นี้ มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก

2. โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินต่ำกว่าแบบที่ 1 โดยบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้ เรียกว่า Amorphous regions ซึ่งเป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดีและพองตัวได้ง่าย [15]

2.4.6 การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง

2.4.6.1 อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม คุณสมบัติของแป้ง คือ เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้น (Thickener) ในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว (Stabilizer) ช่วยให้อาหารเกาะตัวกันดีขึ้น (Binder) และช่วยในการเสริมแต่ง (Filler) นอกจากนี้ แป้งยังเป็นสิ่งที่หาได้ง่ายและราคาค่อนข้างถูก จึงถูกนำไปใช้ในการผลิตอาหารต่างๆ ตัวอย่างเช่น ซอส ลูกกวาด และไอศกรีม เป็นต้น

2.4.6.2 อุตสาหกรรมผงชูรส ได้แก่ การนำแป้งมันไปเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตผงชูรส สำหรับใช้ในการปรุงอาหารที่มีชื่อทางเคมีว่า โมโนโซเดียมกลูตาเมท (Monosodium glutamate) ซึ่งนิยมบริโภคกันทั่วไป โดยอุตสาหกรรมนี้ ใช้แป้งมันสำปะหลังถึงประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณแป้งมันที่ผลิตได้ทั้งหมด

2.4.6.3 อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน ได้แก่ การนำแป้งมันไปผลิตเป็นน้ำเชื่อมไฮฟรักโตส 42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้รสหวานเร็วกว่าและจางเร็วกว่าน้ำตาลทราย ใช้ทำน้ำตาลกลูโคส แดร์กโตส ซอลบิทอล และใช้แทนน้ำตาลซูโครสในผลไม้กระป๋อง แยม และอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยแป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน จะสามารถผลิตน้ำเชื่อมไฮฟรักโตสได้ 1 ตัน

2.4.6.4 อุตสาหกรรมยารักษาโรค ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมในการผลิตยาประเภทแคปซูลหรือยาเม็ดรักษาโรคต่างๆ ได้ โดยจะใช้เป็นตัวเจือจางในยาประเภทแคปซูลและยาเม็ด

2.4.6.5 อุตสาหกรรมกาวแป้งมัน มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียวและมีคุณสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิม ไม่มีการคืนตัว จึงถูกนำไปใช้ทำกาว เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.4.6.6 อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ผลิตกระดาษ ซึ่งเป็วัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้กระป๋อง เครื่องดื่มชูกำลัง และใช้ในอุตสาหกรรมยา

2.4.6.7 อุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้ายที่จะใช้ทอผ้านั้น จะต้องผ่านการชุบแป้งมันสำปะหลังเสียก่อน เพื่อให้ด้ายลื่นและเรียบ ไม่มีขน ทำให้เวลาทอผ้า จะมีความยืดหยุ่นดีขึ้น และเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายและสีได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังเป็นการป้องกันการเปราะของผ้าพิมพ์ รวมทั้งการใช้แป้งมันเพื่อเพิ่มความเงางามและคงทนของเนื้อผ้า

2.4.6.8 อุตสาหกรรมกระดาษ การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่างๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็กๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตาม แผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จึงต้องมีการฉาบผิวด้วยแป้ง เพื่อให้กระดาษเรียบและยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึกหรือพิมพ์สี นอกจากนี้กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

2.4.6.9 อุตสาหกรรมไม้อัด แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เพราะแป้งมันมีคุณสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหนา แข็งแรงและทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสม ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะกาวที่ผลิตได้นั้น ใช้แป้งเป็นส่วนผสมถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษกว่า

แป้งประเภทอื่นๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอนเมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าด้วย

2.4.6.10 วัสดุภัณฑ์ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นการนำแป้งมันสำปะหลัง มาแปรสภาพคล้ายพลาสติก ซึ่งเมื่อเติมสารพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ก็จะทำให้เกิดเป็น สารผสมที่สามารถนำไปทำเป็นวัสดุภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกได้ ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกที่ สลายได้ทางชีวภาพ โดยทำเป็นภาชนะใส่อาหารต่างๆ แทนพลาสติกจริงซึ่งสลายตัวได้ยากอีกด้วย

2.4.6.11 ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ การผลิตสารดูดน้ำหรือ พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมาก (High-water absorbing polymer, HWAP) ใช้ในงานด้านอนามัยทาง การแพทย์ เช่น ผ้าอ้อมสำหรับเด็กและผู้ใหญ่ ผ้าอนามัยสำหรับสตรีหรือใช้เป็นวัสดุป้องกันน้ำสำหรับ สายเคเบิลใต้ดิน กระดาษขุบผนังสำหรับควบคุมความชื้น และแผ่นเย็บสำหรับลดไข้ เป็นต้น [26]

2.5 แป้งข้าวเหนียว

แป้งข้าวเหนียว (Sticky rice, Waxy rice หรือ Glutinous rice) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Oryza sativa var. glutinosa* [27] เป็นแป้งที่ได้จากข้าวเหนียวขาว มีสีขาวย มีกลิ่นตามธรรมชาติ ของแป้งข้าวเหนียว ไม่มีกลิ่นอับ หรือกลิ่นไม่พึงประสงค์อื่น เป็นผงละเอียดไม่จับกันเป็นก้อน สากมือ น้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า ในสมัยก่อนได้จากแป้งโม้ แป้งข้าวเหนียวมีอะไมโลเพกทินเป็นองค์ประกอบ เกือบทั้งหมด ทำให้มีสมบัติในการดูดซับน้ำและขยายตัวน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้าจึงมีความเหนียวมากกว่า [6]

2.5.1 ข้าวเหนียว

ลักษณะเด่นเมล็ดข้าวมีสีขุ่น เมื่อผ่านการนึ่งจะได้ข้าวที่มีลักษณะเหนียว เพราะมี อะไมโลเพกทินสูงและมีอะไมโลสต่ำ ข้าวเหนียวเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่ประเทศไทยสามารถ ผลิตได้ และยังสามารถแปรรูปเป็นแป้งข้าวเหนียว เพื่อเพิ่มมูลค่าได้อีกด้วย โดยปกติแป้งข้าวเหนียวจะมี องค์ประกอบของอะไมโลสต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า หรืออาจกล่าวได้ว่ามีอะไมโลเพกทินเป็นองค์ประกอบ เกือบทั้งหมด ทำให้แป้งข้าวเหนียวมีสมบัติในการดูดน้ำและขยายตัวน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า จึงส่งผล ทำให้เนื้อสัมผัสแป้งสุกของแป้งข้าวเหนียวเหนียวกว่าแป้งข้าวเจ้า [27] ได้มีการแบ่งประเภทข้าวตาม ปริมาณอะไมโลสและลักษณะของข้าวสุก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลส [28]

ประเภทข้าว	ปริมาณอะไมโลส(%)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	1-2	เหนียวมาก
ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำมาก	3-9	เหนียว นุ่ม
ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำ	10-20	เหนียว นุ่ม
ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำปานกลาง	21-25	นุ่ม ค่อนข้าวเหนียว
ข้าวเจ้าอะไมโลสสูง	26-33	ร่วน แข็ง

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวโดยทั่วไป [29]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	1.6
ไขมัน	6.6
ความชื้น	4.0
ซีลีไค	8.8
คาร์โบไฮเดรต	82.7
-อะไมโลส	1.0
-อะไมโลเพกทิน	99.0

2.5.2 ประโยชน์และสรรพคุณของข้าวเหนียว

- เป็นอาหารที่ทำให้ร่างกายแข็งแรง ทำให้สมองสงบ คลายเครียด กินแล้วจะรู้สึกผ่อนคลาย ทำให้อิ่มท้อง
- มีธาตุเหล็กและกรดโฟลิก ช่วยในการสร้างเม็ดเลือด ทำให้เม็ดเลือดสมบูรณ์
- มีวิตามินอี ช่วยป้องกันหลอดเลือดหัวใจตีบ ป้องกันปัญหาหัวใจในตาเสื่อม
- มีโปรตีน ช่วยในการเจริญเติบโตของร่างกาย และซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ
- ช่วยสร้างสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น วิตามินบี1 บี2
- ช่วยขับลมและบำรุงร่างกาย
- ช่วยเพิ่มสมรรถภาพการทำงานของกระเพาะอาหาร
- ช่วยบำรุงผิวพรรณให้เนียนขึ้น

2.5.3 การใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวเหนียว

นิยมใช้ในด้านอาหารและขนม เช่น บะหมี่เกี๊ยว ขนมต่างๆ โดยขนมที่ทำจากแป้งข้าวเหนียวมีความเหนียวนุ่ม เช่น ขนมถั่วแปบ ขนมโค ขนมโก้ไทย ขนมต้ม ขนมบ้าบิ่น บัวลอย ขนมเทียน ขนมแข่ง ข้าวเหนียวเปียก เป็นต้น [30]

2.6 อนุภาคของขุยมะพร้าว

ขุยมะพร้าวเป็นเส้นใยจากมะพร้าว (Coconut) โดยมะพร้าวมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชยืนต้น ใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดหนึ่ง อยู่ในตระกูลปาล์ม [31]

ใยมะพร้าว (Coconut coir) เป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนที่เป็นเปลือกชั้นในที่อยู่ระหว่างผลและเปลือกชั้นนอก ถือเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด (Seed fiber) หรือหมายถึง เปลือกมะพร้าวที่ป่นเอาใยออกหรือป่นให้ละเอียดเป็นขุยๆ ละเอียดประมาณเม็ดทรายแห้งสนิท เศษที่เหลือจากการผลิตใยมะพร้าวจะเรียกว่า ขุยมะพร้าว มีลักษณะเป็นเศษใยมะพร้าวเส้นสั้นๆ สีธรรมชาติของขุยมะพร้าวเป็นสีน้ำตาล มีความแข็งแรง ทนต่อความชื้นและน้ำได้ดี ทนต่อการกัดสีได้ดีมาก มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ จึงสามารถทำลายได้ง่าย [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของขุยมะพร้าว [33]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
การละลายน้ำ	5.25
เพกทิน และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง	3.00
เฮมิเซลลูโลส	0.25
ลิกนิน	45.84
เซลลูโลส	43.44
ขี้เถ้า	2.22

2.6.1 องค์ประกอบที่สำคัญของขุยมะพร้าว

2.6.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

ขุยมะพร้าวเป็นเส้นใยจากพืช หรือเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fibers) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง เกิดจากเซลลูโลสยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมีเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่มีสูตรเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ กล่าวคือ โมเลกุลเซลลูโลสจะเกิดจากหน่วยโมเลกุลซ้ำ (Repeat Units) ของเซลโลไบโอส (Cellobiose) ยึดจับกันเป็นสายยาว โดยเซลโลไบโอสเป็นไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะบีตา-1, 4-ไกลโคไซด์ มีสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซิง เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก ซึ่งสามารถดึงดูดน้ำหรือเกิดปฏิกิริยาจับกับหมู่ธาตุอื่นๆ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีความเป็นระเบียบ (Crystalline) สูง ประมาณ 85-95 เปอร์เซ็นต์ และระหว่างสายโมเลกุลจะมีการยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นระยะ ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีความเหนียว แข็งแรงค่อนข้างสูง น้ำหนักเบา [34]

2.6.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นกลุ่มของเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาล ตั้งแต่ 2-4 ชนิดขึ้นไป น้ำตาลที่พบมากคือ น้ำตาลไซโลส (Xylose) และ อะราบินอส (Arabinose) เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช โดยรวมอยู่กับ ลิกนิน และเซลลูโลส มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารละลายต่าง [35]

2.6.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (Lignin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ประกอบไปด้วยไฮดรอกซีโมเลกุลของออกซิเจนเตตฟีนิลโพรเพน (Oxygenated phenyl propane) มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 สันเคราะห์จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล (Coumaryl) โคนิเฟอริล (Coniferyl) และไซนาพิล (Sinapyl) ลิกนินไม่ละลายทั้งในกรดและด่าง และไม่สามารยย่อยได้ในร่างกายมนุษย์ ในพืชที่ค่อนข้างแก่จะพบลิกนินมาก และผลไม้สุกมีลิกนินมากกว่าผลไม้ดิบ คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ คือ สามารถดูดซับน้ำ (Bile acid) ได้ดี และอาจมีผลชะลอการดูดซึมสารอาหารบางชนิดในลำไส้เล็ก [35]

2.6.1.4 สารอนินทรีย์ (Inorganic constituents)

สารอนินทรีย์ในขุยมะพร้าวมักอยู่ในรูปของเถ้า (Ash) และซิลิกา (Silica) เป็นต้น [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.5 แวกซ์ (Wax)

แวกซ์โดยปกติพบในปริมาณน้อย จะพบร่วมกับส่วนที่เป็นโครงสร้างของพีช โดยมีองค์ประกอบของไขมันที่ไม่รวมกับน้ำ [35]

2.6.2 การใช้ประโยชน์จากขุยมะพร้าว

- ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในสินค้าประเภทที่นอนเพื่อสุขภาพและเตียงนอนของโรงพยาบาล เนื่องจากมีคุณสมบัติของการหมุนเวียนอากาศสูง
- ใช้เป็นฉนวนในการดูดซับเสียง สำหรับห้องบันทึกเสียงและระบบเสียงในลำโพง ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระเทือน
- ใช้ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระเทือน เหมาะสำหรับสินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์ เช่น เป็นวัสดุภายในที่นั่งโดยสารบนเครื่องบินโดยสารและเบาะนั่งในรถยนต์ชั้นหนึ่ง
- ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การใช้เป็นฐานรอง เพื่อการยึดเกาะของต้นกล้าและต้นกล้วยไม้ หรือใช้แทนหญ้าและฟางคลุมพื้นดินรอบๆ ต้นไม้ เพื่อรักษาความชื้น อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการเพาะปลูกได้
- ใช้ปกคลุมที่โล่งและแท่นที่-ออฟของสนามกอล์ฟ เพื่อเก็บกักความชื้นและรักษาพื้นหญ้าให้เขียวชอุ่ม
- ในต่างประเทศ ม้วนขุยมะพร้าวสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันการพังทลายของดินริมตลิ่งหรือเป็นเขื่อนป้องกันการกัดเซาะของคลื่นริมแม่น้ำ
- ใช้ผลิตเชือกเกลียวที่มีความเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชือกปอ
- ใช้ผลิตแปรงไม้กวาดและพรมเก็บตักฝุ่นภายนอกอาคาร ซึ่งพรมใยมะพร้าวจะมีอายุการใช้งานยาวนาน
- ใช้ผลิตเป็นแผ่นกรองหยาด เช่น ฝุ่นเหนียวพิงโคท สีฝุ่น เรซิน กาว ยางมะตอย เป็นต้น
- ใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา [36]

2.7 วัสดุประกอบ

2.7.1 นิยามของวัสดุประกอบ

วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composite) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้ว คอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นส่วนที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforced phase) ในส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้น จะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดี เหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ได้ จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ โดยประเภทของคอมโพสิต สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) คือ คอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้ มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composite) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งดิ่งสูง เมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดิ่งกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดุลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ โดยอิทธิพลของความยาวเส้นใยจะมีต่อสมบัติของคอมโพสิตในด้านค่าความแข็งแรงและความแข็งดิ่งของคอมโพสิต และเพื่อให้คอมโพสิตมีสมบัติดิ่งกล่าวที่ดี เส้นใยที่นำมาเสริมแรง ควรมีค่าความยาววิกฤติค่าหนึ่ง (ซึ่งค่าความยาววิกฤตินี้ ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย) ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความต้านทานแรงดิ่ง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยหรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (Shear yield strength) ของเมทริกซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างความยาววิกฤติของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความต้านทานแรงดิ่งของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

3. คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite) คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย สามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel) [37]

2.8 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเคมีที่เติมลงในพอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและดัดโค้ง (Flexibility) ได้เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิมและทำให้ความต้านทานแรงดิ่งของพอลิเมอร์ลดลง แต่ความยาว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น รวมทั้งความทนแรงกระแทกที่ดีขึ้น สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติ ดังนี้

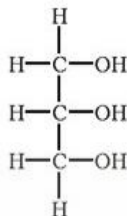
- เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง ควรมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ต่ำกว่าประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ระหว่างการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ที่อุณหภูมิห้อง จึงมีอัตราการละลายในเนื้อพอลิเมอร์ช้า
- ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ที่จะผสม
- พลาสติไซเซอร์ไม่ควรตกผลึกในช่วงอุณหภูมิขณะใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดิ่งดุดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้ [38]

2.8.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (Glycerin) เป็นชื่อที่มาจากคำในภาษากรีกว่า glykys หมายถึง ความหวาน กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ มีรสหวานเล็กน้อย มีคุณสมบัติดูดความชื้นในบรรยากาศได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความนุ่ม และความยืดหยุ่น กลีเซอรอลเป็นสารจำพวกพอลิไฮดรอลแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรโมเลกุล คือ $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

92.09 กรัมต่อโมล และมีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) [39] ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งเป็นหมู่ของไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) 2 หมู่ และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกลีเซอรอล [40]

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล [39]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรทางเคมี	CH ₂ OH-CHOH-CH ₂ OH หรือ C ₃ H ₈ O ₃
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะและสี	ของเหลว ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 °C
จุดเดือด	290 °C
สมบัติการละลายใน 100 ส่วน	
- น้ำ	ละลายดีมาก
- แอลกอฮอล์	ละลายดีมาก
- อีเทอร์	ไม่ละลาย
ความร้อนของการหลอมเหลวที่ 18.07 °C	47.49 cal/g
ความหนืดของกลีเซอรอลในเหลวที่	
- ความบริสุทธิ์ 100 %	10 cP
- ความบริสุทธิ์ 50 %	25 cP
การแพร่กระจายใน	
- i-Amyl alcohol	0.12 × 10 ⁵ cm ² /sec
- เอทานอล	0.56 × 10 ⁵ cm ² /sec
- น้ำ	0.94 × 10 ⁵ cm ² /sec

สำหรับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลในตารางที่ 2.9 พบว่า กลีเซอรอลละลายได้ในสารหลายประเภท จึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางค์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่น (Lubricants) ใช้ผสมกับพอลิเมอร์มีหลายชนิดและมีบทบาทหน้าที่ต่างๆ กัน สารหล่อลื่นมีหน้าที่หลัก ได้แก่

- ลดความเสียดทาน (Friction) ระหว่างผนังของเครื่องจักร หรือเครื่องมือ เมื่อสัมผัสกับผลิตภัณฑ์พลาสติกสำเร็จรูป
- ช่วยให้พอลิเมอร์ไม่ติดกับผิวหน้าเครื่องจักรขณะร้อน การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น เป็นวัสดุที่ไหลซึมออกมาจากส่วนผสมของพอลิเมอร์ในขณะขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และอยู่ระหว่างชั้นของพอลิเมอร์ห่อหุ้มเคลือบผิวของโลหะที่ใช้เป็นเครื่องมือในการผลิตขึ้นรูปพลาสติก สารหล่อลื่นประเภทนี้เรียกว่า สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) สารหล่อลื่นควรเป็นของไหลในขณะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
- ทำหน้าที่คล้ายสารก่ออิมัลชัน ทำให้ส่วนผสมอื่นๆ เข้ากันได้และละลายได้ดีในพอลิเมอร์ สารหล่อลื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ช่วยให้พอลิเมอร์ห่อหุ้มเคลือบผิวได้สะดวกขึ้น คือ ทำหน้าที่ลดความเหนียว สารหล่อลื่นประเภทนี้เรียกว่า สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) ข้อแตกต่างจากพลาสติกไซเซออร์ คือ สารหล่อลื่นนี้มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ น้อยมาก [38]

2.9.1 แมกนีเซียมสเตียเรท

แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) หรือ เกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) ของกรดสเตียริก (Stearic acid) มีสูตรทางเคมีคือ $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 มวลโมเลกุลเท่ากับ 591.34 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไม่ละลายในน้ำ เอทานอล (Ethanol) และอีเทอร์ (Ether) มีช่วงการหลอมเหลว 117–150 องศาเซลเซียส [41] ได้รับการพิจารณาโดย FDA's Subcommittee ว่าปลอดภัยสำหรับมนุษย์ [2] มีการใช้งานเป็นสารหล่อลื่นในด้านเครื่องสำอางค์ ด้านอาหาร และด้านเภสัชกรรม



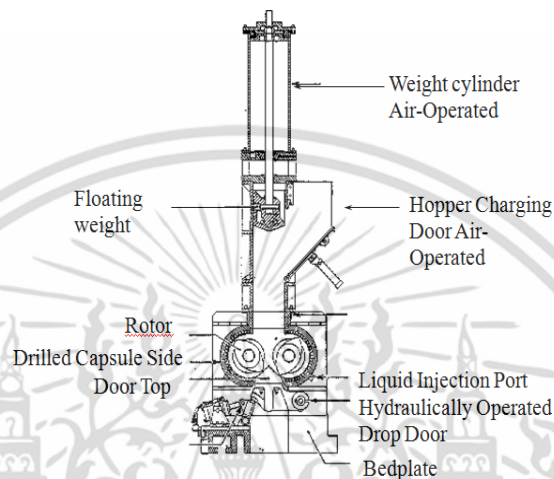
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีเซียมสเตียเรท [42]

2.10 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน

เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) อาศัยหลักการหมุนของโรเตอร์ (Roter) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้ง โดยมีโรเตอร์จำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ โดยใช้ น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองชุดจะหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก โดยเกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม จึงทำให้การกระจายตัวของสารเคมีในพลาสติกเกิดได้ดี น้ำหนักกด ซึ่งใช้ในการเปิดห้องผสมขณะเดินเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

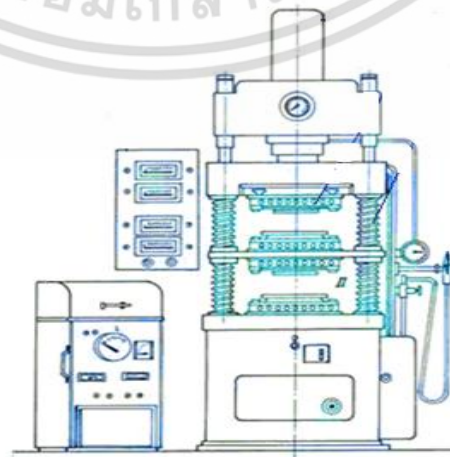
ประตูและระบบบล็อก ใช้ในการเปิดให้คอมปาวด์ออกจากห้องผสม โดยข้อดีของเครื่องผสมแบบปิด คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น สารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน และผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ข้อเสียของเครื่องผสมแบบปิด คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสม และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [43]



รูปที่ 2.11 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [43]

2.11 การอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding)

การอัดขึ้นรูปพลาสติก ใช้เครื่องอัดเข้าที่ไม่มี ความซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอัดเหล็ก (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ด้วยระบบไฮดรอลิก เพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นอัดเหล็ก อีกแผ่นจะยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิดและเปิดเข้าได้ เนื่องจากเข้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิและควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.12 [43-44]



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding) [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในข้อความ

2.12 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

2.12.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้ในการหาน้ำหนักแห้ง สมมูลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ ดังนี้ [45]

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสถานะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้น ร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.12.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไป ทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ [45] โดยเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียวจะมีน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไปมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง

2.12.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ข้อดีของเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ และมีวิธีการใช้งานที่ง่ายและรวดเร็ว [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์ สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรดใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแบ่งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้จุลินทรีย์ย่อยสลายแบ่งจะเกิดรูที่บริเวณพื้นผิวเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด [45]

2.12.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึกโดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) และการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA) การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ในการศึกษาการย่อยสลายแบ่งในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมอนุภาคของขุยมะพร้าว [45]

2.12.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนด ให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้ระยะเวลาประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ [45]

2.12.7 การเลี้ยวเบนของโครงผลึก

เทคนิค X-ray diffraction หรือ XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีหัวใจเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย [19]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 Pachana, K. และคณะ ศึกษาไบโอคอมโพสิท โดยผู้วิจัยสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิล นำมาใช้เสริมแรงใน TPS เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเชิงกลและการต้านทานความร้อนของ TPS ไบโอคอมโพสิทถูกเตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลต่อแป้งเมทริกซ์ เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสปริมาณ 0 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใยเซลลูโลสต่อแป้งเมทริกซ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงสุดเพิ่มขึ้น 305 เปอร์เซ็นต์ และ 556 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ TPS ที่ไม่มีการเสริมแรง เสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการย่อยสลายทางความร้อนของไบโอคอมโพสิทเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนั้นภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงการยึดติดกันอย่างดีระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเซลลูโลส [47]

2.13.2 Prachayawarakorn, J. และคณะ ศึกษาถึงการเตรียมและสมบัติต่างๆ ของพลาสติกย่อยสลายที่เตรียมได้จาก TPS จากแป้งถั่วเขียว (Mung bean starch) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที มีการปรับปรุงสมบัติของ TPS จากแป้งถั่วเขียว โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและ LDPE พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยและ LDPE เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สมบัติเชิงกลของ TPS เพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ LDPE ในอัตราส่วน 2:1 ส่วนสัณฐานวิทยาของ TPS ในแต่ละสูตร เมื่อศึกษาด้วย SEM แสดงให้เห็นว่า เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ TPS สูงขึ้น และพบว่า TPS ที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด [48]

2.13.3 Prachayawarakorn, J. และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของ TPS จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และการเติม LDPE โดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อ LDPE ในอัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า สมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ LDPE ในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดลอง พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ TPS ในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ LDPE ในอัตราส่วน 1:0 ให้ค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำต่ำที่สุด ส่วนสัณฐานวิทยาของ TPS ในแต่ละสูตร เมื่อศึกษาด้วย SEM แสดงให้เห็นว่า เส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีกว่า LDPE และพบว่า TPS ในสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ LDPE ในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด [49]

2.13.4 Guimarães, J.L. และคณะ ศึกษากระบวนการผลิตและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบจากแป้งข้าวโพดที่ใช้เส้นใยกล้วยและเส้นใยอ้อยเป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้กลีเซอรอลทางการค้า (Commercial glycerol) และกลีเซอรินดิบ (Crude glycerin) เป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้กลีเซอรินดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นไบโอดีเซลแทนกลีเซอรอลทางการค้า พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผสมเส้นใยชนิดต่างๆ ในอัตราส่วนของ แป้ง : พลาสติกไซเซอร์ : เส้นใย ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่า แป้งข้าวโพดมีลักษณะผลึกเป็นแบบ A-Type และพบว่า วัสดุประกอบมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่มีอัตราส่วนของเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) ลดลง แต่มอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของเส้นใยสูงสุดไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ การใช้กลีเซอรินดิบเป็นพลาสติกไซเซออร์เปรียบเทียบกับกลีเซอรอล พบว่า สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากกลีเซอรินดิบเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างเส้นใยกับแป้งได้ดี รวมถึงการใช้กระบวนการผลิตแบบควบคุมอัตโนมัติ (Controlled condition) ทำให้สมบัติเชิงกลดีกว่ากลีเซอรอลเกรดการค้า นอกจากนี้เส้นใยต่างชนิดกัน ทำให้สมบัติเชิงกลต่างกัน ซึ่งเส้นใยอ้อยให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยกล้วย จึงสรุปได้ว่า ในการทำวัสดุประกอบจากแป้งข้าวโพดนั้น สามารถใช้กลีเซอรินดิบแทนกลีเซอรอลทางการค้าได้ และให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า รวมทั้งเส้นใยอ้อยให้การเสริมแรงดีกว่าเส้นใยกล้วย ซึ่งไม่ควรใช้อัตราส่วนเส้นใยเกิน 25 เปอร์เซ็นต์ เพื่อที่จะคงความเหนียวของวัสดุไว้และควรเลือกใช้กระบวนการผลิตแบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อให้วัสดุประกอบมีสมบัติที่ดีที่สุด [50]

2.13.5 Zuraida, A. และคณะ ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งสาคุที่มีปริมาณอะไมโลส 25 เปอร์เซ็นต์ และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ในการผสมส่วนผสม ก่อนทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งสาคุได้จากอัตราส่วนของกลีเซอรอล/แป้ง (Glycerol/starch) ได้แก่ 40/60 35/65 และ 30/70 จากการทดลองพบว่า มีค่าความเค้น (Stress) สูงที่สุด เมื่อมีอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อแป้งต่ำ คือ 30/70 ส่วนค่าความหนาแน่นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีค่าตรงข้ามกับอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อแป้งที่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความชื้นและการดูดซับน้ำนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อแป้งที่เพิ่มขึ้น [51]

2.13.6 Curvelo, A.A.S และคณะ ในการวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยเซลลูโลสจากเยื่อคาลิปต์สเป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สามารถเตรียมได้จากแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซออร์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยพอกขาวขนาดสั้น (16%w/w) เส้นใยที่ใส่ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์และมอดูลัสเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่เสริมแรง ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมด้วยกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Tg น้อยกว่าคอมโพสิตที่ผสมเส้นใย 16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ TGA ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เกิดการหายไปของน้ำหนัก TPS และคอมโพสิตเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การดูดซับน้ำของ TPS ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสดูดน้ำได้น้อยกว่าแป้ง ส่วนการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซออร์นั้น ส่งผลให้ TPS มีความว่องไวต่อน้ำมากขึ้น การแตกหักของพื้นผิวด้วยวิธีการส่อง SEM แสดงให้เห็นถึงการติดแน่นที่ติระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ [52]

2.13.7 Prachayawarakorn, J. และคณะ งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยการเสริมแรงโดยเส้นใยเซลลูโลสสองชนิด ได้แก่ เส้นใยปอกระเจา (Jute fibers) และเส้นใยนุ่น (Kapok fibers) โดยการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ในอัตราส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล 65 : 35 จากนั้นนำไปผสมในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยุ่นที่ 0 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อมีการเติมเส้นใยเซลลูโลส วัสดุประกอบทั้งสองชนิด มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกัน และพบพันธะไฮโดรเจนใหม่เกิดขึ้น มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยพิจารณาได้จาก ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) ที่สูงขึ้น รวมถึงค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load) ที่ลดลง แต่ TPCS ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสที่สูงกว่า TPCS ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจา เพราะเส้นใยุ่นมีความหนาแน่นต่ำกว่าเส้นใยปอกระเจา จึงสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีกว่า ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาและพบว่าเมทริกซ์ของแป้งและเส้นใยทั้งสองชนิดมีการยึดเกาะที่ดี นอกจากนี้ วัสดุประกอบที่ได้มีการดูดซับน้ำลดลง โดยเส้นใยุ่นสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าเส้นใยปอกระเจา เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบช่องโพรง และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของเมทริกซ์ TPCS มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมเส้นใยทั้งสองชนิด โดยอุณหภูมิการสลายตัวของเมทริกซ์ TPCS นั้นไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีการใช้เส้นใยปอกระเจา แต่กลับมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการใช้เส้นใยุ่น [8]

2.13.8 Savadkar, N.R. และคณะ การศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลส (TPS/NCF) ที่ 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยเส้นใยนาโนเซลลูโลสสังเคราะห์ได้จากฝ้ายเส้นใยสั้นที่ผ่านกระบวนการทางเคมีและเชิงกล และฟิล์ม TPS/NCF เตรียมได้จากวิธี Solution casting จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า เมื่อใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสปริมาณน้อย สามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มได้ โดยฟิล์มที่ใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลส 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น 46.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลส 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำและอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนลดลงด้วย [53]

2.13.9 Gironès, J. และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal strands) และใยป่าน (Hemp strands) โดยใช้กีสเซอร์อลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เตรียมขึ้นงานผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์หรือใยป่านทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูงขึ้น ความแข็ง (Stiffness) ของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แสดงได้จากมอดุลัสสะสม (Storage modulus) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) และทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งแบบ Vh ลดลง นอกจากนี้มีการเพิ่มน้ำยางเข้มข้น (Latex) เป็นพลาสติกไซเซอร์ในคอมโพสิต ช่วยลดจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำ (Water absorption kinetics) ซึ่งการเพิ่มน้ำยางเข้มข้น ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุ [54]

2.13.10 Ramírez, M.G.L. และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับคอมโพสิตของแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ 5 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ในการศึกษา XRD พบการเพิ่มขึ้นของผลึกในวัสดุประกอบเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย ส่วนการศึกษาสมบัติทางความร้อนผ่าน TGA / DTA แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย ในขณะที่ DMTA แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของมอดุลัสสะสม อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงขึ้น และมีการหน่วง (Damping) ที่ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เนื่องจากเส้นใยและเมทริกซ์ของแข็งมีการยึดเกาะกันที่ดี [55]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ตรา ปลามังกร ห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั่น

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [25]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	0.3
ไขมัน	1.1
ความชื้น	0.5
ซีเถ้า	0.2
คาร์โบไฮเดรต	85.0
-อะไมโลส	16.4
-อะไมโลเพกทิน	83.6

3.1.2 แป้งข้าวเหนียว (Waxy rice starch) ชนิดไม่น้ำตาลพิเศษ ตราเหรียญทองก้าวหน้า บริษัท เส้นไหมเหรียญทอง จำกัด

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว [29]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	1.6
ไขมัน	6.6
ความชื้น	4.0
ซีเถ้า	8.8
คาร์โบไฮเดรต	82.7
-อะไมโลส	1.0
-อะไมโลเพกทิน	99.0

3.1.3 ขุยมะพร้าว จากอำเภอมะนัง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

3.1.4 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3.1.5 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) จากบริษัท รวมเคมี

3.1.6 น้ำมันซิลิโคน จาก Dow Corning Corporation

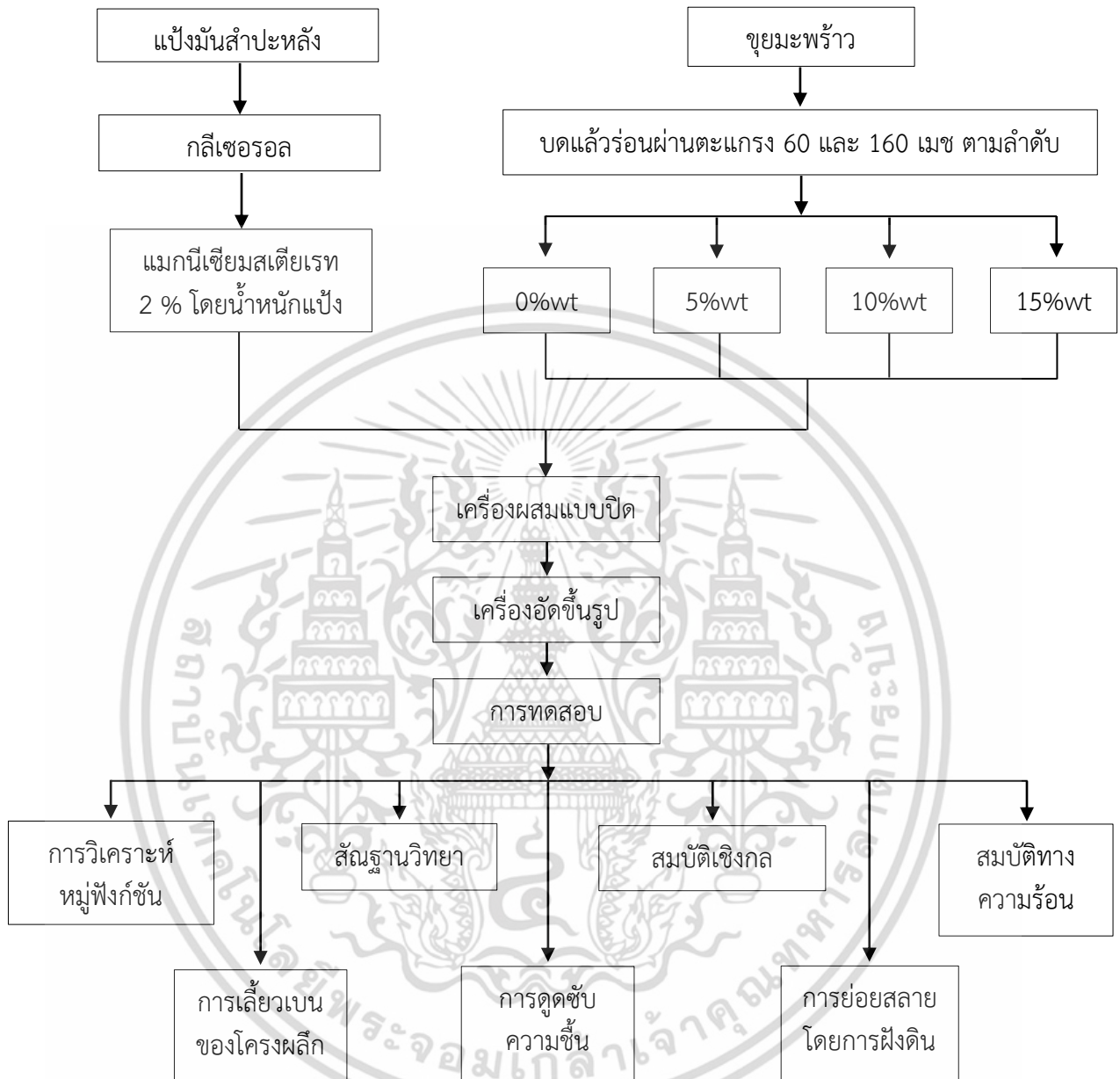
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) : BRABENDER รุ่น PL 2000/PL 2001
- 3.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) : Model MGLP-20AT M/C NO.228
- 3.2.3 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K
- 3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) : FEI รุ่น QUANTA 250
- 3.2.5 เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FT-IR spectrum GX
- 3.2.7 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (X-ray diffractometer, XRD) : Bruker รุ่น D8 Advance
- 3.2.8 เครื่องบดละเอียด (Grinder) : Retsch ZM 100
- 3.2.9 เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
- 3.2.10 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ : CEAST 6052
- 3.2.11 เครื่องปั้นเนกประสงค์ : SHARP รุ่น EM-44A
- 3.2.12 ตู้อบ
- 3.2.13 ตะแกรงแยกขนาด 60 และ 160 เมช
- 3.2.14 แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
- 3.2.15 ถังมือกันความร้อน
- 3.2.16 แผ่นใสถ่ายเอกสาร
- 3.2.17 เกรียง
- 3.2.18 ถาด
- 3.2.19 กรรไกร
- 3.2.20 กล้องปิดสนิท

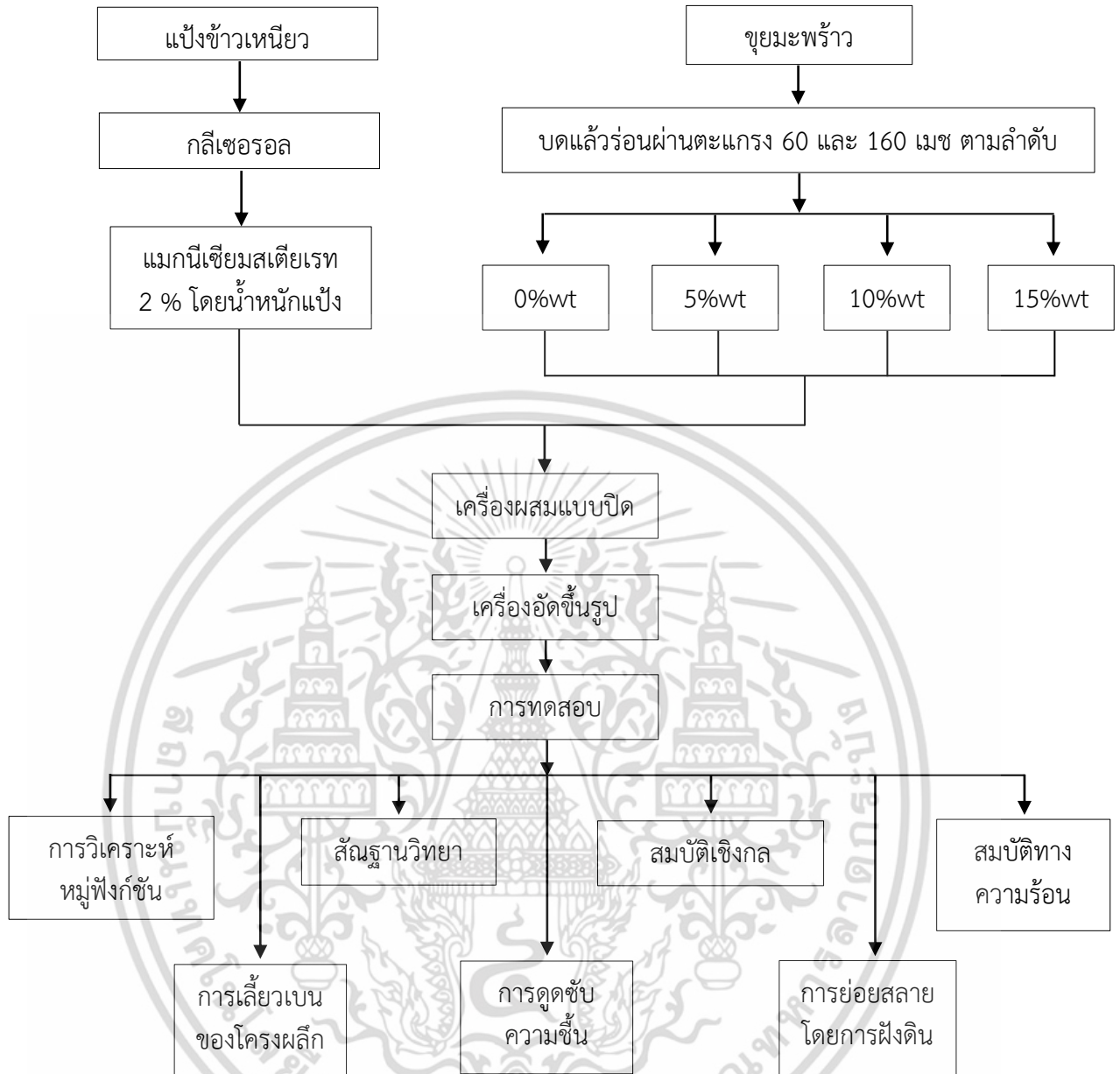
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการดำเนินงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.1-3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานของน้ำมันสำหรับหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงานของแบ่งข้าวเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมอนุภาคของขุยมะพร้าว

- 3.3.1.1 นำขุยมะพร้าวมาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3.3.1.2 นำขุยมะพร้าวที่อบแห้งแล้วมาทำให้มีขนาดเล็กกลงด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์
- 3.3.1.3 นำขุยมะพร้าวมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Grinder) แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ก่อน และร่อนอีกครั้งด้วยตะแกรงขนาด 160 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคในช่วง 0.08-0.25 มิลลิเมตร
- 3.3.1.4 นำอนุภาคของขุยมะพร้าวที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงแล้ว มาใส่ถุงซิปล็อคเตรียมทำการผสมต่อไป

ตอนที่ 2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้ง (แป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว)

- 3.3.2.1 นำแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวมาหมักกับกลีเซอรอล เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในเนื้อแป้งเป็นเวลา 1 คืน โดยใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว 65 และกลีเซอรอล 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
- 3.3.2.2 นำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาชั่ง 50 กรัม แล้วนำมาผสมกับแมกนีเซียมสเตียเรท ซึ่งใช้ 2 % โดยน้ำหนักของแป้ง นำมาทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้ง (แป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว)

- 3.3.3.1 ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์ แล้วทาน้ำมันซิลิโคนลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแล้วประกบด้วยแผ่นใส
- 3.3.3.2 วางเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงบนแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (150 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็น 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi
- 3.3.3.3 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว

ทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาบิล โดยการผสมอนุภาคของขุยมะพร้าวที่ ปริมาณต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของ ขุยมะพร้าว

ชนิดแป้ง	ปริมาณ (กรัม)			
	แป้ง	กลีเซอรอล	อนุภาคของขุยมะพร้าว	แมกนีเซียมสเตียเรท
แป้งมันสำปะหลัง	65	35	0	2.0
	65	35	5.0	2.0
	65	35	10.0	2.0
	65	35	15.0	2.0
แป้งข้าวเหนียว	65	35	0	2.0
	65	35	5.0	2.0
	65	35	10.0	2.0
	65	35	15.0	2.0

3.3.4.1 นำเทอร์โมพลาสติกสตาบิลแต่ละสูตรผสม ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.4.2 นำเทอร์โมพลาสติกสตาบิลแต่ละสูตร ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นหล่อเย็น 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi

3.3.4.3 นำเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตอนที่ 5 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.5.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างไปให้ความร้อนจน อ่อนตัวกระทั่งเป็นฟิล์มบาง แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับ โปแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจาก แม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กัน โดยกำหนดขอบเขตของการหาพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก (A_c) ที่มุม 2θ เท่ากับ 10-30 องศา และกำหนดขอบเขตของการหาพื้นที่ทั้งหมด ที่มุม 2θ เท่ากับ 5-60 องศา เพื่อระบุวิวัฒนาการองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่ความหนา 200 ไมโครเมตรและขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 5-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที โดยใช้ $\text{Cu K}\alpha$ แล้วปล่อยรังสีเอ็กซ์เข้าชิ้นตัวอย่าง โดยใช้ Step time 5 นาที เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ	X_{cry}	คือ	เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึก
	A_c	คือ	พื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก
	A_a	คือ	พื้นที่ส่วนที่เป็นอสัณฐาน

3.3.5.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาถึงภาคตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่างๆ เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคขุยมะพร้าวในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทั้งสองชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว และรอยต่อระหว่างวิภาคในตัวอย่างผสมและนำอนุภาคของขุยมะพร้าวมาหาค่า Aspect ratio (L/D ratio)

3.3.5.4 การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทดสอบชิ้นงานแห้งจำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จดน้ำหนัก จากนั้นนำไปเก็บในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 14 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ วัน ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ	M_t	คือ	เปอร์เซ็นต์ความชื้น
	W_d	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ
	W_w	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึงสูงสุด (Maximum load)	ASTM D 638	N
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Elongation at maximum load)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบดังสถานะ ดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 1 kN

ค่าความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ค่าความเค้น (Stress) = F/A

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

เปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Strain) = $[(L-L_0)/L_0] \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.3.5.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ชิ้น ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-14 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

3.3.5.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% Weight loss at maximum) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

degradation rate) ของตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก-แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้ว จึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (Thermoplastic waxy rice starch, TPWRS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0 5 10 และ 15 % เป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติการเลี้ยวเบนของโครงผลึก สัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน โดยรายละเอียดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และองค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คำย่อและสัญลักษณ์แทนสูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากการทดลองมีดังนี้

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
TPCS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง
TPWRS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว
CS	แป้งมันสำปะหลัง
WRS	แป้งข้าวเหนียว
CC	อนุภาคของขุยมะพร้าว
TPCS/0%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว
TPCS/5%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 5 % โดยน้ำหนัก
TPCS/10%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 10 % โดยน้ำหนัก
TPCS/15%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 15 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/0%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ของขุยมะพร้าว
TPWRS/5%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 5 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/10%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 10 % โดยน้ำหนัก
TPWRS/15%CC	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว 15 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [25] และแป้งข้าวเหนียว [29]

องค์ประกอบ (ร้อยละ) / ชนิดของแป้ง	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเหนียว
ความชื้น	0.5	4.0
คาร์โบไฮเดรต	85.0	82.7
- อะไมโลส	16.4	1.0
- อะไมโลเพกทิน	83.6	99.0
โปรตีน	0.3	1.6
ไขมัน	1.1	6.6
เถ้า	0.2	8.8
อื่นๆ	0.6	0.8

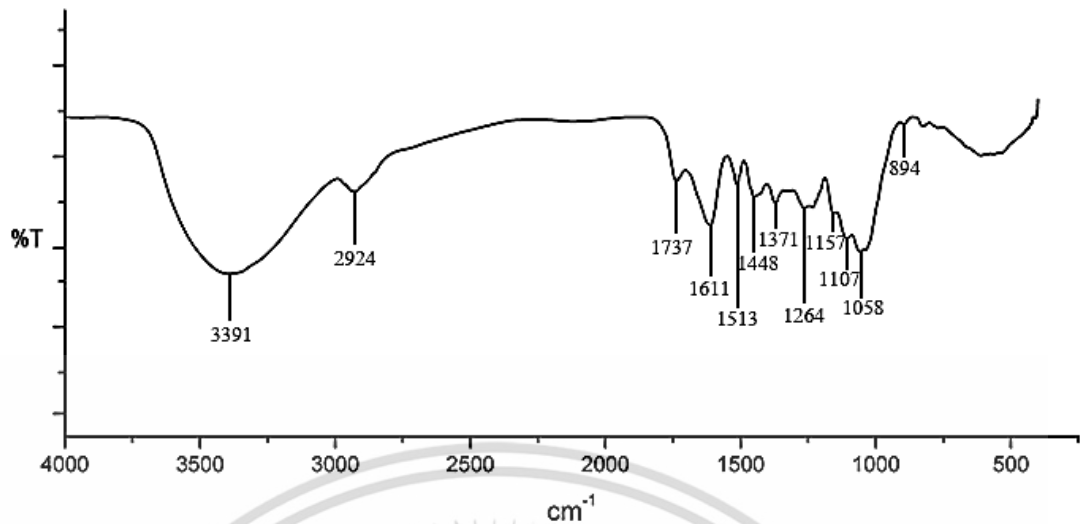
ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวในแต่ละสูตรให้ผลการทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

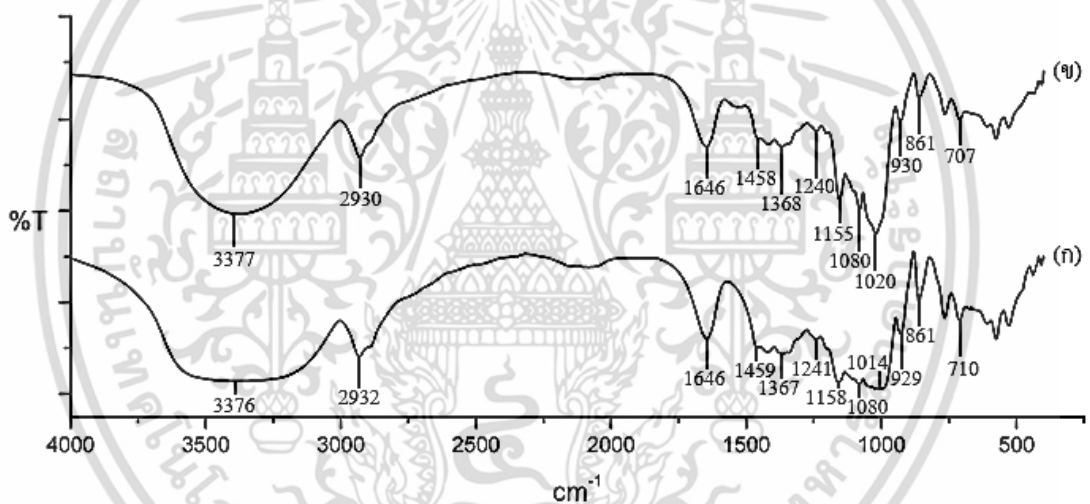
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว อนุภาคของขุยมะพร้าวและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

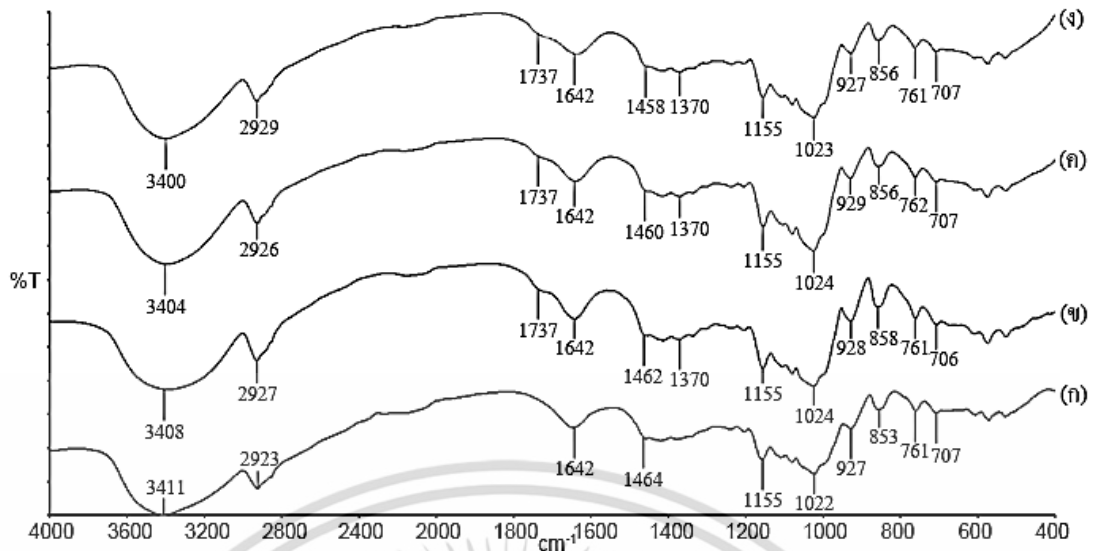


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของอนุภาคของขุยมะพร้าว

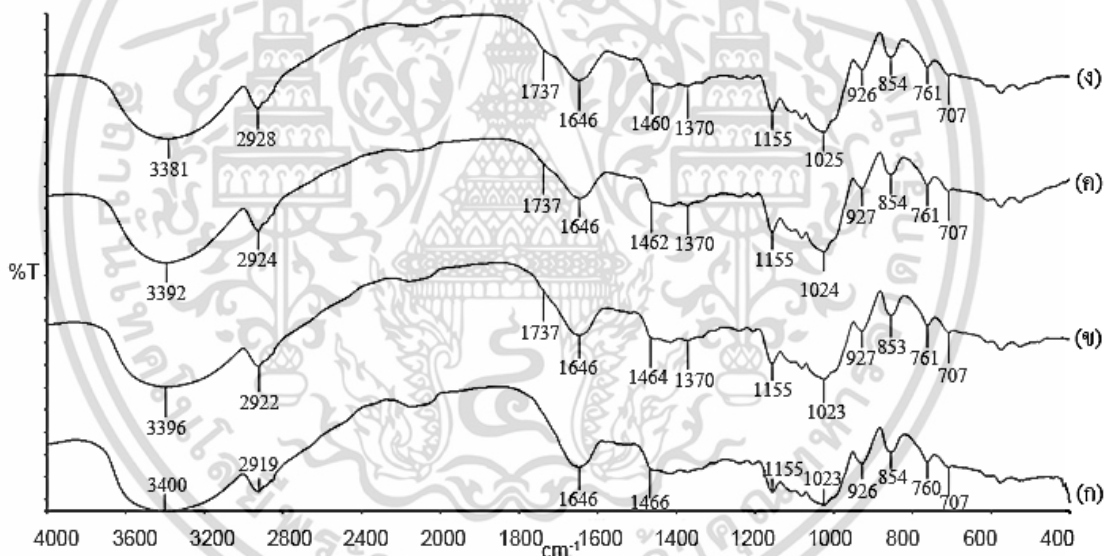


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) แป้งมันสำปะหลัง และ (ข) แป้งข้าวเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก
แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน
(ก) 0 (ข) 5 (ค) 10 และ (ง) 15 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก
แป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน
(ก) 0 (ข) 5 (ค) 10 และ (ง) 15 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของอนุภาคของขุยมะพร้าว ซึ่งองค์ประกอบหลักภายในอนุภาคขุยมะพร้าวนั้นมีทั้งเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พิคในช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง และยังพบพิก 1737 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของลิกนิน พิคที่ 1611 และ 1513 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=C stretching ของโครงสร้างอะโรมาติกจากลิกนิน และพิกที่ 1448 cm^{-1} เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending ของ CH_2 ของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ส่วนพีกที่ 1371 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending ของ CH_3 ของลิกนิน แถบพีกช่วง $1300-1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching และพีกในช่วง $1200-1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending [55-56]

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวตามลำดับ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีหน่วยย่อยเป็นกลูโคสที่เหมือนกัน กล่าวคือ พบอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ที่เป็นองค์ประกอบหลักของแป้ง โดยในแป้งธรรมชาติจะมีอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะพีกกว้างมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและคอมโพสิทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อันเป็นผลมาจากโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์และพันธะไฮโดรอกซิลที่เกิดจากการรวมตัวกันของน้ำ อีกทั้งยัง พบพีกในช่วง $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของแป้ง พบพีก 1646 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในแป้ง ซึ่งเป็นไปตามสมบัติการดูดซับน้ำของแป้ง โดยแป้งตามธรรมชาติจะให้ลักษณะสัญญาณความถี่ชัดเจนน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับความกว้างพีกช่วง $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ส่วนพีกที่ 1459 cm^{-1} ของแป้งมันสำปะหลัง และพีกที่ 1458 cm^{-1} ของแป้งข้าวเหนียว เป็นการสั่นแบบ O-H bending ของแป้ง และพีกในช่วง $1200-1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending [56]

จากรูปที่ 4.3-4.4 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากทุกสูตรมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีกลูโคสเป็นหน่วยย่อยเช่นเดียวกัน กล่าวคือ พบอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ประกอบด้วยแป้งและกลีเซอรอล พบพีกช่วง $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของ TPS อีกทั้งพบพีก 1642 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และพีก 1646 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในแป้ง พบพีกที่ประมาณ 1464 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และพีกที่ประมาณ 1466 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของแป้ง พบแถบพีกช่วง $1300-1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง และอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $1200-1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [56]

สำหรับการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว รูปที่ 4.3-4.4 (ก) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว รูปที่ 4.3-4.4 (ข)-(ง) พบว่า การเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้เลขคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ และ 1464 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และพีก 1466 cm^{-1} ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

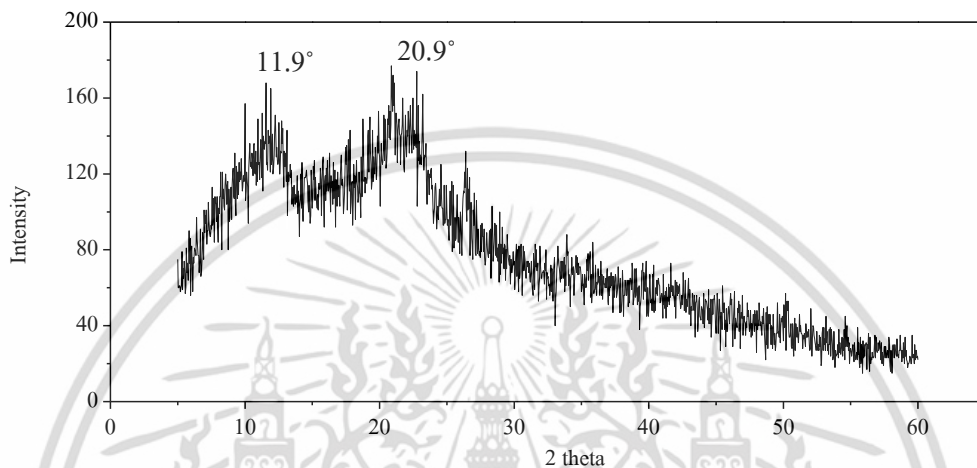
แป้งข้าวเหนียว มีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงตามปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาทางเคมี (พันธะไฮโดรเจน) ขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของแป้ง กลิเซอรอล และอนุภาคของขุยมะพร้าว เพราะเป็นองค์ประกอบที่มีความเข้ากันได้ นอกจากนี้ยังพบอินฟราเรดสเปกตรัมที่ 1737 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C=O stretching (ของลิกนิน) ซึ่งเป็นพีคที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบภายในอนุภาคของขุยมะพร้าว [55]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

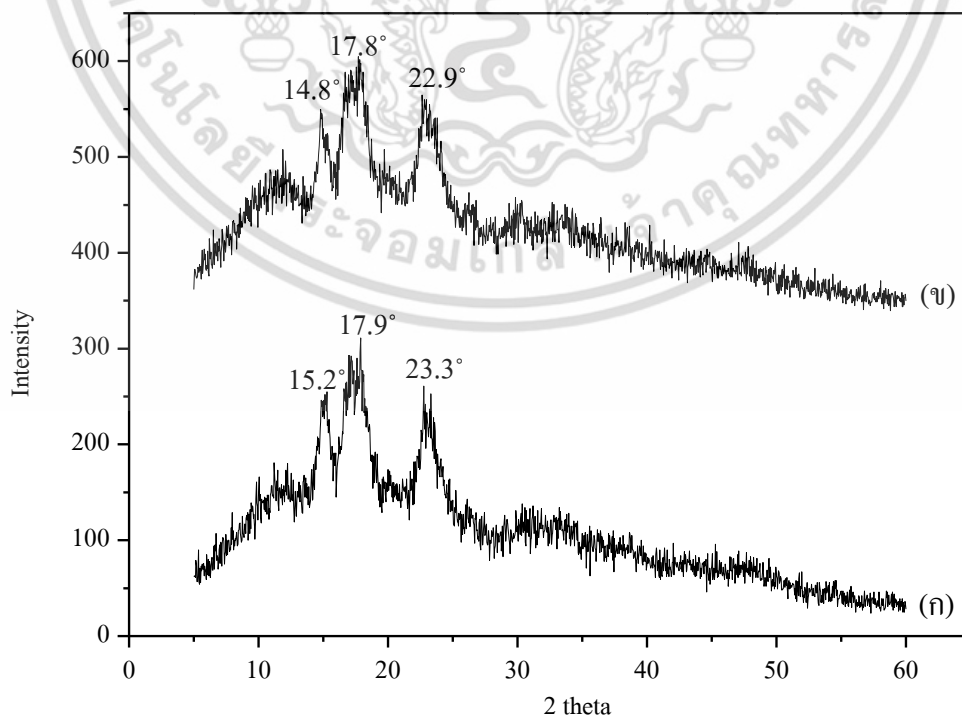
4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ขนาดของมุมตกกระทบในช่วง $5-60^{\circ}$ ด้วยอัตราเร็ว $1^{\circ}/\text{นาที}$ ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของอนุภาคขุยมะพร้าว

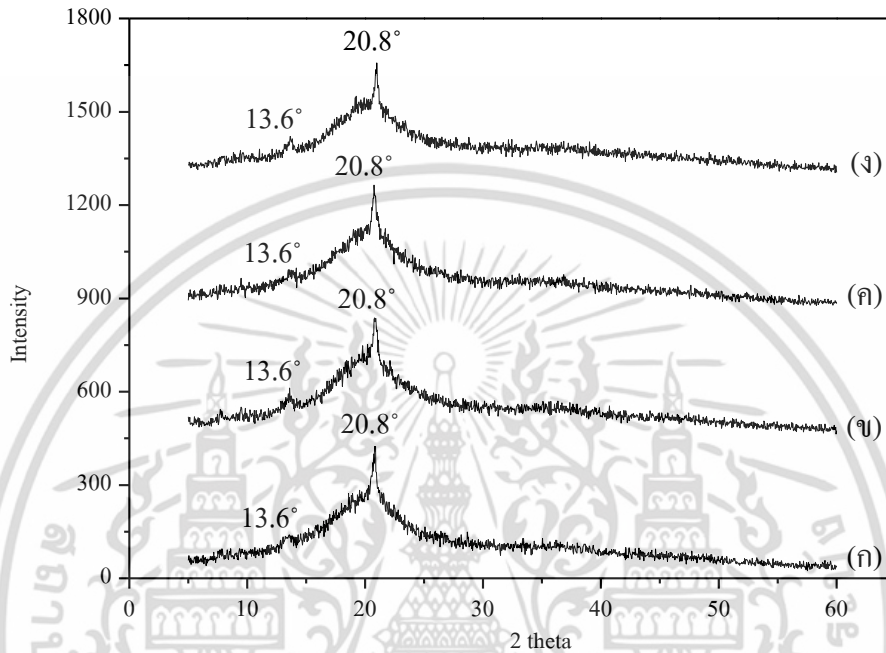
จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคขุยมะพร้าว พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 11.9° และ 20.9° ซึ่งแสดงโครงสร้างแบบ cellulose I [57]



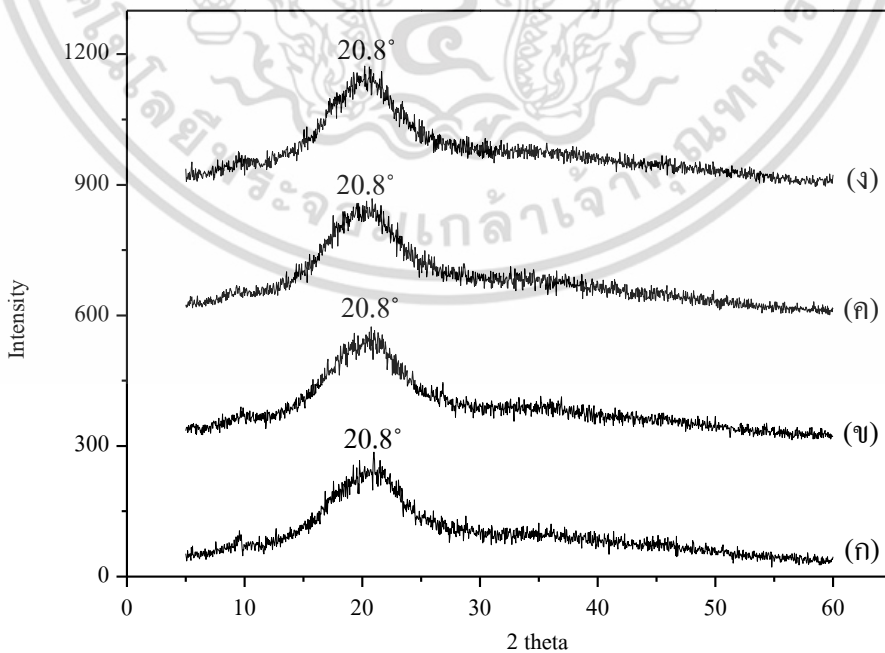
รูปที่ 4.6 ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) แป้งมันสำปะหลัง และ (ข) แป้งข้าวเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลัง (CS) และ แป้งข้าวเหนียว (WRS) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลัง มีโครงสร้างผลึกแบบ A-type ที่พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 15.2° 17.9° และ 23.3° ตามลำดับ ส่วนโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเหนียว ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากธัญพืช ที่มีอะไมโลเพกทินสูง มีโครงสร้างผลึกแบบ A-type ที่พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 14.8° 17.8° และ 22.9° ตามลำดับ [10]



รูปที่ 4.7 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPCS/0%CC (ข) TPCS/5%CC (ค) TPCS/10%CC และ (ง) TPCS/15%CC



รูปที่ 4.8 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPWRS/0%CC (ข) TPWRS/5%CC

(ค) TPWRS/10%CC และ (ง) TPWRS/15%CC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7-4.8 (ก)-(ง) แสดงโครงสร้างผลึกของตัวอย่างผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จาก TPCS/0%CC, TPCS/5%CC, TPCS/10%CC, TPCS/15%CC, TPWRS/0%CC, TPWRS/5%CC, TPWRS/10%CC และ TPWRS/15%CC พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมที่ได้จากแป้งแต่ละชนิดในทุกอัตราส่วน มีโครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง พบพีคของผลึกที่มุม 2θ เท่ากับ 13.6° และ 20.8° และรูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว พบพีคของผลึกที่มุม 2θ เท่ากับ 20.8° โดยพีคที่ทำมุม 20.8° มาจากองค์ประกอบของ TPS ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ V-type ทั้งหมด ซึ่งเกิดจากการนำแป้งมาเติมกลีเซอรอล ซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์และผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน เพื่อให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลายและมีลักษณะของผลึกเป็นแบบ V-type [19] ส่วนพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 20.9° มาจากองค์ประกอบของขุยมะพร้าว โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคขุยมะพร้าวมากขึ้นในแป้งแต่ละชนิด ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีคของแป้งและพีคของอนุภาคขุยมะพร้าว มีผลทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคขุยมะพร้าว

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
CS	39.97
WRS	38.75
CC	59.57
TPCS/0%CC	38.82
TPCS/5%CC	40.32
TPCS/10%CC	41.87
TPCS/15%CC	42.90
TPWRS/0%CC	38.21
TPWRS/5%CC	39.41
TPWRS/10%CC	39.82
TPWRS/15%CC	42.72

จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของขุยมะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกมากกว่าแป้ง และเซลลูโลสยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ชนิดของแป้ง พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ มีปริมาณผลึกมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสมากกว่าอะไมโลเพกทิน และแป้งข้าวเหนียวไม่ผ่านการฉีก ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีปริมาณอะไมโลเพกทินมากกว่าอะไมโลส โดยอะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีกิ่งก้านอยู่บ้าง แต่ไม่มาก ส่วนอะไมโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ทำให้อะไมโลสมีความเป็นผลึกมากกว่า อะไมโลเพกทิน

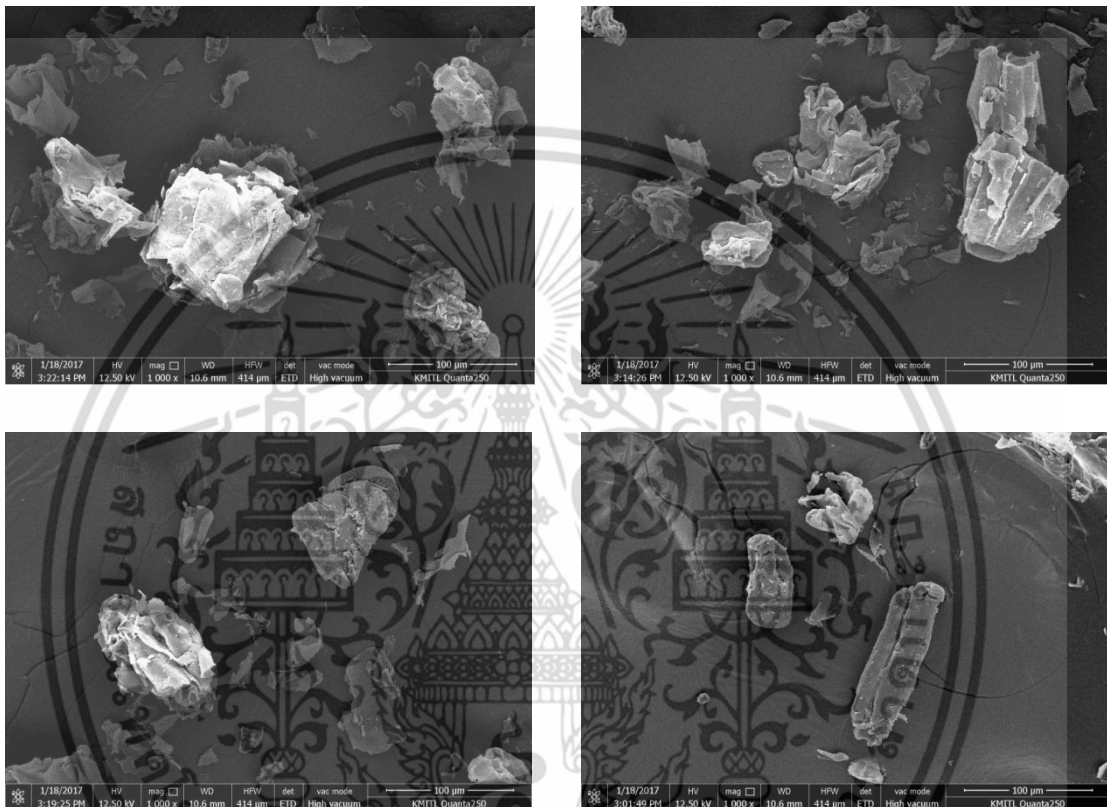
เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของ ขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า TPCS/15%CC มีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ TPCS/10%CC TPWRS/15%CC TPCS/5%CC TPWRS/10%CC TPWRS/5%CC TPCS/0%CC และ TPWRS/0%CC ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

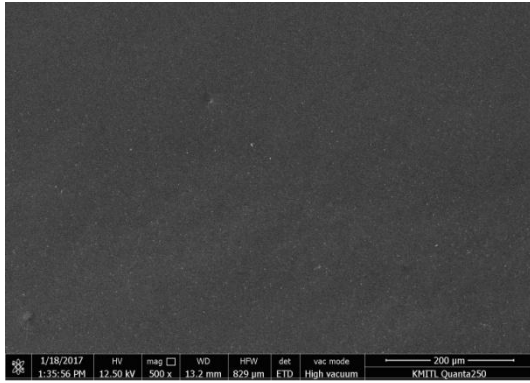
การทดสอบสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัว และความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองเป็นดังนี้



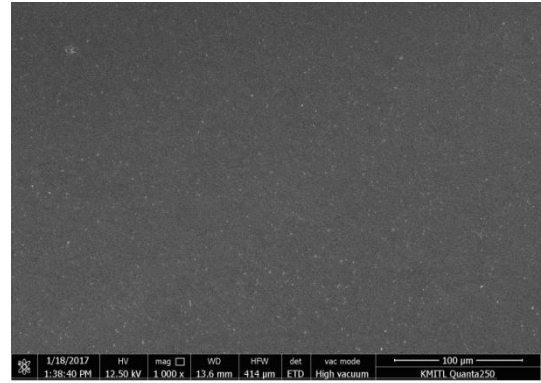
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคขุยมะพร้าวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคขุยมะพร้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า พบว่า อนุภาคของขุยมะพร้าวมีลักษณะเป็นก้อนคล้ายทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ สลับกับเส้นใยเล็กน้อย มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 96.30 ไมโครเมตร มีความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 57.24 ไมโครเมตร และสามารถคำนวณค่า Aspect ratio (L/D ratio) ได้เท่ากับ 1.93 ± 0.85 ไมโครเมตร (ภาคผนวก ก)

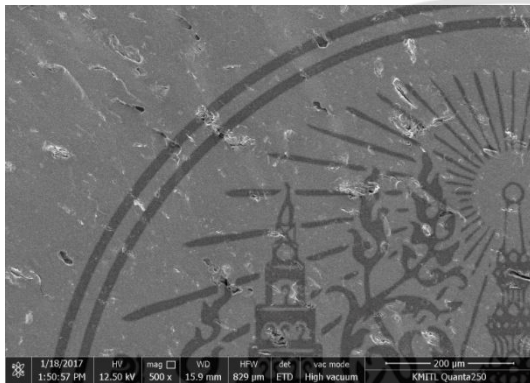
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



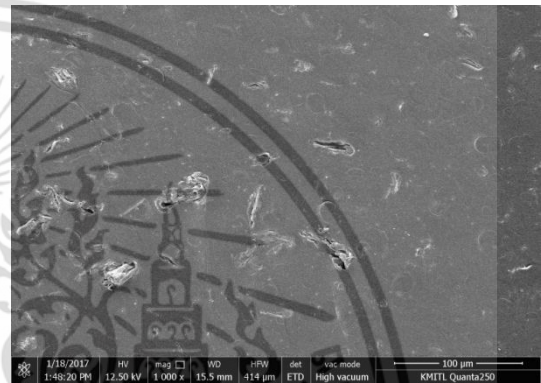
(ก) TPCS/0%CC, 500X



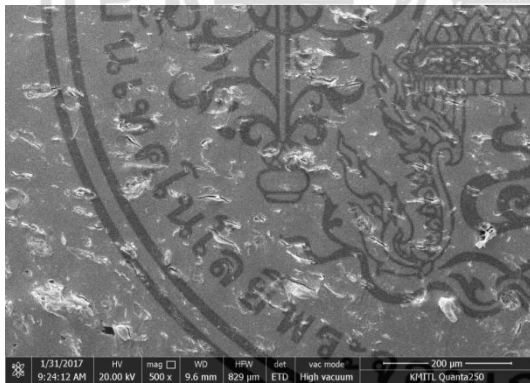
(ข) TPCS/0%CC, 1000X



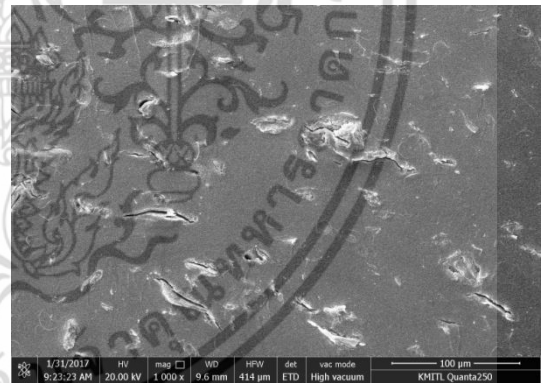
(ค) TPCS/5%CC, 500X



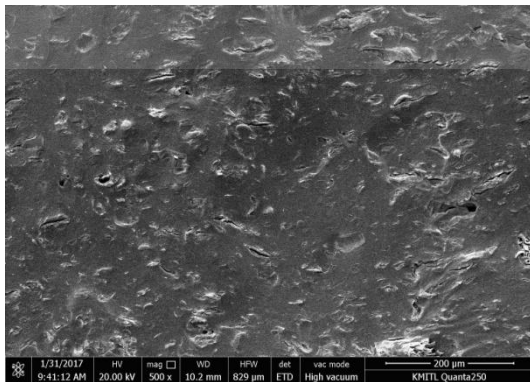
(ง) TPCS/5%CC, 1000X



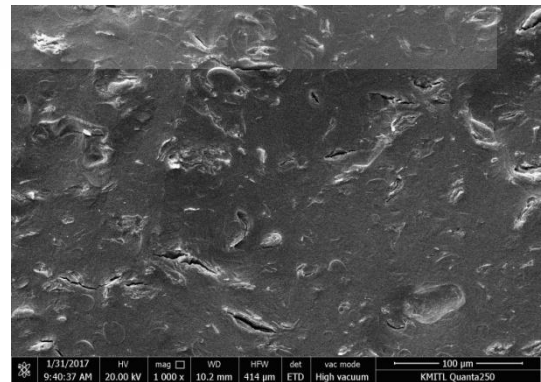
(จ) TPCS/10%CC, 500X



(ฉ) TPCS/10%CC, 1000X

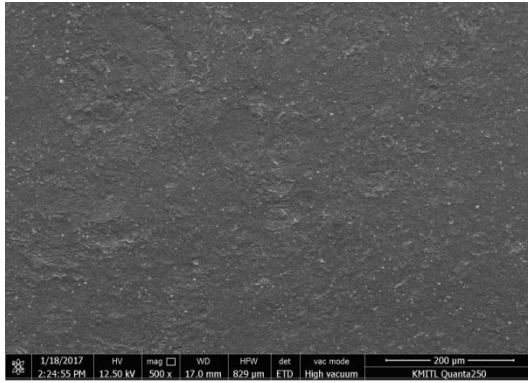


(ช) TPCS/15%CC, 500X

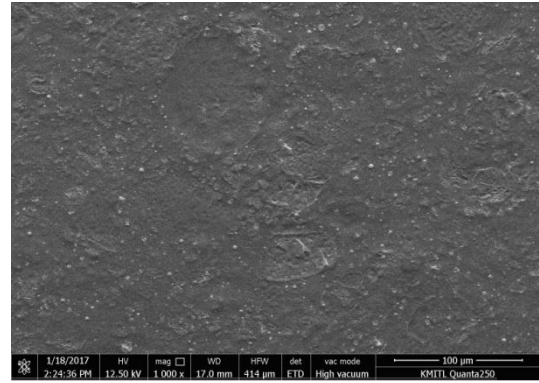


(ซ) TPCS/15%CC, 1000X

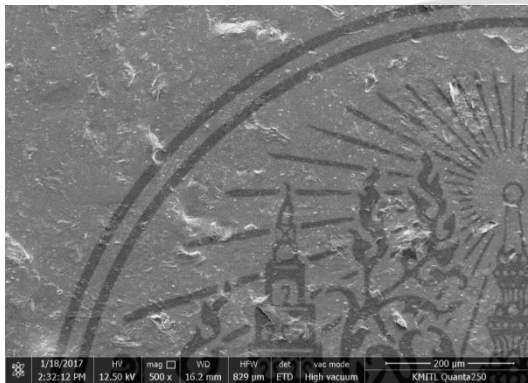
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



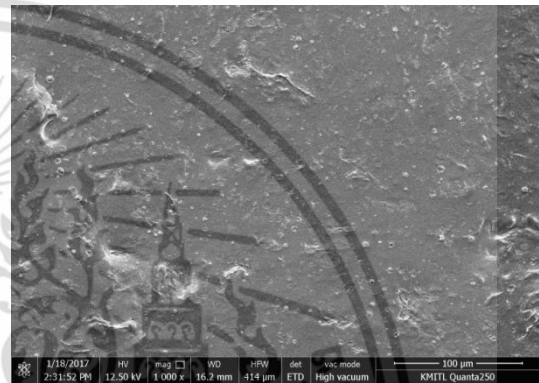
(ณ) TPWRS/0%CC, 500X



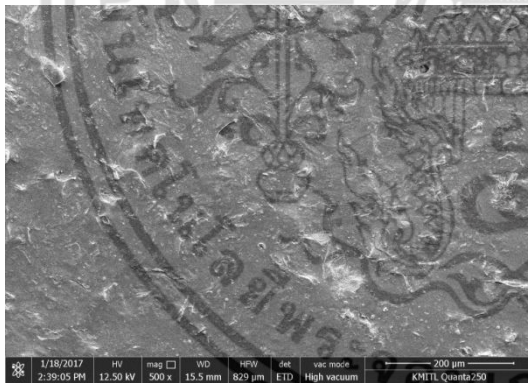
(ญ) TPWRS/0%CC, 1000X



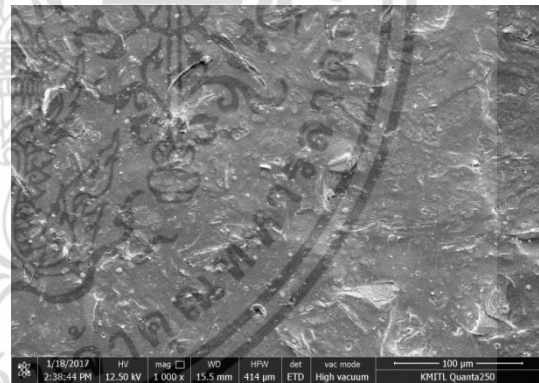
(ฎ) TPWRS/5%CC, 500X



(ฏ) TPWRS/5%CC, 1000X

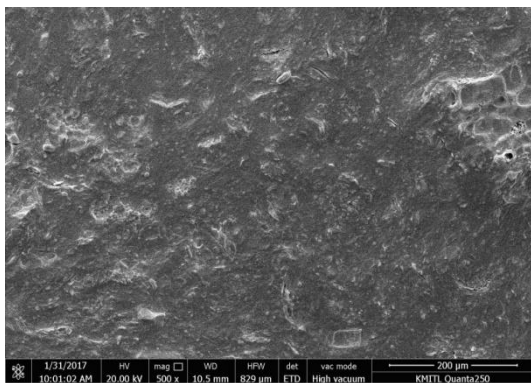


(ฑ) TPWRS/10%CC, 500X

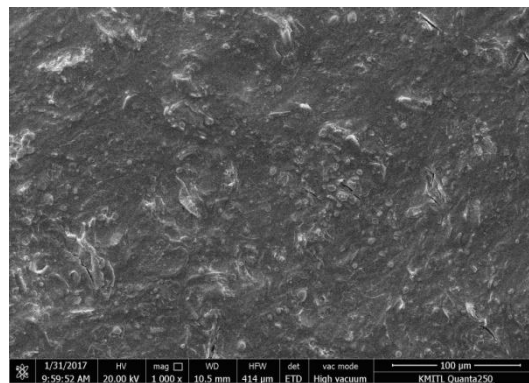


(ฒ) TPWRS/10%CC, 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) TPWRS/15%CC, 500X



(ค) TPWRS/15%CC, 1000X

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของชুমะพร้าว (CC) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายภาพ 500 และ 1000 เท่าตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 (ก)-(ค) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของชুমะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักที่กำลังขยายภาพ 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเรชมีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน โดยเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลัง มีลักษณะพื้นผิวเรียบมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเส้นเป็นมัน [5] จึงเกิดการหลอมไหลได้ดีกว่า แป้งข้าวเหนียวที่มีความเหนียวหนืดมากกว่า [6] และในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคของชুমะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมีความคล้ายคลึงกัน คือ อนุภาคของชুমะพร้าวไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช แต่มีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชทั่วทุกพื้นผิวแบบสุ่ม ไม่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพียงบริเวณใดบริเวณหนึ่ง อีกทั้งไม่พบรอยต่อระหว่างวิภาคของทั้งสององค์ประกอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์และอนุภาคของชুমะพร้าว เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นพอลิแซคคาไรด์คล้ายคลึงกัน มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ และมีความเป็นขั้วเหมือนกัน นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นช่องโพรงขนาดเล็ก อันเนื่องมาจากลักษณะเฉพาะของอนุภาคของชুমะพร้าวที่มีท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายท่อน้ำรูปร่างยาว [58] เมื่อพิจารณาถึงผลของการเพิ่มปริมาณอนุภาคของชুমะพร้าว พบว่า ให้สัณฐานวิทยาที่คล้ายคลึงกันกล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคของชুমะพร้าว ทำให้คอมโพสิตที่ได้มีลักษณะพื้นผิวเหมือนเดิมเพียงแต่มีปริมาณของอนุภาคชুমะพร้าวกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น


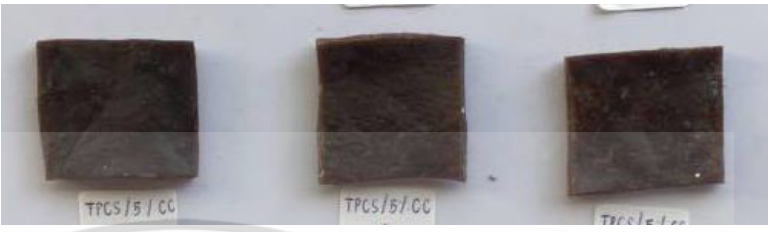



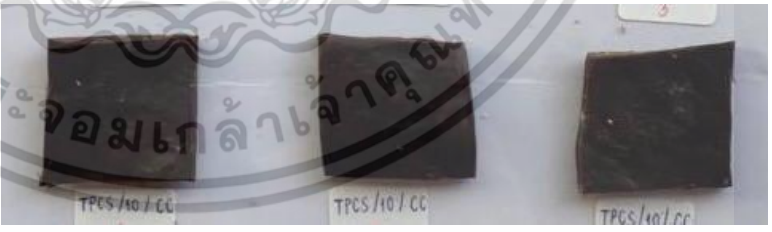

4.4 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

การทดสอบการดูดซับความชื้น เพื่อทำการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก โดยการนำไปเก็บในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่นความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 % ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 14 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองเป็นดังนี้





ตารางที่ 4.4 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 %

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPCS/0%CC	1	
	7	
	10	
	14	
TPCS/5%CC	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

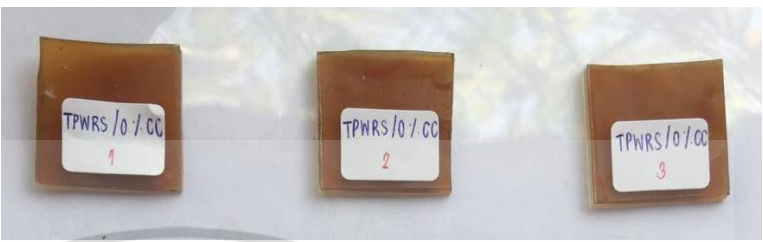
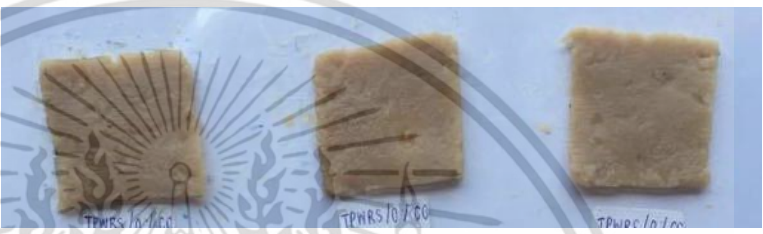




	7	
	10	
	14	
TPCS/10%CC	1	
	7	
	10	
	14	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPCS/15%CC	1	
	7	
	10	
	14	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

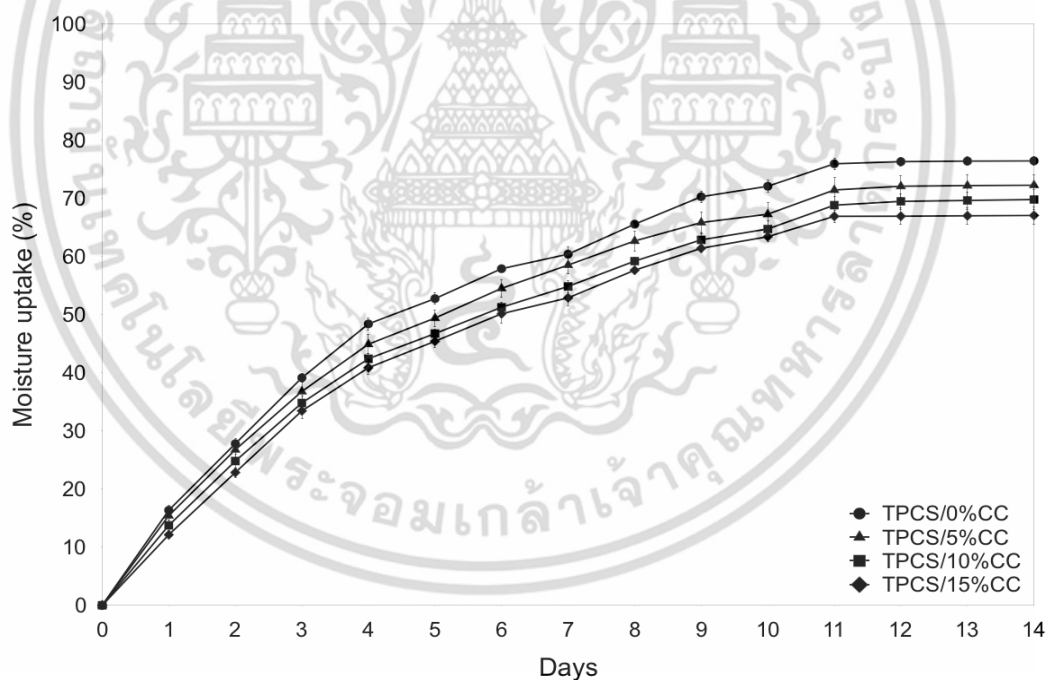
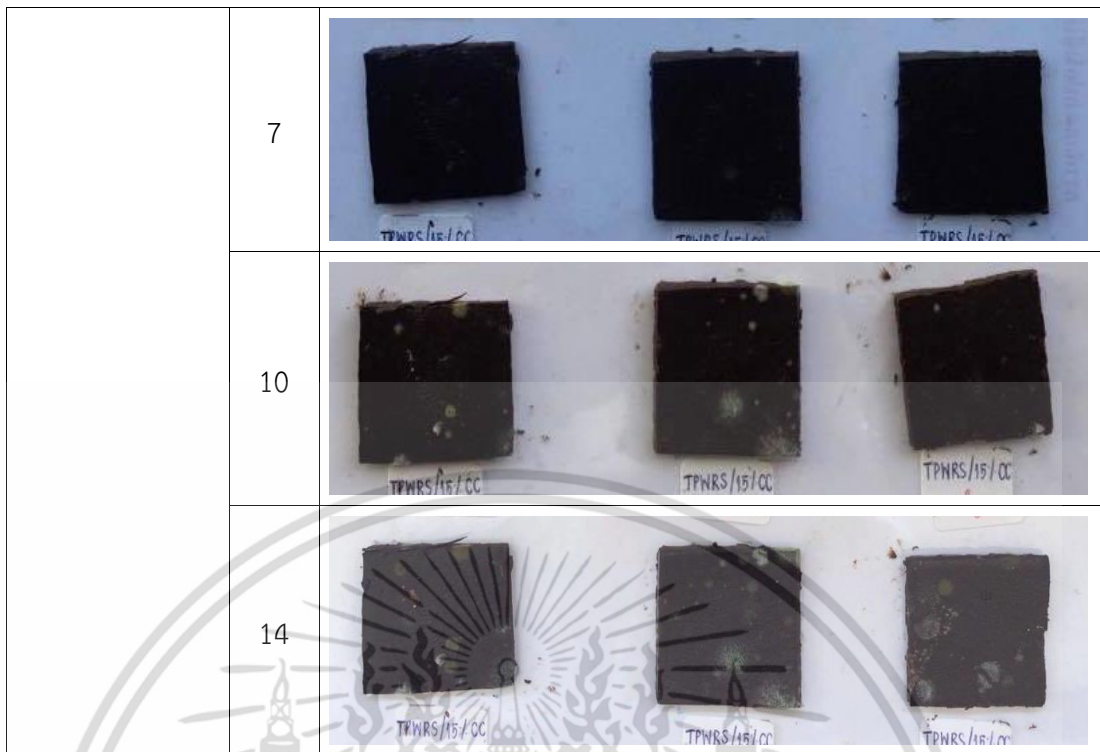
ตารางที่ 4.5 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 %

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPWRS/0%CC	1	
	7	
	10	
	14	
TPWRS/5%CC	1	
	7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

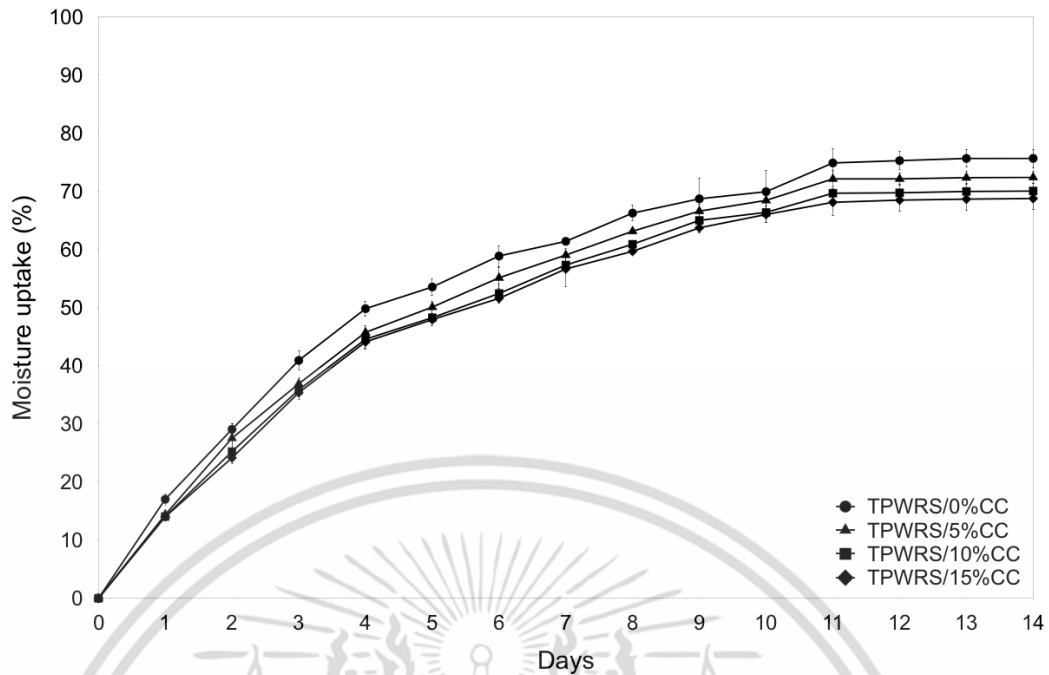
	10	
	14	
	1	
TPWRS/10%CC	7	
	10	
	14	
TPWRS/15%CC	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

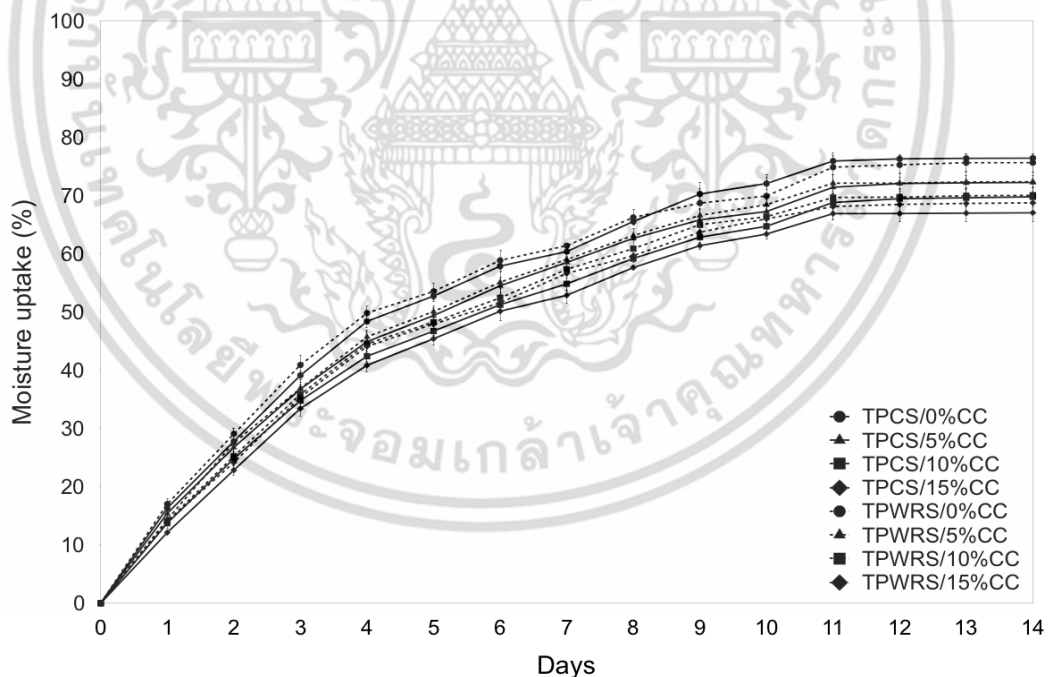


รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (TPWRS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 % ในวันที่ 7 และ 14

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูตรต่างๆ (%)		
สูตร	วันที่	
	7	14
TPCS/0%CC	59.47±1.28	76.40±0.85
TPCS/5%CC	58.49±1.51	72.22±1.91
TPCS/10%CC	54.81±1.13	69.75±1.76
TPCS/15%CC	52.85±1.49	67.02±1.52
TPWRS/0%CC	61.36±0.52	75.62±1.62
TPWRS/5%CC	59.00±1.14	72.36±1.19
TPWRS/10%CC	57.29±0.59	70.01±1.41
TPWRS/15%CC	56.61±3.07	69.53±1.96

จากรูปที่ 4.11-4.13 ตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ข แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 % เป็นระยะเวลา 14 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในทุกสูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ นั่นคือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานทุกสูตรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากการดูดซับความชื้นจนอิ่มตัว ไม่สามารถดูดซับความชื้นได้อีก โดยค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-3 วันแรกของการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างของแป้งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระจำนวนมาก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้เป็นอย่างดี โดยเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียว TPWRS/0%CC มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมากที่สุด แต่เมื่อถึงวันที่ 9 ของการทดลอง ชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นมากและมีลักษณะเปื่อยยุ่ย ทำให้เกิดการหายไปของน้ำหนักขณะทำการชั่งน้ำหนัก ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นน้อยลง ชิ้นงานมีลักษณะเปื่อยยุ่ยอย่างมาก ไม่คงรูปเสียสภาพ จนไม่สามารถชั่งน้ำหนักได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 รองลงมา คือ TPCS/0%CC มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมาก แต่น้อยกว่า TPWRS/0%CC แต่เมื่อถึงวันที่ 9 ของการทดลอง มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมากกว่า TPWRS/0%CC เนื่องจากชิ้นงานยังสามารถคงรูปและดูดซับความชื้นจนอิ่มตัวไว้ได้โดยไม่เกิดการเสียสภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อทำการทดลองการดูดซับความชื้นต่อไป พบว่า มีรารขนาดเล็กเกิดขึ้นในทุกสูตรของชิ้นงาน

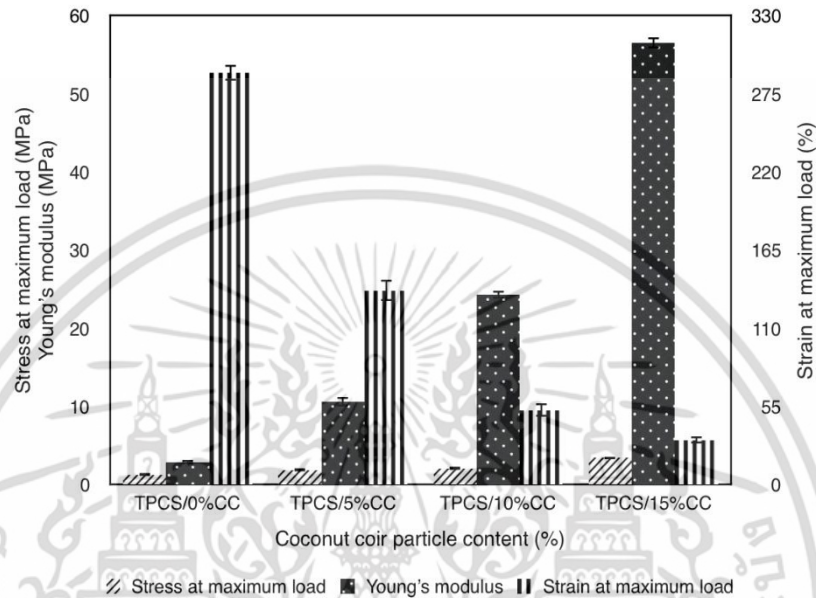
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว พบว่า การเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากอนุภาคของขุยมะพร้าว มีสมบัติชอบน้ำน้อยกว่าแป้ง เพราะมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระน้อยกว่าแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยาก นอกจากนี้ขุยมะพร้าวยังมีลิกนิน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก (ปริมาณลิกนินเท่ากับ 45.84 % [33]) ซึ่งแสดงสมบัติความไม่ชื้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของอนุภาคขุยมะพร้าวยังเป็นการทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งและอนุภาคของขุยมะพร้าวมากขึ้นด้วย อันเป็นเหตุให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งลดลงอย่างมาก จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวมีการดูดซับความชื้นลดลง โดยเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 15 % มีค่าการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

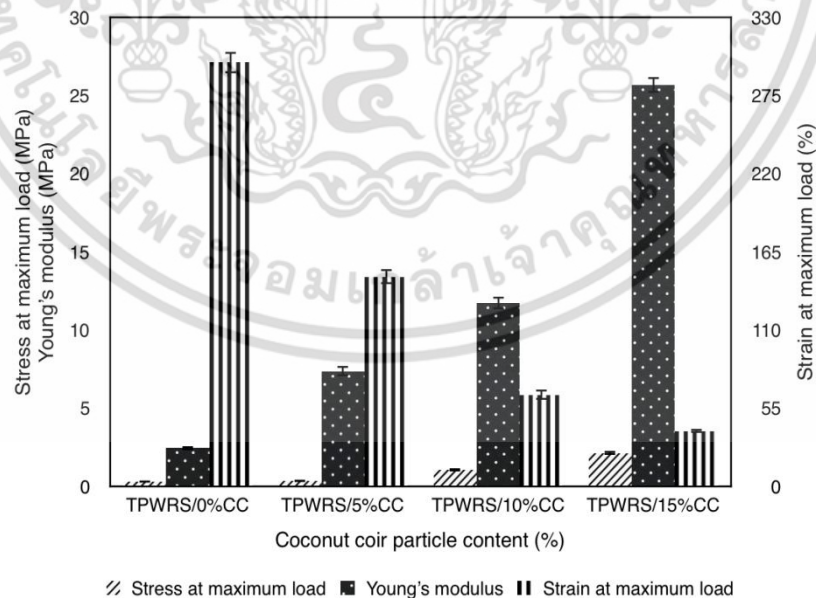
จากการทดสอบการดูดซับความชื้น พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อการดูดซับความชื้น โดยแป้งข้าวเหนียวสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกทินที่มีอยู่ในองค์ประกอบของแป้งแต่ละชนิด โดยแป้งข้าวเหนียว ซึ่งมีปริมาณอะไมโลเพกทิน ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งมาก จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ไม่แน่น มีช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับความชื้นเข้ามาภายในชิ้นงานได้มาก โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.2 พบว่า แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลัง มีปริมาณอะไมโลเพกทิน เท่ากับร้อยละ 99.0 และ 83.6 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้นจากรูปที่ 4.13 อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีจากตารางที่ 4.2 พบว่า แป้งทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบเป็นพอลิแซคคาไรด์ โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นมาก

4.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ซึ่งมีค่า Aspect ratio (L/D ratio) เท่ากับ 1.93 ± 0.85 ไมโครเมตร ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

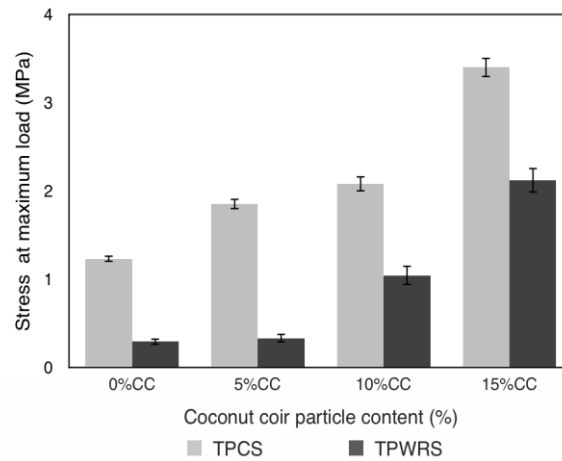


รูปที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ

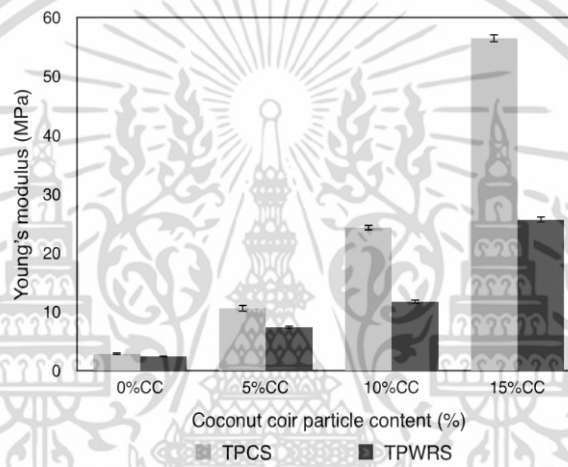


รูปที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ

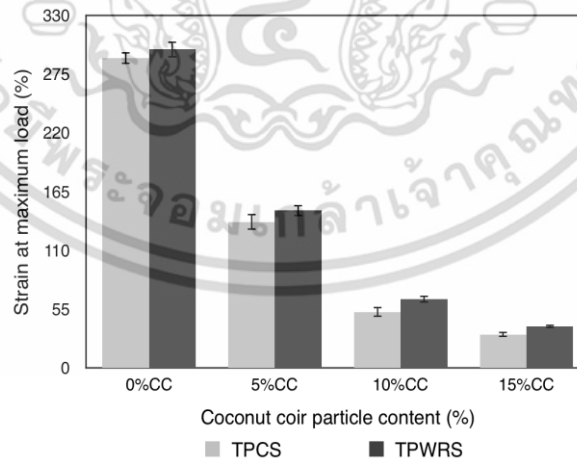
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14-4.15 และภาคผนวก ค แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคของขุยมะพร้าว เนื่องจากอนุภาคของขุยมะพร้าวทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและอนุภาคของขุยมะพร้าว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพีคที่ตำแหน่ง O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.3-4.4) และเมื่อพิจารณาด้วยสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.10) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัสดุของแป้งและอนุภาคของขุยมะพร้าว และจากผลของการทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่ามีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3) เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว เนื่องจากอนุภาคของขุยมะพร้าวมีความเป็นผลึกสูงจากองค์ประกอบภายใน จึงสามารถรับและส่งผ่านแรงที่กระทำได้ดีขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคของขุยมะพร้าว เนื่องจากอนุภาคของขุยมะพร้าวเป็นส่วนเสริมแรงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีความแข็งแรงและเปราะเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยืดออกและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นไปได้ยากมากขึ้น

จากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเหนียวในทุกอัตราส่วน เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงจำนวนมากอยู่กันอย่างอัดแน่นและเป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณผลึกที่มากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเหนียว จึงสามารถรับและส่งผ่านแรงที่มากกระทำได้ดี

จากรูปที่ 4.16 (ค) แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยึดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังในทุกอัตราส่วน เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณผลึกที่ต่ำกว่า และมีปริมาณอะไมโลเพกทินที่เป็นสายโซ่กึ่งอยู่มาก จึงสามารถยืดตัวออกและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง













จากการพิจารณาการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนที่ 15 % โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีที่สุด ดังแสดงได้จากการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึงและมอดุลัส

4.6 การทดสอบย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation properties)

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก มาฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน ที่มีการควบคุมความชื้นของดินคงที่ อยู่ในช่วง 10-14 % ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ให้ผลการทดลองดังนี้

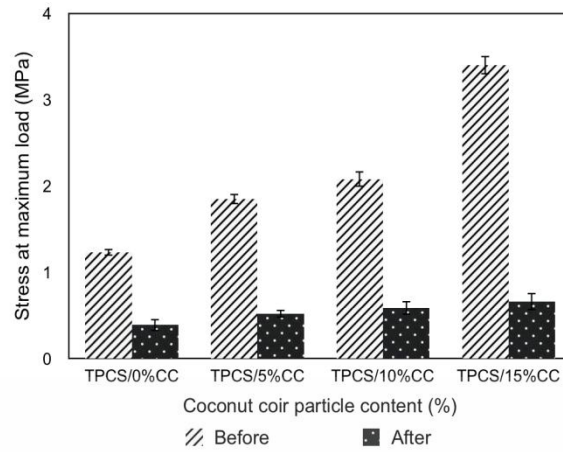
				วัน 0
TPCS/0%CC	TPCS/5%CC	TPCS/10%CC	TPCS/15%CC	
				วัน 5
TPCS/0%CC	TPCS/5%CC	TPCS/10%CC	TPCS/15%CC	
				วัน 10
TPCS/0%CC	TPCS/5%CC	TPCS/10%CC	TPCS/15%CC	

รูปที่ 4.17 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน

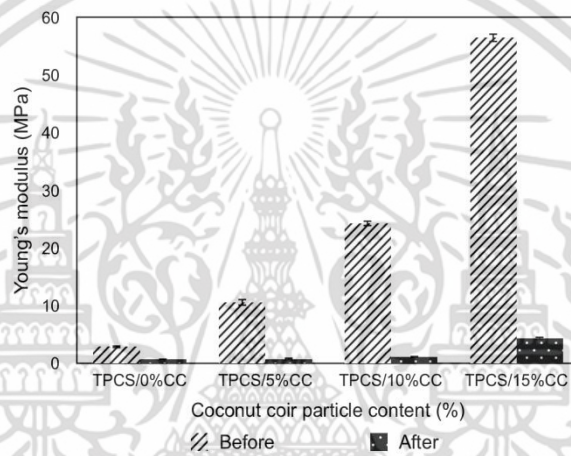
				วัน 0
TPWRS/0%CC	TPWRS/5%CC	TPWRS/10%CC	TPWRS/15%CC	
				วัน 5
TPWRS/0%CC	TPWRS/5%CC	TPWRS/10%CC	TPWRS/15%CC	
				วัน 10
TPWRS/0%CC	TPWRS/5%CC	TPWRS/10%CC	TPWRS/15%CC	

รูปที่ 4.18 เทอร์โมพลาสติกสตรัทซ์จากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของ
ขุยมะพร้าว ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็น
ระยะเวลา 10 วัน

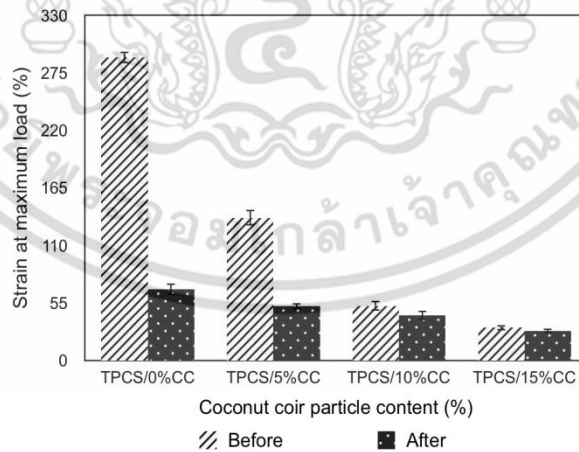
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



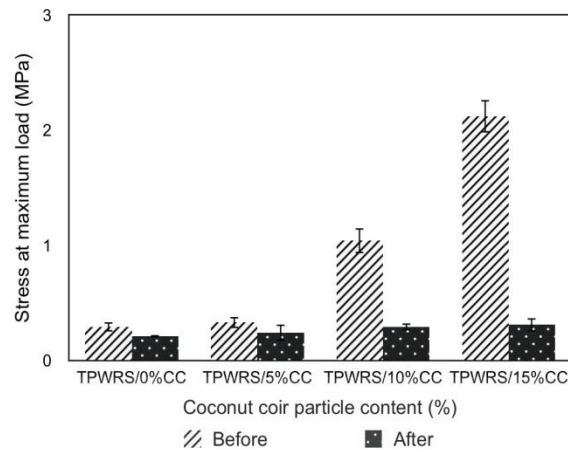
(ข)



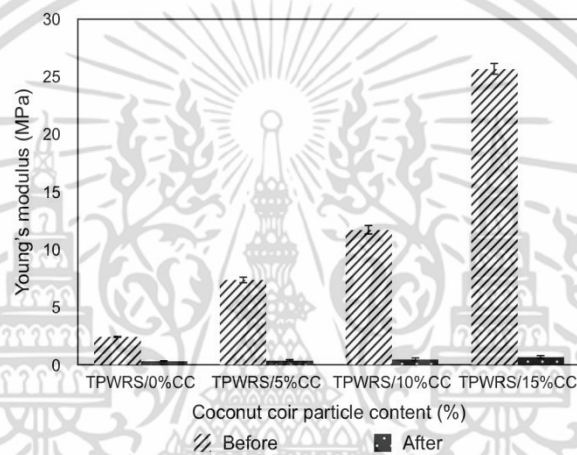
(ค)

รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัส (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

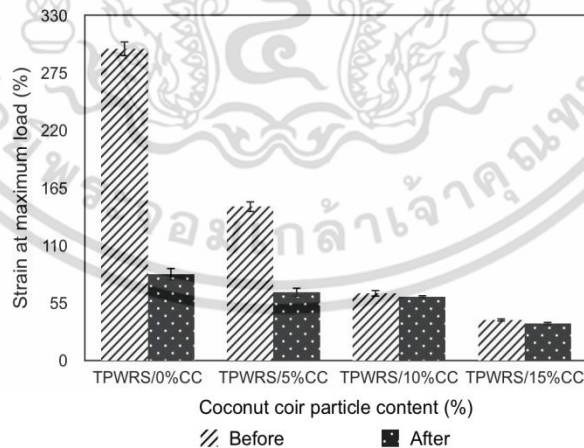
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัส (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

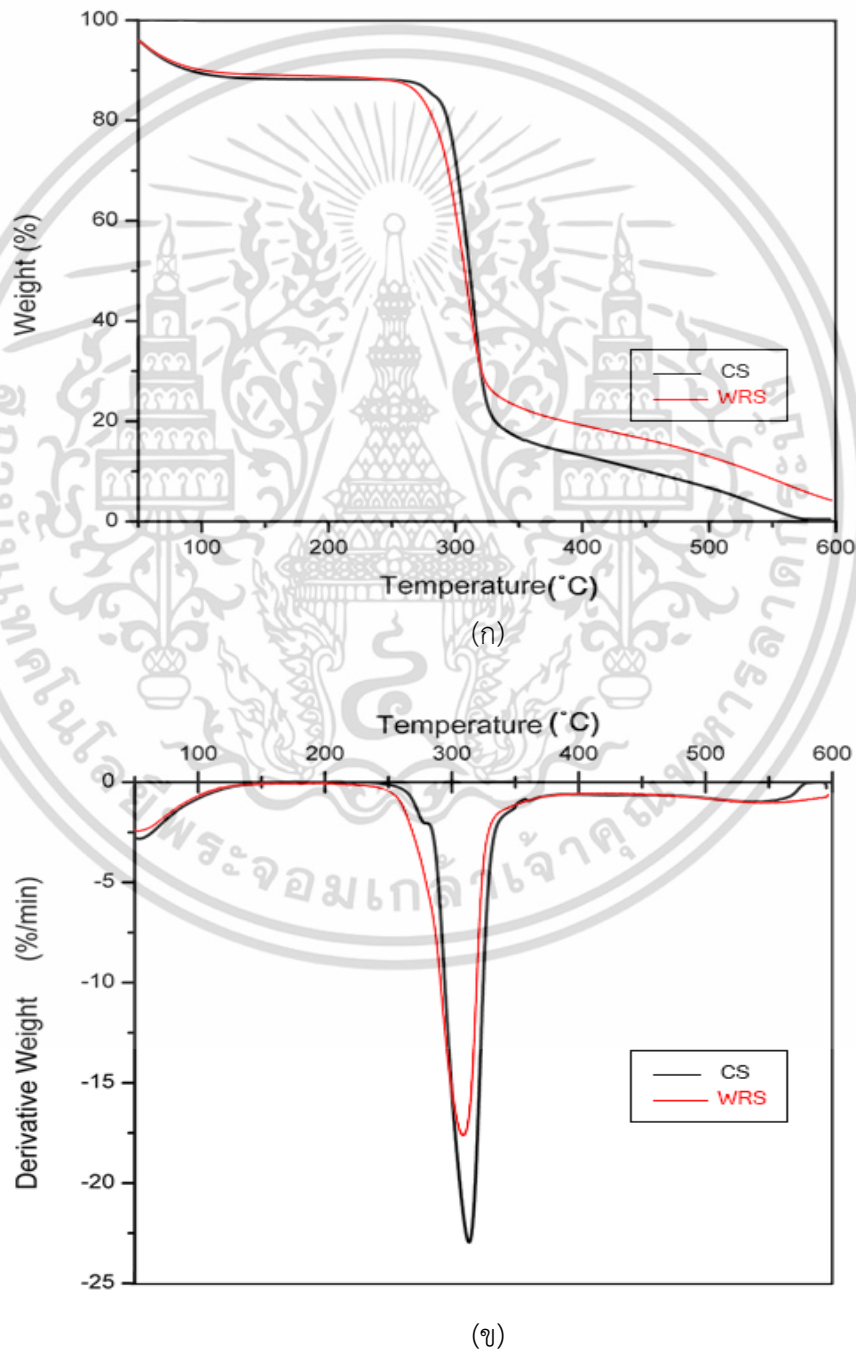
จากรูปที่ 4.19-4.20 (ก)-(ค) และภาคผนวก ง แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด หลังการฝังดิน มีค่าน้อยกว่าสมบัติเชิงกลก่อน ฝังดินอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีส่วนประกอบเป็นสารจำพวกแป้ง กลีเซอรอล ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจึงดูดซับความชื้นในดินที่นำมาทดสอบเข้ามา ในโครงสร้างแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ทำให้ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสายโซ่สั้นลง มีความแข็งแรงลดลง ทำให้เมื่อออกแรงดึง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเกิดการขาดได้ง่ายขึ้น สมบัติเชิงกลจึงมีค่าลดลงหลังจากทำการฝังดิน



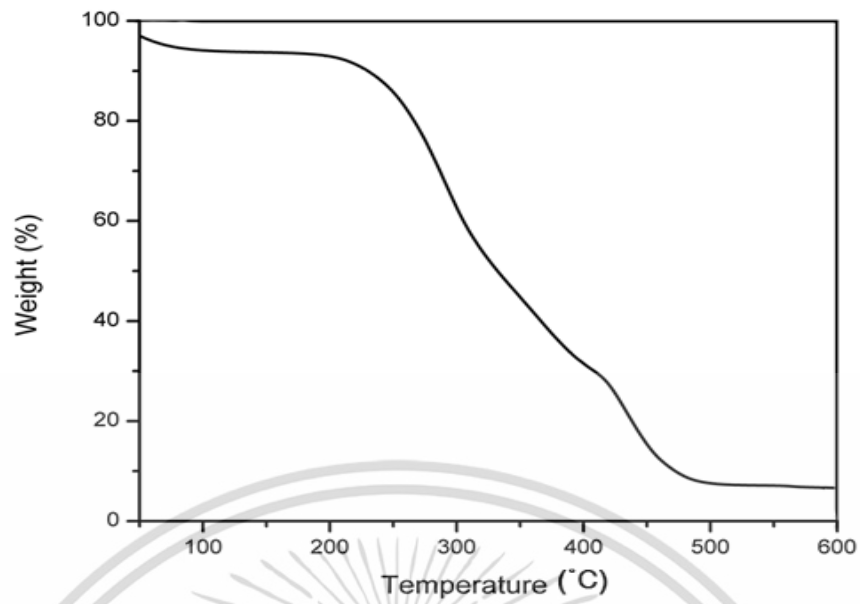
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

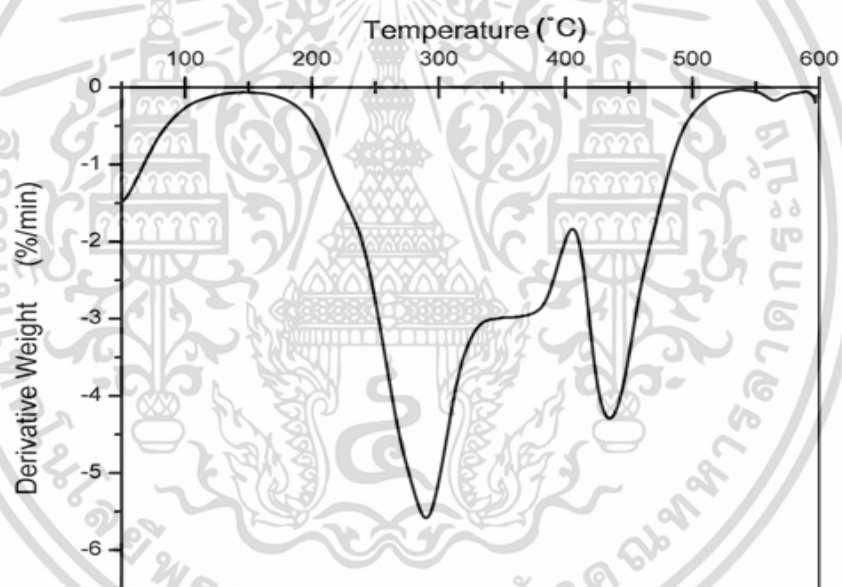
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (Maximum degradation temperature) ด้วยการใช้เครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer) ภายใต้สภาวะไนโตรเจน (N_2) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.21 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



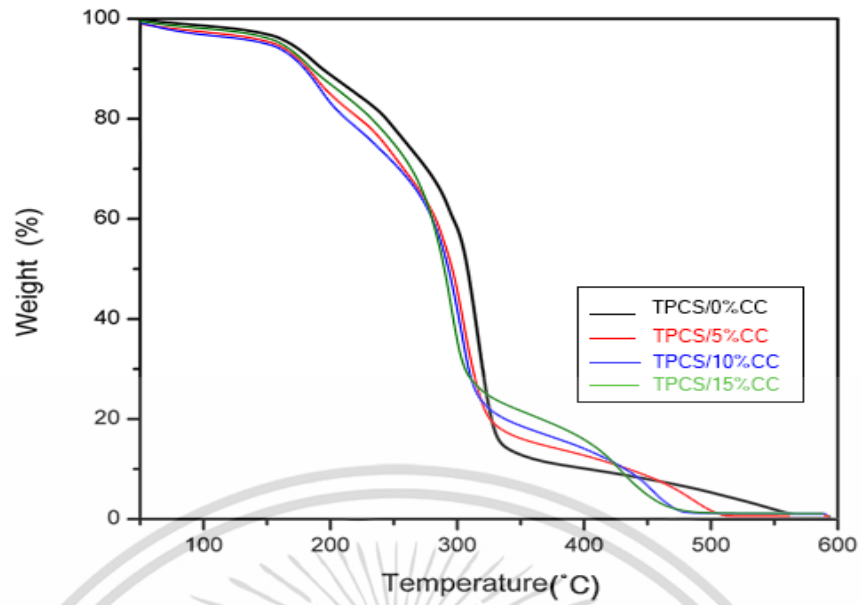
(ก)



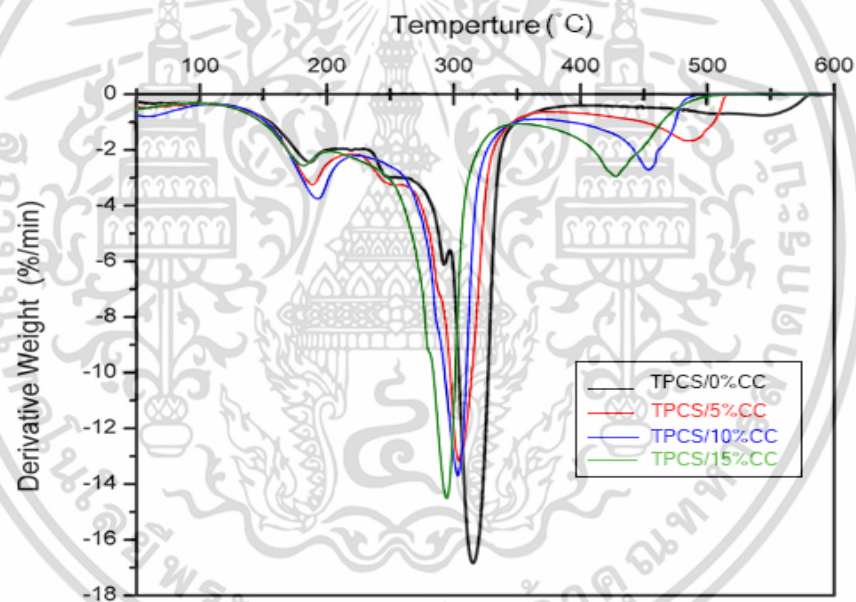
(ข)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



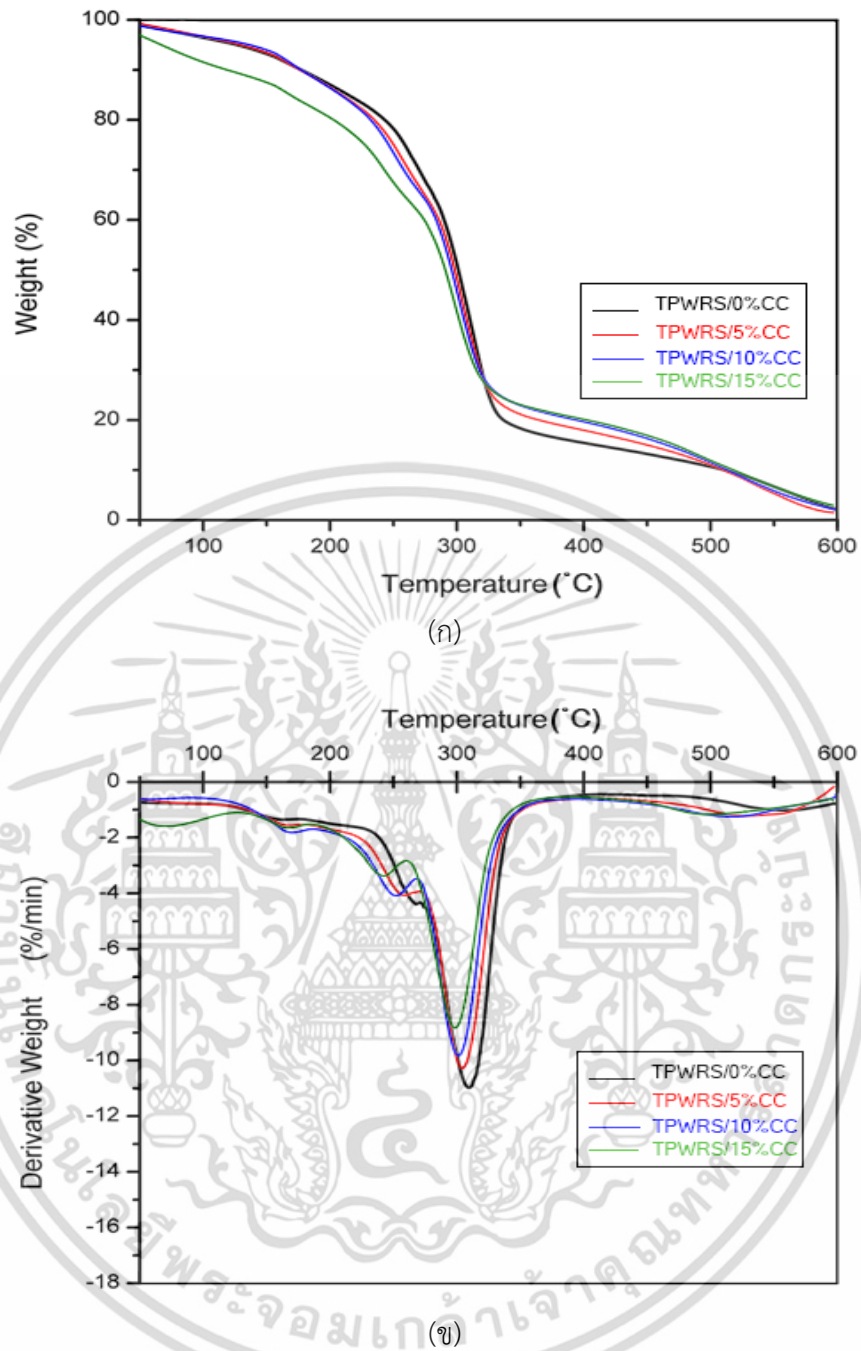
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C)
CS	314.16
WRS	309.14

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของอนุภาคขุยมะพร้าว

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C)		
	ช่วงที่ 1 (เฮมิเซลลูโลส)	ช่วงที่ 2 (เซลลูโลส)	ช่วงที่ 3 (ลิกนิน)
CC	227.59	289.75	435.16

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C)			
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (Bound water)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	ช่วงที่ 4 (อนุภาคขุยมะพร้าว)
TPCS/0%CC	186.32	291.83	315.28	-
TPCS/5%CC	187.99	289.04	304.11	485.55
TPCS/10%CC	193.02	285.69	303.00	453.73
TPCS/15%CC	181.29	280.67	295.18	428.61
TPWRS/0%CC	161.92	267.13	309.43	-
TPWRS/5%CC	165.53	258.11	304.40	532.51
TPWRS/10%CC	169.43	251.42	301.61	518.57
TPWRS/15%CC	167.20	241.94	298.83	498.49

จากรูปที่ 4.21-4.22 ตารางที่ 4.7-4.8 และภาคผนวก จ แสดงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และอนุภาคของขุยมะพร้าว พบว่า เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว มีลักษณะคล้ายคลึงกัน มีอุณหภูมิในการสลายตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใกล้เคียงกัน คือ 314.16 และ 309.14 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยแป้งมันสำปะหลังจะมีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า สำหรับเทอร์โมแกรมของอนุภาคขุยมะพร้าว จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวเป็นช่วงกว้างหลายช่วง เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีโครงสร้างแบบเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวคือ 227.59 องศาเซลเซียส โครงสร้างแบบเซลลูโลส มีอุณหภูมิในการสลายตัวคือ 289.75 องศาเซลเซียส และโครงสร้างแบบลิกนิน ที่มีปริมาณมากในอนุภาคของขุยมะพร้าว มีอุณหภูมิในการสลายตัวคือ 435.16 องศาเซลเซียส [55]

จากรูปที่ 4.23-4.24 ตารางที่ 4.9 และภาคผนวก จ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิในการสลายตัว 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอล ช่วงที่ 2 คาดว่าเป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ 160-500 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำในรูปที่ไม่อิสระ [60] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ที่พบพีคช่วง 1642-1646 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในแป้ง ซึ่งเป็นไปตามสมบัติการดูดซับน้ำของแป้ง ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้ง พบว่า การเพิ่มปริมาณของอนุภาคขุยมะพร้าว มีผลทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งลดลง เนื่องจากมีการซ้อนทับกันของอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งและอนุภาคของขุยมะพร้าว (โครงสร้างแบบเซลลูโลส) โดยอุณหภูมิในการสลายตัวของอนุภาคขุยมะพร้าว (โครงสร้างแบบเซลลูโลส) มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำกว่าแป้ง และช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของอนุภาคขุยมะพร้าว (โครงสร้างแบบลิกนิน) มีค่าในช่วง 400-550 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินที่เกิดอันตรกิริยาไม่แน่นอน [55] ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวมีช่วงกว้าง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.9

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) และแป้งข้าวเหนียว (Thermoplastic waxy rice starch, TPWRS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว (CC) ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก เป็นส่วนเสริมแรงซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่า ชนิดของแป้งไม่มีผลต่อพีคของการสั่นที่ตำแหน่งต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch แต่การเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าวทำให้พบพีคที่ตำแหน่ง 1737 cm^{-1} ขึ้น ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากองค์ประกอบภายในอนุภาคของขุยมะพร้าว อีกทั้งยังทำให้พีคช่วง O-H stretching ที่เป็นองค์ประกอบหลักของแป้งและเซลลูโลสและพีคช่วง O-H bending ของแป้ง มีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง

2. จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อความเป็นผลึก โดยแป้งมันสำปะหลังมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้งข้าวเหนียวและการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาarch มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น โดยสูตรที่มีค่าความเป็นผลึกสูงสุด คือ TPCS/15%CC และสูตรที่มีค่าความเป็นผลึกต่ำที่สุด คือ TPWRS/0%CC

3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อความเรียบของชิ้นงาน โดยแป้งมันสำปะหลังให้ลักษณะสัณฐานวิทยาที่เรียบกว่าแป้งข้าวเหนียว อีกทั้งยังพบว่าอนุภาคของขุยมะพร้าวมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แบบสุ่ม ทั่วทั้งชิ้นงาน และมีการยึดเกาะที่ดีระหว่างเมทริกซ์กับส่วนเสริมแรง

4. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาarchทุกสูตรมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3 วันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นมีความชื้นคงที่ ซึ่งชนิดของแป้งมีผลต่อค่าการดูดซับความชื้น โดยแป้งข้าวเหนียวสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง และการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง โดยสูตรที่มีการดูดซับความชื้นมากที่สุด คือ TPWRS/0%CC และสูตรที่มีการดูดซับความชื้นต่ำที่สุด คือ TPCS/15%CC

5. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch โดยแป้งมันสำปะหลัง มีสมบัติในด้านความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว แต่แป้งข้าวเหนียวมีสมบัติในด้านเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง และการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้สมบัติเชิงกลด้านเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง โดยสูตรที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด คือ TPCS/15%CC และสูตรที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมต่ำที่สุด คือ TPWRS/0%CC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า สมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดินมีค่าน้อยกว่าสมบัติเชิงกลก่อนทำการฝังดิน

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อสมบัติทางความร้อน โดยแป้งมันสำปะหลังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าแป้งข้าวเหนียว และการเพิ่มปริมาณอนุภาคของขุยมะพร้าว ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้งมีค่าลดลง

8. พอลิเมอร์ที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวม โดยพิจารณาจากความเป็นผลึก การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงดึงและมอดูลัส คือ TPCS/15%CC

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคขุยมะพร้าวที่กำลังขยายสูงขึ้น เพื่อให้สามารถหาขนาดเฉลี่ยและค่า Aspect ratio ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

2. ศึกษาการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน เลือกทำการทดลองในสภาวะเปิด เพื่อให้ขึ้นงานเกิดการย่อยสลายจริงตามธรรมชาติ

3. ศึกษาการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้วิธีการอื่นๆ เช่น การย่อยสลายด้วยแสง การย่อยสลายด้วยรังสี เป็นต้น

4. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การนำไปทำเป็นกระถางต้นไม้ชนิดปลูกลงดินที่มีการผสมปุ๋ยและสารกันเชื้อราลงไปเนื้อแป้ง เพื่อความสะดวกในการเพาะปลูก การดูแลรักษา และป้องกันศัตรูพืชของต้นไม้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานพลาสติกออกแบบและผลิตพลาสติก. 2554. **พอลิเมอร์กับปัญหาสิ่งแวดล้อม.** [Online]. Available : <http://งานพลาสติก.com/polymer-environment/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [2] กัญญาภรณ์ แทนเพชร, ขวัญชนก มโนภาพ และจินตมาศ สรรพทรัพย์ศิริ. 2557. “สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยกรดมาลิกและกรดซิตริก.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ประรณาคำใส, ลัดดาวัลย์ เณรยอด และศันสนีย์ เกตุอ่วม. 2556. “ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคซีลี้อยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] วรวรรณ วัฒนาสิน. 2556. “การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน, ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] จรรยา สุบรรณ. 2542. **ตำรับอาหารชุดพิเศษ.** กรุงเทพฯ : ศรีสยามการพิมพ์.
- [6] พัชตรา มณีสินธุ์. 2532. “การใช้แป้งที่ผลิตภายในประเทศทดแทนแป้งสาลีในการทำบะหมี่.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] มณฑา จันทร์เกิดเลี้ยง. 2541. **เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ : ภาคศึกษาคหกรรมศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทาลัยศรีนครินทร์วิโรฒประสานมิตร.
- [8] Prachayawarakorn, J. Chaiwatyothin, S. Muaengta, S. and Hanchana, A. 2013. “Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites.” *Materials and Design*. 47 : 309-315.
- [9] Prachayawarakorn, J. and Pomdage, W. 2014. “Effect of carrageenan on properties of biodegradable thermoplasticcassava starch/low-density polyethylene composites reinforcedby cotton fibers.” *Materials and Design*. 61 : 264-269.
- [10] Tanetrungroj, Y. and Prachayawarakorn, J. 2014. “Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch prepared by injection molding technique.” *Songklanakarın Journal of Science and Technology*. 37 : 193-199.
- [11] อาสาสมัครวิกิพีเดีย. 2559. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.** [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550. **พลาสติกย่อยสลายได้**. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [13] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2559. **วัสดุชีวภาพ (Bio-based Material)**. [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/nia/strategy/innovation-project/strategy/bio-based-materials/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [14] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2559. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [15] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [16] ดุษฎี อดุทภาพ. 2559. **เคมีและสมบัติของแป้ง**. [Online]. Available : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [17] Antonio Zamora. 2017. **Carbohydrates - Chemical Structure**. [Online]. Available : <https://celestemohan.wordpress.com/author/celestemiochem/page/4/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 2560.
- [18] Christopher Klundt. 2012. **Carbohydrates**. [Online]. Available : <https://www.studyblue.com/notes/note/n/carbohydrates/deck/3269760>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [19] ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์. 2557. “ผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเป็นองค์ประกอบหลัก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] ดุษฎี อดุทภาพ. 2559. **โครงสร้างของเม็ดแป้ง**. [Online]. Available : http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [21] ดุษฎี อดุทภาพ. 2559. **สมบัติของแป้ง**. [Online]. Available : http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 พ.ย. 2559.
- [22] จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก. 2556. **สมุนไพรลดไขมันในเลือด 140 ชนิด**. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการสาธารณสุข 53 ฟุ่งสองห้องสำนักอนามัยกรุงเทพมหานคร.
- [23] อักษร ศรีเปล่ง. 2512. **พฤกษศาสตร์ทั่วไป**. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาพฤกษศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] สมพร ภูติยานันต์. **สมุนไพรใกล้ตัวเล่ม 6**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เภสัชกรรมคณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] ณรงค์ เฟ็งปรีชา. 2521. **มันสำปะหลัง: วัสดุเส้นใยแหล่งใหม่**. กรุงเทพฯ : กองวิจัย
ผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้.
- [26] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2543. **ประโยชน์ของมันสำปะหลัง**.
[Online]. Available : <http://www.tapiocathai.org/E5.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่
1 พ.ค. 2560.
- [27] อาสาสมัครวิกิพีเดีย. 2559. **ข้าวเหนียว**. [Online]. Available :
<https://th.wikipedia.org/wiki/ข้าวเหนียว>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [28] งามชื่น คงเสรี. 2546. **หนังสือข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว**. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร.
- [29] สุปราณี แพรศิริ. 2539. **ตำราขนมหวาน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แสงแดด.
- [30] นิรนาม. 2536. **หนังสือข้าวทำขนมได้สารพัด**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แม่บ้าน.
- [31] รุสมิยา อาลี. 2556. “คุณภาพทางเคมีของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์จากภาคใต้ของประเทศไทยและการเตรียมโมโนลอรินโดยใช้เอนไซม์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [32] ฤดี. 2559. **ใยมะพร้าว**. [Online]. Available :
<https://www.ruedee.com/th/fabric/coir/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [33] Khedari, J. Charoenyvai, S. and Hirunlabh, J. 2003. “New insulating particleboards from durian peel and coconut coir.” *Building and Environment*. 38 : 435–441.
- [34] ผศ.ปราโมทย์ วีรานุกูล, จักรวัฒน์ เรืองแรงสกุล, สัจจะชาญ พรัดมะลิ และประชุม คำพุด. 2554. “การใช้กากมะพร้าวต้นข้าวโพดและเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุประกอบชีวภาพทดแทนไม้ในแผ่นใยอัดความหนาแน่นปานกลาง.” งานวิจัยประเภททุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2554 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [35] สิริมา ชินสาร และกฤษณะ ชินสาร. 2558. “โครงการการสกัดและใช้ประโยชน์เส้นใยอาหารและเซลลูโลสจากกากมะพร้าวเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการสร้างตัวแบบเพื่อการพยากรณ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการทอด.” โครงการวิจัยประเภทงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2557, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [36] ปิยะนุส ชัยขจรวัฒน์. 2559. **ขุยมะพร้าว**. [Online]. Available :
<http://www.victoryindustrial.co.th/products.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559.
- [37] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม. 2551. **Composite**. [Online]. Available : http://www.thaitechno.net/t1/knowledge_detail.php?id=1849&uid=42939. เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559.
- [38] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. 2546. **เคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] ภิกษุ รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 23(2) : 141-142.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] Melissa Boyer. 2559. **Glycerol**. [Online]. Available : <https://quizlet.com/93521701/ap-biology-biochemistry-flash-cards/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2559.
- [41] Michael Ash. 2012. **Magnesium stearate**. [Online]. Available : <http://mikemutzel.com/what-is-magnesium-stearate-dr-michael-ash-offers-his-critical-scientific-appraisal/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ม.ค. 2560.
- [42] Allen, L.V. and Luner, P.E. 2005. **Magnesium Stearate**. [Online]. Available : <http://www.rockwellnutrition.com/assets/images/docs/MagnesiumStearate-TechincalDataSheet.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559.
- [43] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2554. **ผลิตภัณฑ์ยาง:กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี**. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [44] พงษ์ธร แซ่อู๋ และชาคริต สิริสิงห์. 2550. **ยาง:กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [45] American Standard for testing and materials. 1996. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia : West Conshohocken.
- [46] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. 2559. **Electron microscope**. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/unit4-5.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559.
- [47] Pachana, K. Wattanakorsiri, A. and Kaewpirom, S. 2012. "Physical properties of Thermoplastic glutinous rice starch reinforced with recycled newspaper cellulose fibers." *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 33(4) : 461-467.
- [48] Prachayawarakorn, J. Hommanee, L. Phosee, D. and Chairapaksatien, P. 2010. "Properties improvement of thermoplastic mung bean starch using cotton fiber and low-density polyethylene." *Starch/Stärke*. 62(8) : 435-443.
- [49] Prachayawarakorn, J. Sangnitivej, P. and Boonpasith, P. 2010. "Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene." *Carbohydrate Polymers*. 81(2) : 425-433.
- [50] Guimaraes, J.L. Wtpych, F. Saul, C.K. Ramos, L.P. and Satyanarayana, K.G. 2010. "Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil." *Carbohydrate Polymers*. 80(1) : 130-138.
- [51] Zuraida, A. Nurhumairah, A.R. Nurizwah, A.W. and Sitinaqiah, Z. 2012. "The study of glycerol plasticized thermoplastic sago starch." *Advanced Materials Research*. 576 : 289-292.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] Curvelo, A.A.S. Carvalho, A. and Agnelli, J.A.M. 2001. "Thermoplastic starch-cellulose fibers composites: preliminary results." *Carbohydrate Polymers*. 45(2) : 183-188.
- [53] Savadekar, N.R. and Mhaske, S.T. 2012. "Synthesis of nano cellulose fibers and effect on thermoplastics starch based films." *Carbohydrate Polymers*. 89(1) : 146-151.
- [54] Gironès, J. López, J.P. Mutjé, P. Carvalho, A.J.F. Curvelo, A.A.S. and Vilaseca, F. 2012. "Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt processing." *Composites Science and Technology*. 72(7) : 858-863.
- [55] Ramírez, M.G.L. Kestur, S.G. Manríquez-González, R. Iwakiri, S. Muniz, G.B. and Flores-Sahagun, T.S. 2014. "Bio-composites of cassava starch-green coconut fiber: Part II—Structure and properties." *Carbohydrate Polymers*. 102 : 576-583.
- [56] วัลลดา หวานเสนาะ. 2553. "สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้า เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [57] อาริยา ทาญชนะ. 2558. "ผลของขี้เลื่อยจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchและเทอร์โมพลาสติกสตาarchแอซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [58] ปรีชา สุวรรณพินิจ และนางลักษณ์ สุวรรณพินิจ. 2551. **ชีววิทยา 1**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [59] คมชลัท ผุสดี, ณัฐวดี วรรณวิจิตร และนนทียุต น้อยประชา. 2558. "ผลของกรดสเตียริก กลิเซอรอลโมโนสเตียเรท และแมกนีเซียมสเตียเรทต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลัง." โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [60] Mendes, J.F. Paschoalin, R.T. Carmona, V.B. Neto, A.R.S. Marques, A.C.P. Marconcini, J.M. Mattoso, L.H.C. Medeiros, E.S. and Oliveira, J.E. 2016. "Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion." *Carbohydrate Polymers*. 137 : 452-458.

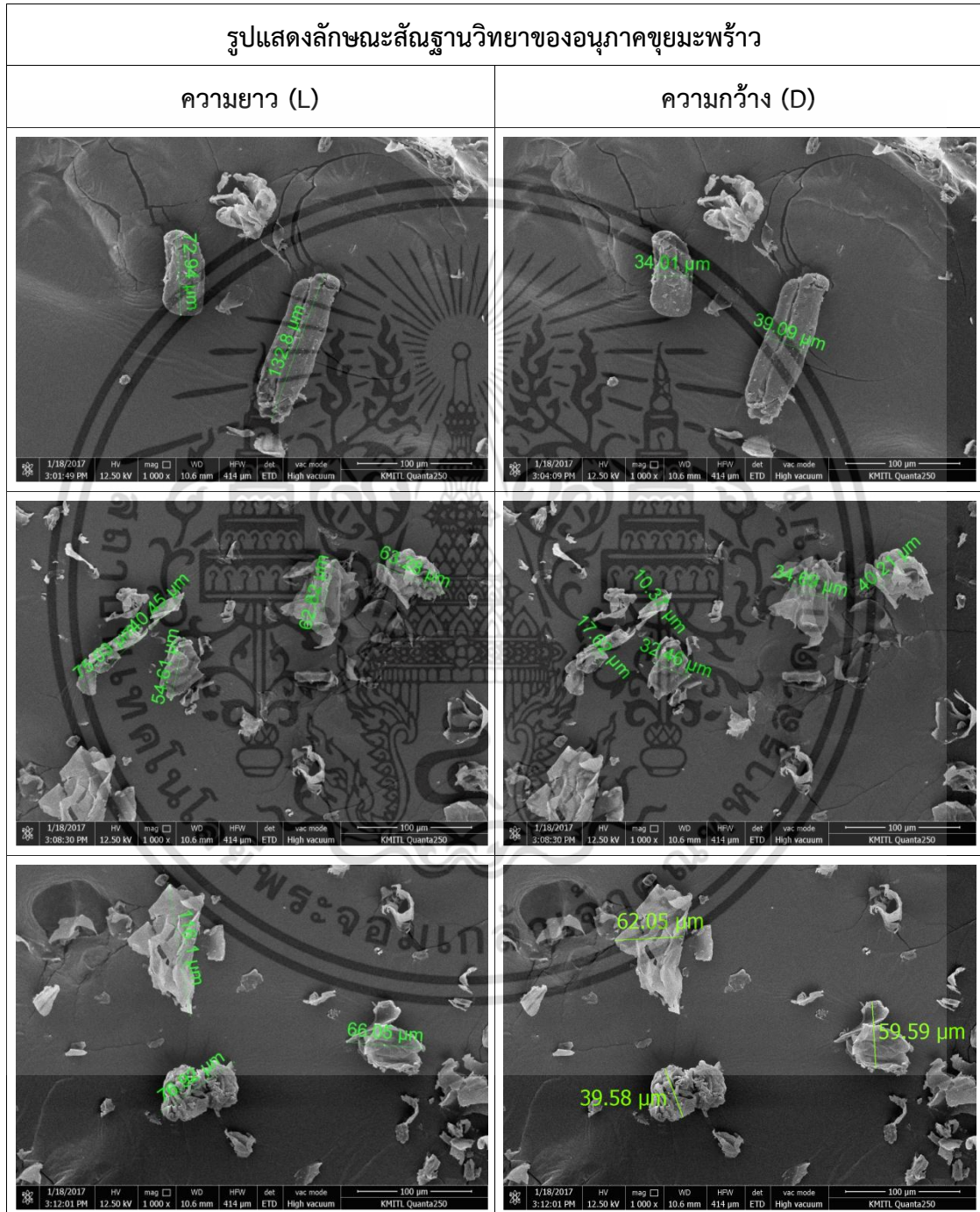


ภาคผนวก

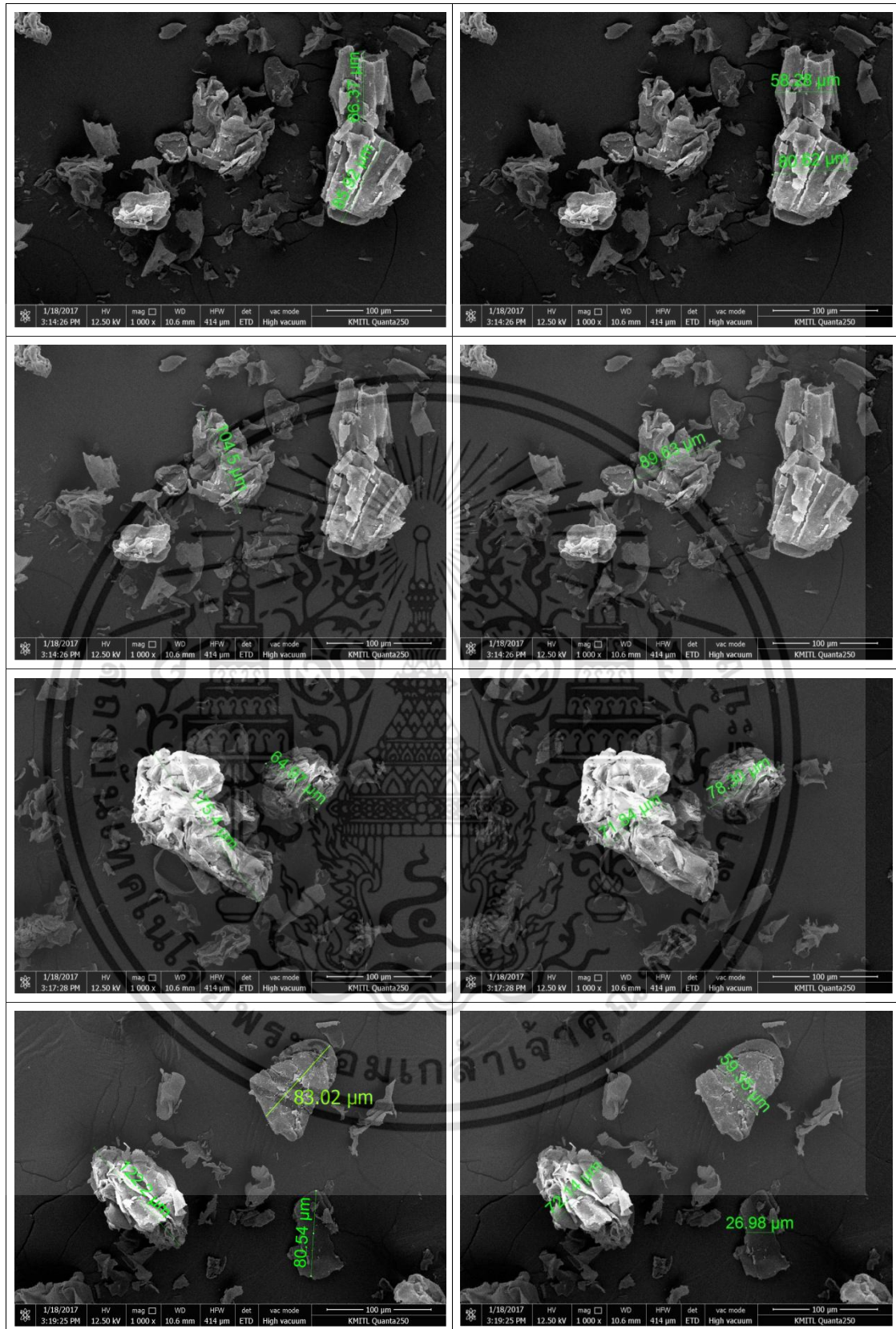
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

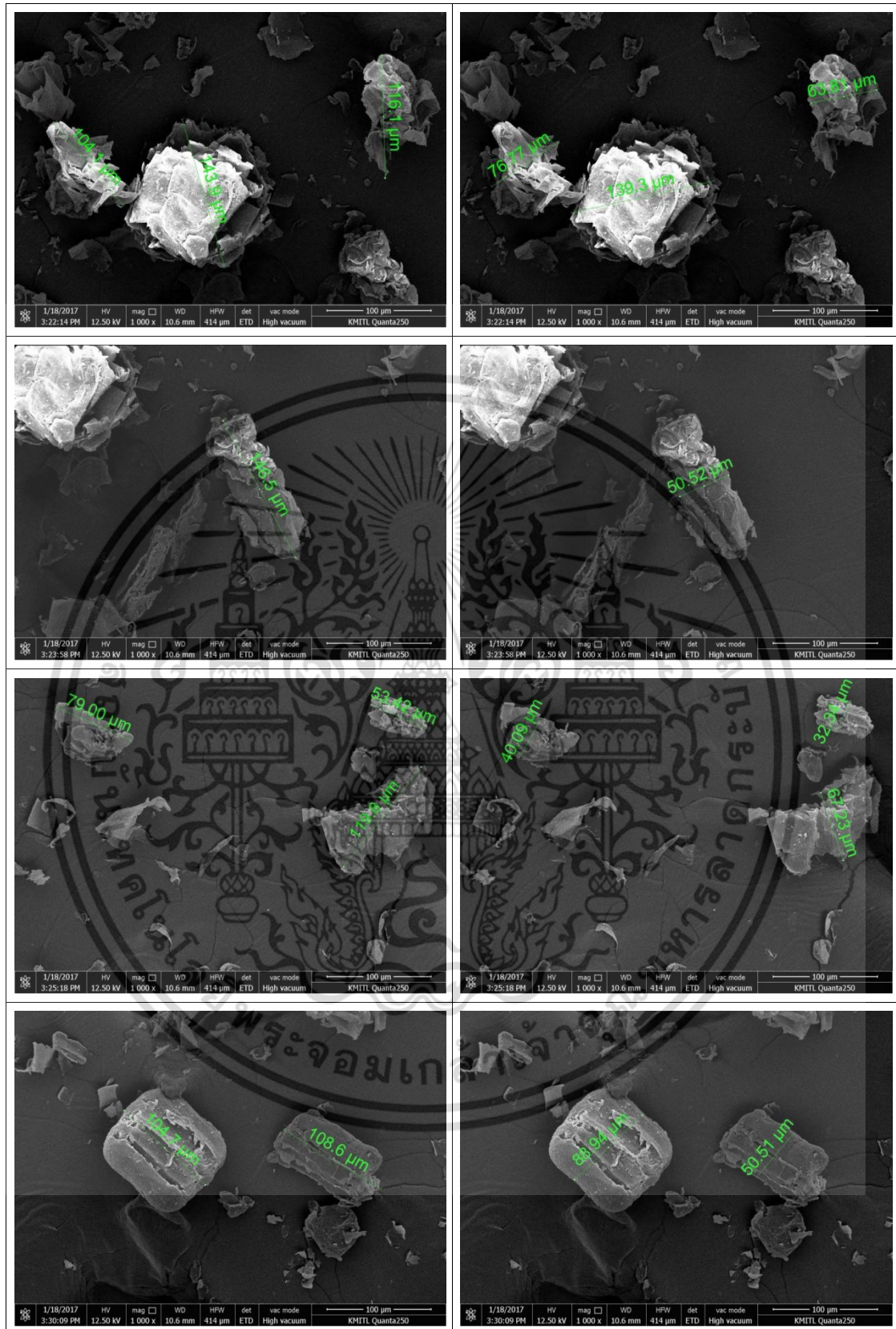
รูปแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคขุยมะพร้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า



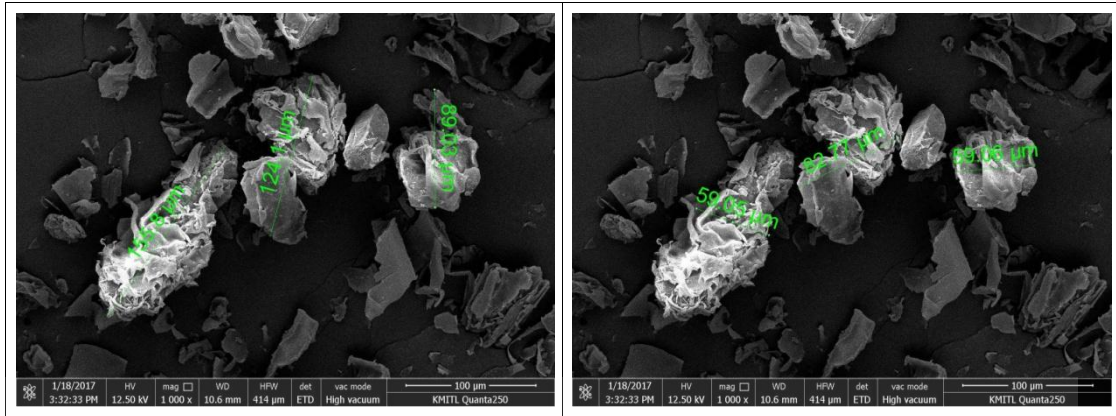
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่า Aspect ratio (L/D ratio) ของอนุภาคขุยมะพร้าว

ชั้นงานที่	L	D	L/D
1	132.80	39.09	3.40
2	72.94	34.01	2.14
3	62.82	40.21	1.56
4	63.28	34.69	1.82
5	40.45	10.37	3.90
6	75.03	17.62	4.26
7	54.61	32.46	1.68
8	116.10	62.05	1.87
9	76.92	39.58	1.94
10	66.05	59.59	1.11
11	66.37	58.28	1.14
12	85.92	80.62	1.07
13	104.50	89.63	1.17
14	175.40	71.84	2.44
15	64.97	78.30	0.83
16	122.20	72.14	1.69
17	80.54	26.98	2.99
18	83.02	59.35	1.40
19	104.10	76.77	1.36
20	143.90	139.30	1.03
21	116.10	63.81	1.82
22	146.50	50.52	2.90
23	79.00	40.09	1.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	53.42	32.34	1.65
25	119.80	67.23	1.78
26	108.60	50.51	2.15
27	104.70	88.94	1.18
28	155.80	59.05	2.64
29	124.10	82.77	1.50
30	89.03	59.06	1.51
ค่าเฉลี่ย	96.30	57.24	1.93
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	33.73	26.07	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 %

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น (%)							
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7
TPCS/0% CC	0	16.34±0.94	±27.780.90	39.11±0.84	48.37±1.08	52.72±1.03	57.86±0.59	59.47±1.28
TPCS/5% CC	0	15.41±1.16	26.75±1.50	36.76±1.73	44.88±1.73	49.38±1.51	54.48±1.55	58.49±1.51
TPCS/10% CC	0	13.74±1.02	24.80±1.29	34.78±1.22	42.39±0.95	46.71±0.87	51.23±0.87	54.81±1.13
TPCS/15% CC	0	12.13±0.37	22.83±0.91	33.42±1.33	40.83±1.16	45.39±1.07	50.11±1.72	52.85±1.49
TPWRS/0% CC	0	17.02±1.05	29.05±0.96	40.89±1.71	49.78±1.34	53.52±1.54	58.84±1.87	61.36±0.52
TPWRS/5% CC	0	14.38±0.74	27.53±2.63	36.87±1.13	45.71±1.19	50.06±1.12	55.10±1.91	59.00±1.14
TPWRS/10% CC	0	14.06±0.78	25.22±2.18	35.84±1.66	44.53±1.63	48.24±1.46	52.40±1.72	57.29±0.59
TPWRS/15% CC	0	14.00±0.04	24.14±0.11	35.34±0.02	44.08±1.27	47.91±0.05	51.56±0.61	56.61±3.07

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 %

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น (%)						
	วันที่ 8	9	10	11	12	13	14
TPCS/0% CC	65.51±0.56	70.30±1.04	72.03±1.09	75.89±1.08	76.26±0.84	76.36±0.84	76.40±0.85
TPCS/5% CC	62.63±1.78	65.79±1.91	67.23±2.15	71.39±2.26	72.04±1.93	72.15±1.91	72.22±1.91
TPCS/10% CC	59.62±0.77	62.82±1.16	64.69±1.50	68.78±1.50	69.43±1.40	69.59±1.57	69.75±1.76
TPCS/15% CC	57.60±0.36	61.37±0.69	63.36±0.97	66.87±1.12	66.89±1.48	66.95±1.50	67.02±1.52
TPWRS/0% CC	66.21±1.38	68.67±3.56	69.90±3.75	74.83±2.51	75.23±1.64	75.61±1.53	75.62±1.62
TPWRS/5% CC	63.10±0.14	66.56±1.26	68.40±1.76	72.10±1.52	72.10±1.08	72.31±1.19	72.36±1.19
TPWRS/10% CC	60.86±0.55	64.96±1.31	66.34±1.86	69.63±0.88	69.71±1.53	69.94±1.40	70.01±1.41
TPWRS/15% CC	59.65±0.58	63.68±1.00	65.98±1.50	68.07±2.29	68.45±1.94	68.62±1.94	69.53±1.96

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	
TPCS/0%CC	1.23 ± 0.04	2.89 ± 0.29	289.82 ± 5.64
TPCS/5%CC	1.85 ± 0.06	10.63 ± 0.61	136.51 ± 7.50
TPCS/10%CC	2.08 ± 0.09	24.30 ± 0.05	52.32 ± 4.83
TPCS/15%CC	3.40 ± 0.11	56.48 ± 0.72	31.38 ± 2.55
TPWRS/0%CC	0.29 ± 0.04	2.43 ± 0.12	298.16 ± 7.43
TPWRS/5%CC	0.33 ± 0.05	7.36 ± 0.32	147.31 ± 5.15
TPWRS/10%CC	1.04 ± 0.11	11.72 ± 0.41	64.29 ± 3.45
TPWRS/15%CC	2.12 ± 0.14	25.66 ± 0.52	38.80 ± 1.48

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว
ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 10 วัน

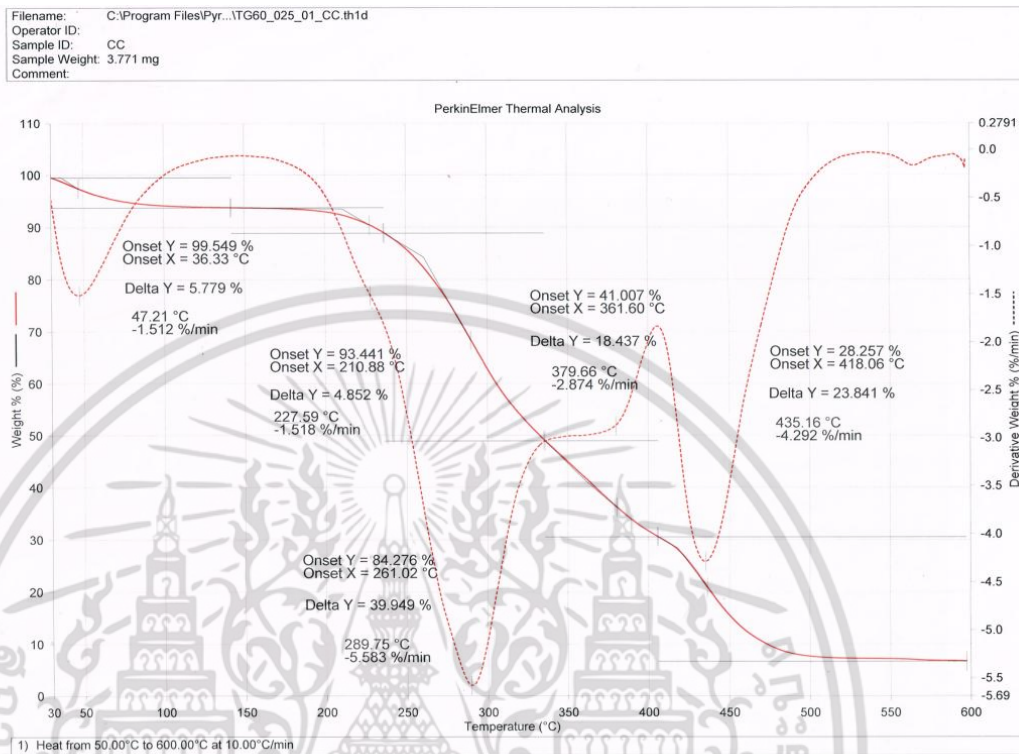
วัน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	TPCS/0%CC	1.23 ± 0.04	2.89 ± 0.29	289.82 ± 5.64
	TPCS/5%CC	1.85 ± 0.06	10.63 ± 0.61	136.51 ± 7.50
	TPCS/10%CC	2.08 ± 0.09	24.30 ± 0.05	52.32 ± 4.83
	TPCS/15%CC	3.40 ± 0.11	56.48 ± 0.72	31.38 ± 2.55
10	TPCS/0%CC	0.39 ± 0.07	0.71 ± 0.12	67.96 ± 5.60
	TPCS/5%CC	0.52 ± 0.05	0.76 ± 0.23	51.92 ± 3.20
	TPCS/10%CC	0.59 ± 0.08	1.11 ± 0.20	43.15 ± 4.30
	TPCS/15%CC	0.66 ± 0.10	4.32 ± 0.29	28.17 ± 2.30

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว
ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 10 วัน

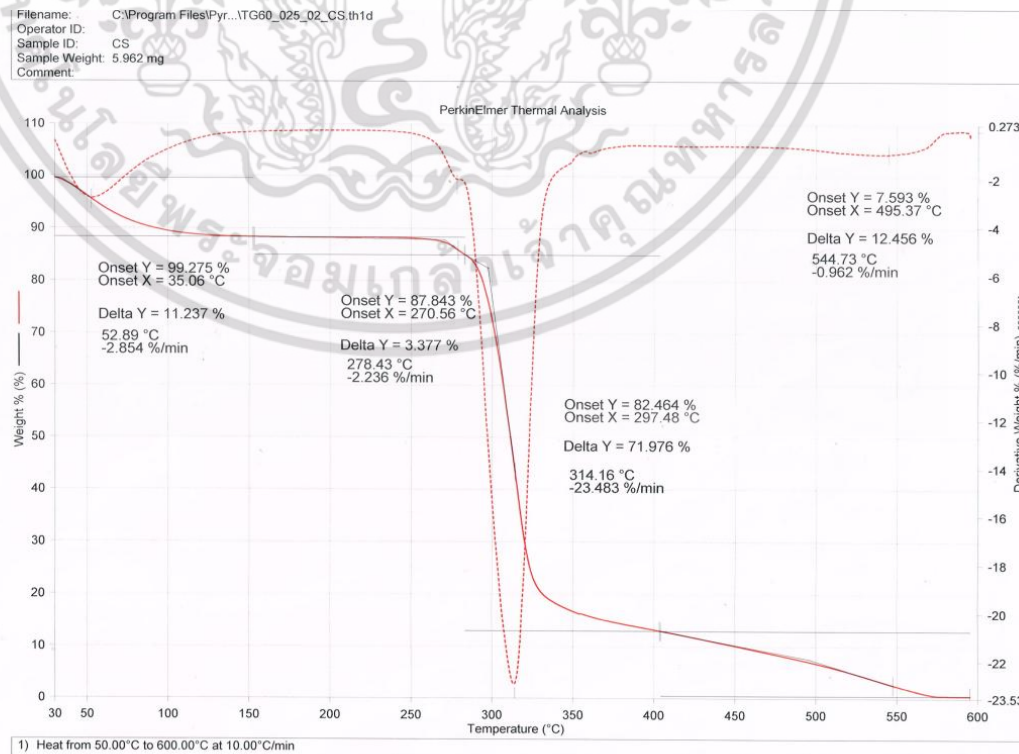
วัน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	TPWRS/0%CC	0.29 ± 0.04	2.43 ± 0.12	298.16 ± 7.43
	TPWRS/5%CC	0.33 ± 0.05	7.36 ± 0.32	147.31 ± 5.15
	TPWRS/10%CC	1.04 ± 0.11	11.72 ± 0.41	64.29 ± 3.45
	TPWRS/15%CC	2.12 ± 0.14	25.66 ± 0.52	38.80 ± 1.48
10	TPWRS/0%CC	0.21 ± 0.01	0.33 ± 0.08	82.64 ± 6.20
	TPWRS/5%CC	0.24 ± 0.07	0.38 ± 0.13	65.57 ± 4.60
	TPWRS/10%CC	0.29 ± 0.03	0.49 ± 0.16	61.00 ± 1.80
	TPWRS/15%CC	0.31 ± 0.06	0.69 ± 0.19	35.40 ± 1.56

ภาคผนวก จ

(ก) TG และ DTG ของอนุภาคขุยมะพร้าว

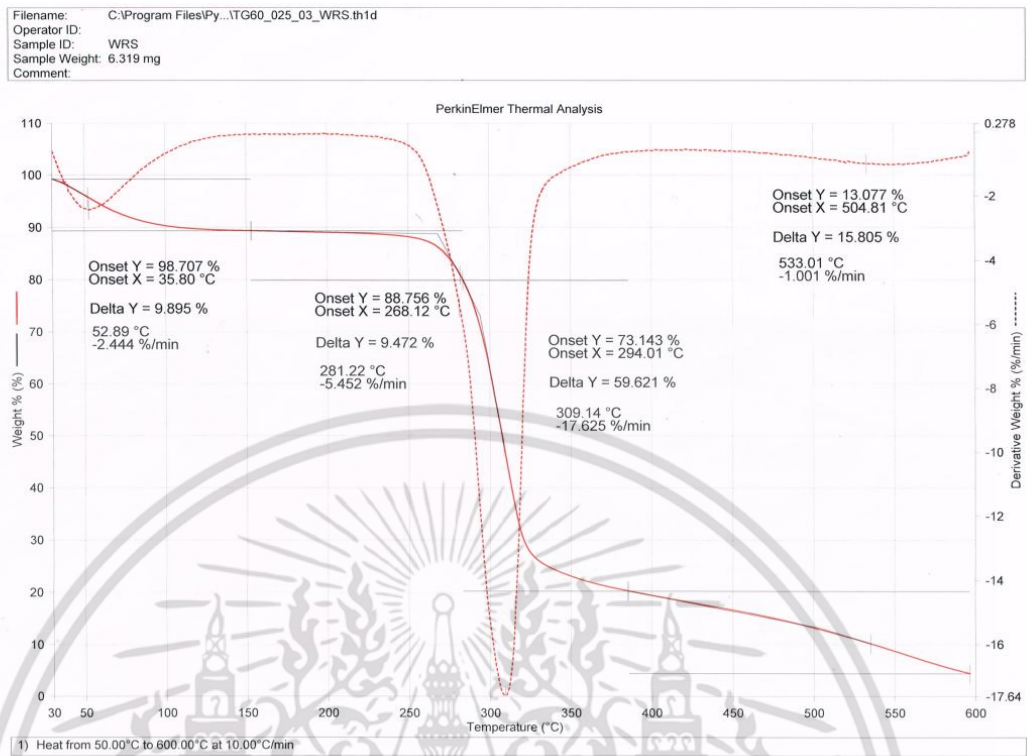


(ข) TG และ DTG ของแป้งมันสำปะหลัง

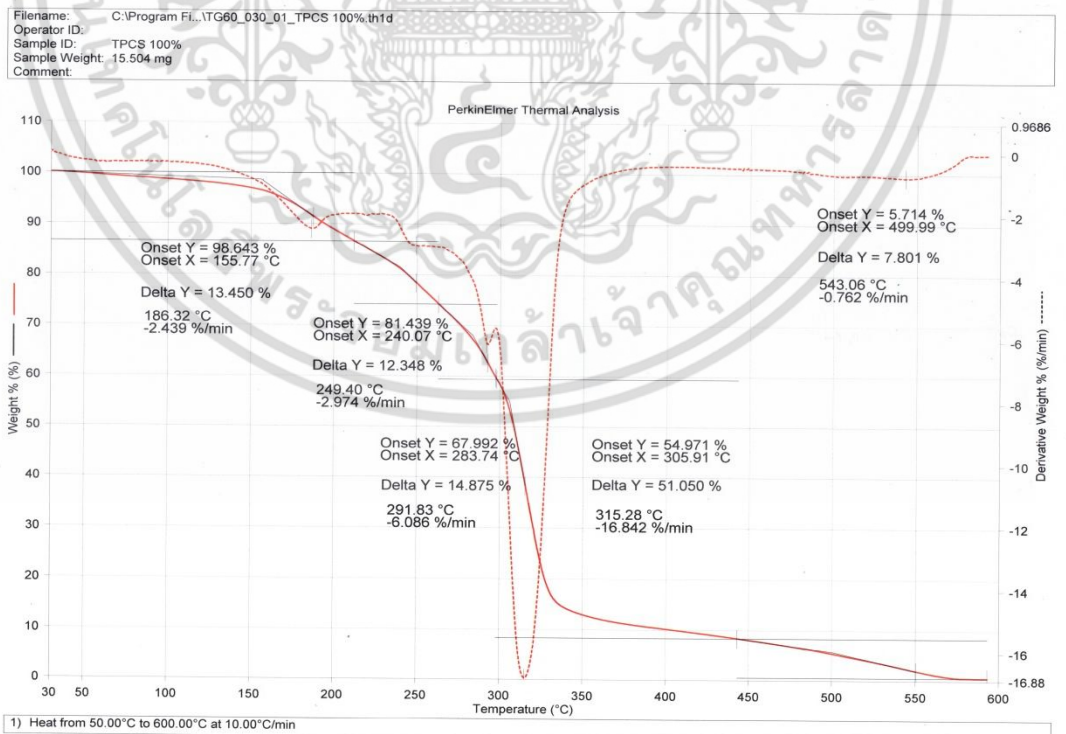


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) TG และ DTG ของแป้งข้าวเหนียว

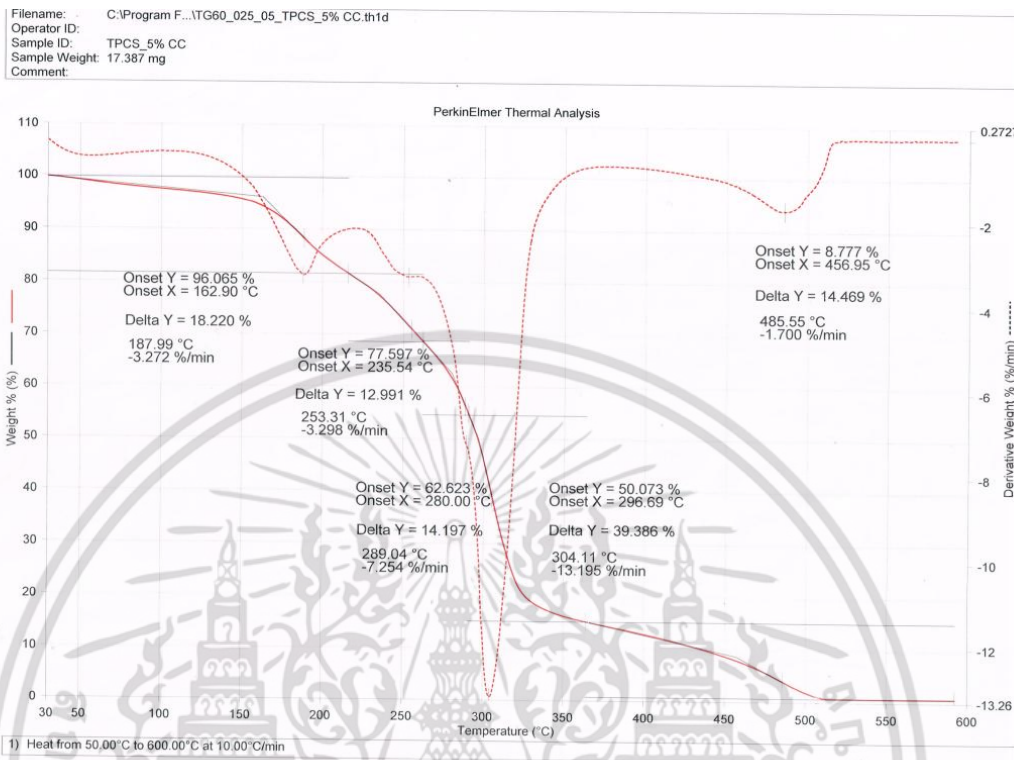


(ง) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว

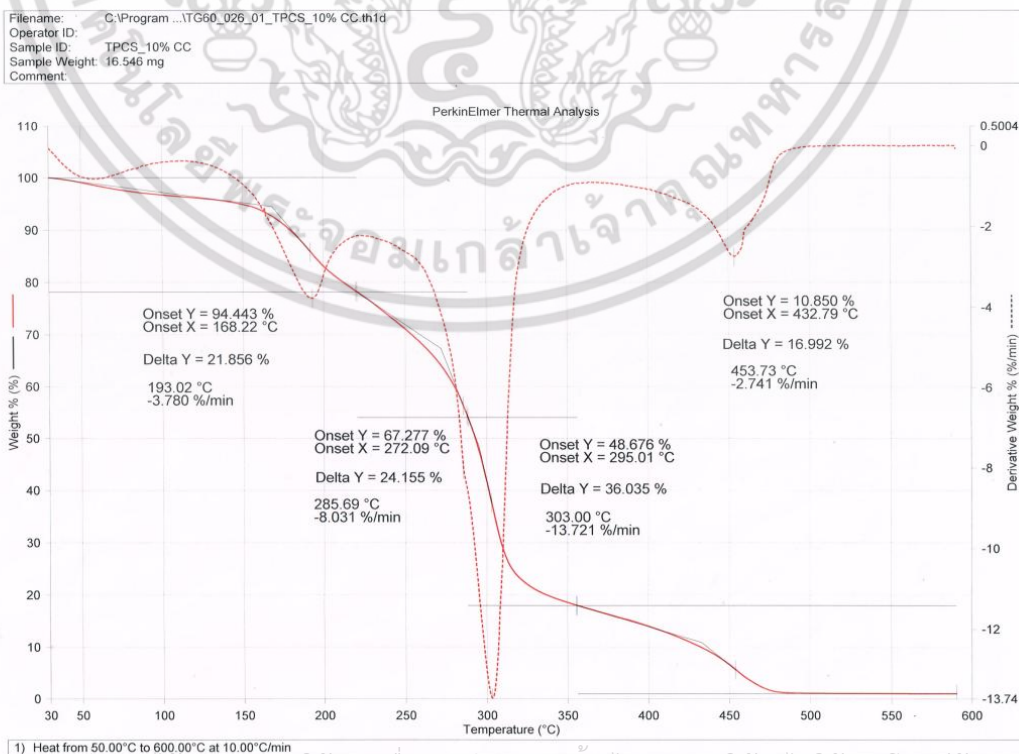


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 5 % โดยน้ำหนัก

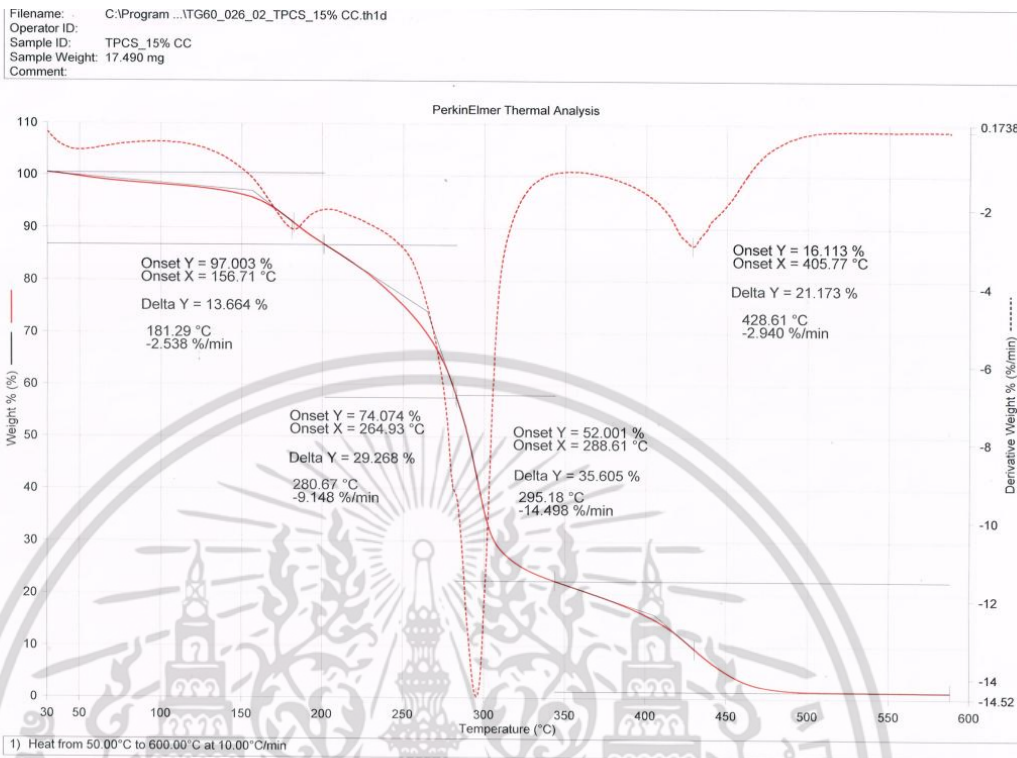


(ฉ) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 10 % โดยน้ำหนัก

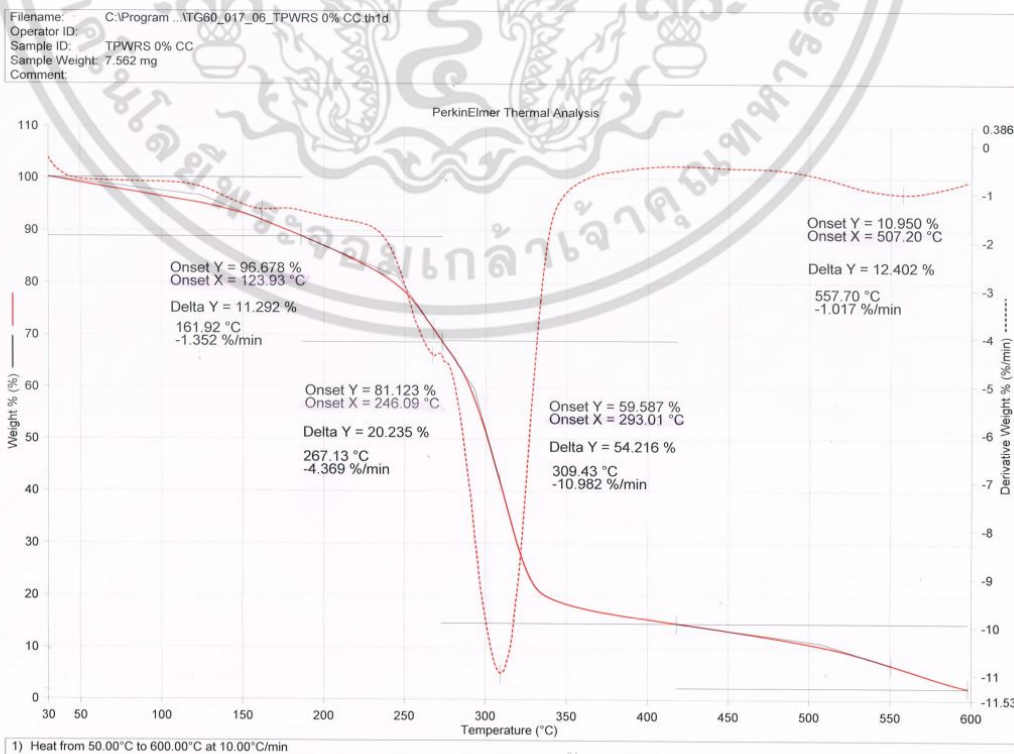


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 15% โดยน้ำหนัก

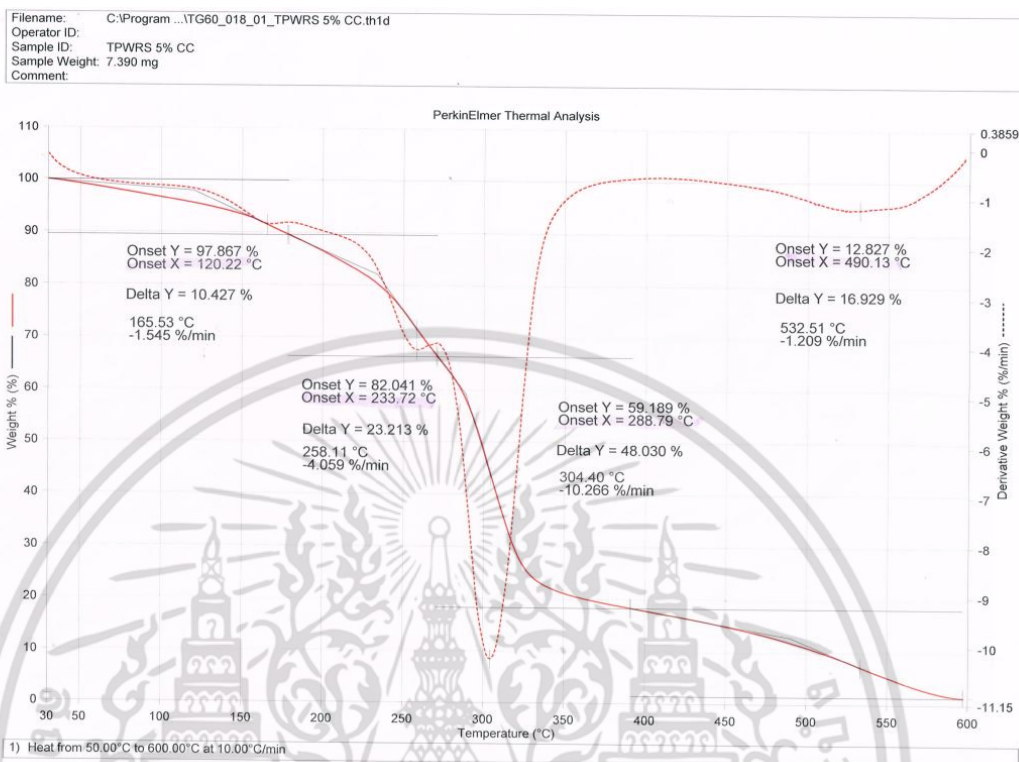


(ข) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าว

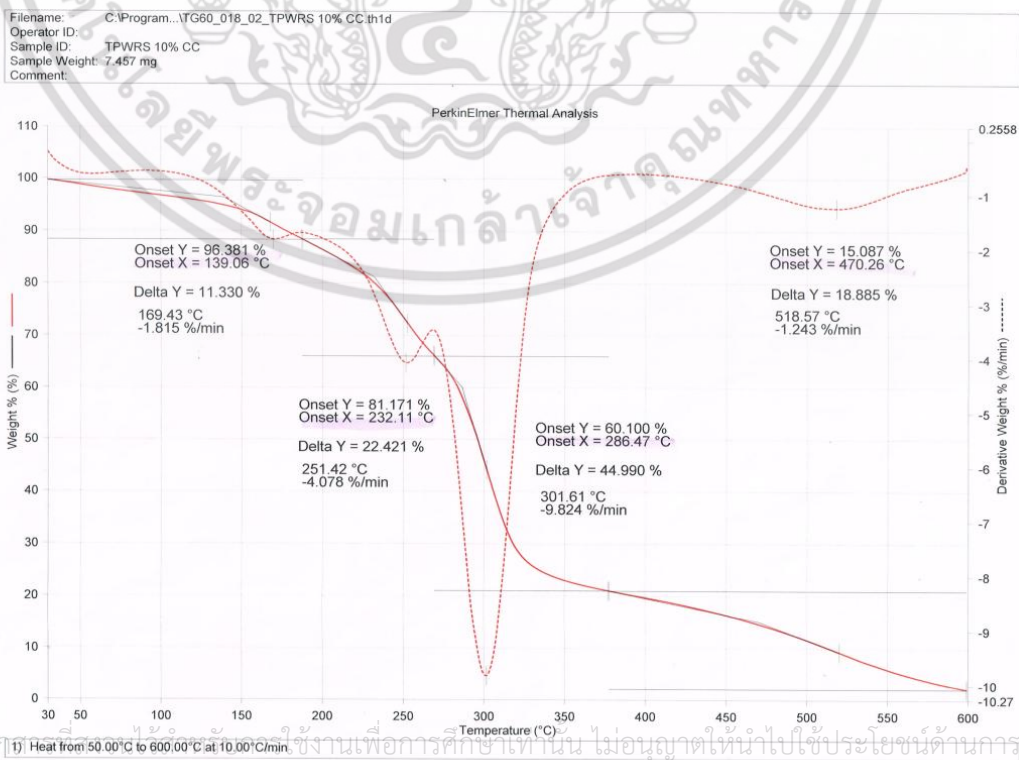


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฉ) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก

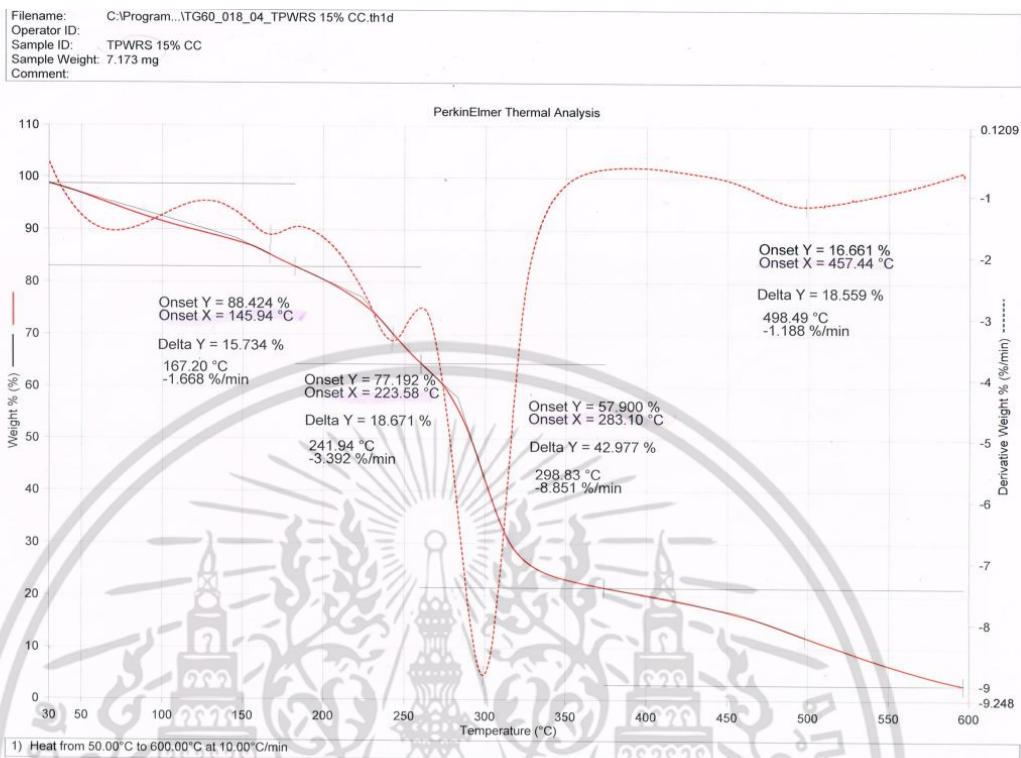


(ญ) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอนุภาคของขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 15% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้