

ผลงานปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เถ้าที่ฝังศพต่อชนิดไม้ต่าง ๆ ของเทอร์โม
พลาสติกที่ทำขึ้นจากแป้งมันสำปะหลัง



นางสาว รัชมนดา ชื่นของพระสุภา
นางสาว วิไลรัตน์ เข้มหมัด
นางสาว ชัยฉรมา ตีร์เนตร

โครงการพิเศษงานวิจัยส่วนหนึ่งของงานวิจัยความหนักผู้ตรววิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๕

ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โม
พลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

นางสาว รัศมีดาว ยืนยงพระสุธา

นางสาว วิไลรัตน์ เจ๊ะหมัด

นางสาว อัจฉรา ตรีเนตร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

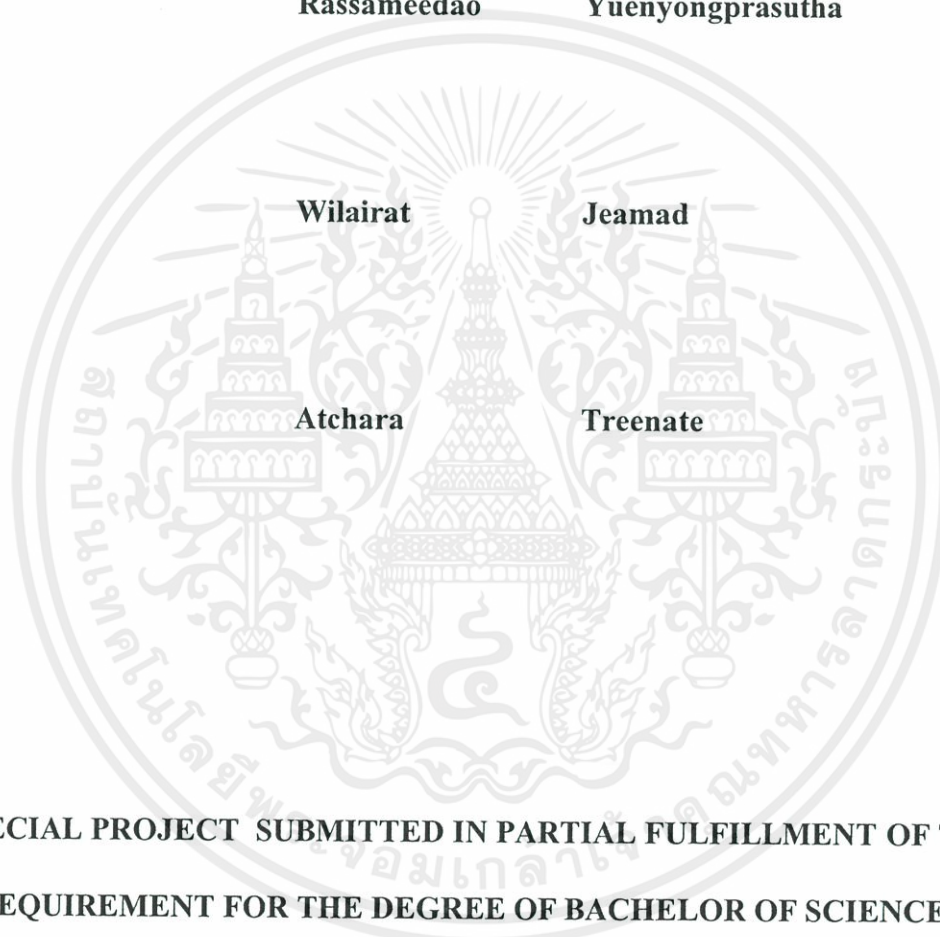
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of sawdust contents and particle sizes on properties of
thermoplastic cassava starch**

Rassameedao

Yuenyongprasutha



Wilairat

Jeamad

Atchara

Treenate

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
PROGRAM IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลัง

Effect of sawdust contents and particle sizes on properties of thermoplastic cassava starch

ชื่อนักศึกษา นางสาวรัศมีดาว ยืนยงพระสุธา รหัส 52050226
นางสาววิไลรัตน์ เจ๊ะหมัด รหัส 52050236
นางสาวอัจฉรา ตรีเนตร รหัส 52050267




ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์	
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลีเนียมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง

นักศึกษา	นางสาวรัศมีดาว	ยืนยงพระสุธา	รหัส 52050226
	นางสาววิไลรัตน์	เจ๊ะหมัด	รหัส 52050236
	นางสาวอัจฉรา	ตรีเนตร	รหัส 52050267

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยซีลีเนียมจากไม้แอช โดยศึกษาผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลีเนียมด้วยการเตรียมตัวอย่างจากการผสมและขึ้นรูปโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ตามลำดับ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมซีลีเนียมมีความเข้ากันได้ดีระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง ส่วนค่าแรงดึง, ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการปรับปรุงด้วยซีลีเนียมที่ปริมาณ 7.5% ขนาดอนุภาค 100-200 เมช นอกจากนี้ยังพบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม และการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินแสดงให้เห็นว่าการเติมซีลีเนียมจากแป้งมันสำปะหลังซ้ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Effect of sawdust contents and particle sizes on properties
of thermoplastic cassava starch

Students Ms. Rassameedao Yuenyongprasutha

Ms. Wilairat Jeamad

Ms. Atchara Treenate

Degree Bachelor of Science

Program Industrial Chemistry

Year 2012

Special Project Advisor Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

ABSTRACT

This research aimed to study the preparation and properties of thermoplastic cassava starch modified by ashwood sawdust. The effect of sawdust contents and particle sizes were investigated. The samples were compounded and shaped using internal mixer and compression molding machine, respectively. It was found that the addition of the sawdust into the thermoplastic cassava starch matrix clearly caused the decrease of water absorption. The maximum load, stress at maximum load and Young's modulus were found in the thermoplastic cassava starch modified by 7.5% and 100-200 mesh sawdust. In addition, thermal stability of the thermoplastic cassava starch tended to increase by the incorporation of the sawdust. From soil buried test the results showed that the use of 10%, 100-200 mesh sawdust led to the slowest degradation of the thermoplastic cassava starch.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords : Thermoplastic Starch , cassava starch , sawdust

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารกร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ และ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณาเป็นกรรมการ ตลอดจนให้คำแนะนำ เพื่อให้โครงงานพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุจิต สอนสะอาด ที่ได้ให้ความรู้ และข้อแนะนำดีๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งผู้ที่ให้โอกาสต่อคณะผู้จัดทำ จนทำให้ประสบความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาว รัศมีดาว ยืนยงพระสุธา

นางสาว วิไลรัตน์ เจ๊ะหมัด

นางสาว อัจฉรา ตรีเนตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XII
สารบัญรูปภาพ	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 แป้ง.....	5
2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแป้ง	5
2.1.2 องค์ประกอบภายในแป้ง	5
2.1.2.1 อะไมโลส	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ 2.1.2.1 อะไมโลส และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.2.2 อะไมโลเพกติน	10
2.1.2.3 สารมัธยันต์.....	11
2.1.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง.....	11
2.1.3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ช	12
2.1.4 สมบัติของแป้ง	13
2.1.4.1 การพองตัวและการละลาย.....	13
2.1.4.2 การเกิดเจลลาติโนเซชัน.....	13
2.1.4.3 การคืนตัวของแป้งสุก.....	15
2.1.4.4 ความหนืด.....	18
2.1.4.5 การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์.....	19
2.1.5 แป้งมันสำปะหลัง.....	19
2.1.5.1 ประวัติความเป็นมาของมันสำปะหลัง.....	19
2.1.5.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	21
2.1.5.3 ชนิดและสายพันธุ์.....	21
2.1.5.4 การใช้ประโยชน์.....	21
2.1.5.5 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง	23
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆที่ 2.2 ขี้เลื่อย.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1 ความหมายและลักษณะของจีลื้อย	25
2.2.2 ไม้แเอซ	26
2.2.2.1 ลักษณะทั่วไปของไม้แเอซ.....	26
2.2.2.2 สมบัติพิเศษ และการใช้งานของไม้แเอซ	27
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้	28
2.3.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้.....	28
2.3.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ.....	30
2.3.2 แ่่งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร	31
2.3.2.1 พลาสติกที่มีแ่่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน.....	31
2.3.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ.....	31
2.3.3 สมบัติของพอลิเมอร์.....	34
2.3.4 ความสามารถในการย่อยสลาย.....	35
2.3.5 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	37
2.3.5.1 การวิเคราะห์สมคูลคาร์บอน	37
2.3.5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป	38
2.3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	38
2.3.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	39
2.3.5.6 การทดสอบ โดยการฝังดิน	39
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	46
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	46
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	47
3.3 วิธีการทดลอง	51
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	51
3.3.1.1 การเตรียมขี้เลื่อย	51
3.3.1.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง	51
3.3.1.3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง	52
3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอช	52
3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่ได้	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	58
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	58
4.1.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอชที่มีปริมาณต่างกัน	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 ศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอชที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน	59
4.2 สัณฐานวิทยา	61
4.3 สมบัติทางกายภาพ	64
4.3.1 การดูดซับน้ำ	64
4.3.2 ปริมาณการดูดความชื้นในบรรยากาศ	70
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล	72
4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	76
4.5.1 ผลของปริมาณของซีลีเนียมที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจาก แป้งมันสำปะหลัง	76
4.5.2 ผลของขนาดอนุภาคของซีลีเนียมที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจาก แป้งมันสำปะหลัง	79
4.6 สมบัติการย่อยสลาย	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการวิจัย	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	89
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ภาคผนวก	95

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก	96
4.1 การวิเคราะห์หาหุ้ฟงักชั้น	96
(ก) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ม่ได้ปรับรุงด้วย สมบัติด้วยจีล่ือย	96
(ข) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 2.5%.....	96
(ค) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 5.0%.....	97
(ง) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 7.5%.....	97
(จ) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 10%.....	98
(ฉ) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด >50 mesh ปริมาณ 7.5%.....	98
(ช) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด 50-100 mesh ปริมาณ 7.5%.....	99
(ซ) อินฟาเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ปรับรุงด้วย จีล่ือย ขนาด <200 mesh ปริมาณ 7.5%.....	99
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภาคผนวก ข	100
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งท่มีการนำไปใช้ ภาคผนวก ค	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล	102
(ก) ตารางแสดงค่าแรงดึง กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลี้อย่างต่างกัน ..	102
(ข) ตารางแสดงความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาค ของซีลี้อย่างต่างกัน	102
(ค) ตารางมอดุลัส กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลี้อย่างต่างกัน	103
(ง) ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลี้อย่างต่างกัน	103
(จ) ตารางเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลี้อย่างต่างกัน	104
ภาคผนวก ง	105
TGA และ DTG ซีลี้อยากไม้แอส.....	105
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยากไม้แอส (ปริมาณซีลี้อย 0%)	106
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยากไม้แอส ปริมาณ 7.5% ขนาด >50 mesh.....	107
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยากไม้แอส ปริมาณ 7.5% ขนาด 50-100 mesh	108
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยากไม้แอส ปริมาณ 7.5% ขนาด 100-200 mesh	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ ด้วย จีลื้อจากไม้แอส ปริมาณ 7.5% ขนาด <200 mesh.....	110
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ ด้วย จีลื้อจากไม้แอส ปริมาณ 2.5% ขนาด 100-200 mesh	111
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ ด้วย จีลื้อจากไม้แอส ปริมาณ 5% ขนาด 100-200 mesh	112
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ ด้วย จีลื้อจากไม้แอส ปริมาณ 10% ขนาด 100-200 mesh	113
ภาคผนวก จ	114
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	6
ตารางที่ 2.2 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อน ของอะไมโลสกับไอโอดีน.....	8
ตารางที่ 2.4 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	12
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจล (Kofler gelatinization temperature) (°C) ของแป้งชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.6 ประเภทของพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ.....	32
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง	44
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอล และปริมาณของขี้เถ้าที่มีขนาดแตกต่างกัน ในขั้นตอนการผสมก่อนนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด	51
ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้	52
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอช ด้วย ขนาดอนุภาคเดียวกันปริมาณต่างกัน	76
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอช ด้วยขนาดอนุภาคต่างกัน ที่ปริมาณเท่ากัน	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแอลฟาอะไมโลส และอะไมโลเพคติน	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	10
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินและไขมัน	10
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในเม็ดสตาร์ชจากธัญพืช	11
รูปที่ 2.7 การพองตัวของเม็ดแป้ง	13
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	14
รูปที่ 2.9 การเกิดการคั่นตัวของแป้งสุก	15
รูปที่ 2.10 การคั่นตัวของแป้ง	16
รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	17
รูปที่ 2.12 ลักษณะของต้นมันสำปะหลัง	19
รูปที่ 2.13 ประโยชน์ของมันสำปะหลัง	21
รูปที่ 2.14 กระบวนการในการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	23
รูปที่ 2.15 ลักษณะของขี้เลื่อยที่เกิดจากการเลื่อยด้วยมือ	24
รูปที่ 2.16 ลักษณะของต้นแอชเนื้อแข็ง	25
รูปที่ 2.17 ลักษณะไม้แอช	26
รูปที่ 2.18 เฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากไม้แอช	26

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.19	วงจรวัดจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ..... 29
รูปที่ 2.20	ลักษณะเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช..... 31
รูปที่ 3.1	แผนผังการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง 47
รูปที่ 3.2	แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยซีลีออยจาก ไม้แอช 48
รูปที่ 3.3	ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ 53
รูปที่ 4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยซีลีออยขนาด 100-200 mesh ในปริมาณต่างๆ 58
รูปที่ 4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยซีลีออยปริมาณ 7.5% ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ 59
รูปที่ 4.3	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า 61
รูปที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย ซีลีออยจากไม้แอช ด้วยขนาดอนุภาคเดียวกัน (100-200 mesh) ที่ปริมาณต่างกัน..... 62
รูปที่ 4.5	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออย จากไม้แอช ที่ปริมาณ 7.5% โดยมีขนาดต่างกัน 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

รูปที่ 4.6	ผลของปริมาณซีลีเนียมจากไม้แอชที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอชที่ขนาดอนุภาค 100-200 mesh ในปริมาณ 0%, 2.5%, 5%, 7.5% และ 10%	64
รูปที่ 4.7	ผลของขนาดอนุภาคซีลีเนียมจากไม้แอชที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจาก ไม้แอชที่มีปริมาณ 7.5% เท่ากัน และมีขนาดอนุภาค >50 mesh, 50-100 mesh, 100-200 mesh และ <200 mesh	65
รูปที่ 4.8	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจาก ไม้แอชที่อัตราส่วนต่างๆ กันที่ได้จากการแช่น้ำ	68
รูปที่ 4.9	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอชในอัตราส่วนต่างๆ ที่ ภายใต้อุณหภูมิสัมพัทธ์ 99%	70
รูปที่ 4.10	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมที่มีขนาดอนุภาคและที่มีปริมาณต่างกัน	72
รูปที่ 4.11	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอช โดยใช้อนุ- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ภาคของซีลีเนียมเท่ากัน (100-200 mesh) ที่ปริมาณต่างกัน	77

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอส โดยใช้นุภาคของซีลีเนียมต่างกัน ปริมาณเท่ากัน (7.5%).....	79
รูปที่ 4.13 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ที่ได้จากการทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	81
รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลาสติกที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย และมีความต้องการใช้ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงมีการผลิตพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นจำนวนมาก พอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้เกือบทั้งหมดมาจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป พลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ย่อยสลายได้ยากและในกระบวนการผลิตรวมทั้งการทำลายหรือย่อยสลายตัวพลาสติกเองยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดมลพิษในหลายๆด้าน ในระยะหลังจึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาวัสดุใหม่มาทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์แบบเดิมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งพอลิเมอร์จากธรรมชาตินับเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้ทดแทน

พอลิเมอร์ธรรมชาติที่น่าสนใจที่สุดน่าจะเป็นพอลิเมอร์จากพืชเพราะพืชเป็นวัตถุดิบที่มีมากในธรรมชาติ สามารถปลูกทดแทนขึ้นได้ ราคาถูก กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน พอลิเมอร์จากพืชที่สำคัญแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซลลูโลส และแป้ง ทั้งสองชนิดต่างเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีมอนอเมอร์เหมือนกัน คือ กลูโคส แต่มีการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่ในส่วนต่างๆของพืช เช่น ราก หัว เมล็ด ฯลฯ พืชที่มีแป้งในปริมาณมาก ได้แก่ พืชหัว เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง เผือก ฯลฯ ซึ่งพืชเหล่านี้หาได้ง่าย ราคาถูก ปลูกทดแทนได้ในเวลารวดเร็ว และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังย่อยสลายทางธรรมชาติได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ โดยธรรมชาติแป้งจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์เทอร์โมเซต โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย อย่างไรก็ตามหากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) ได้สารที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) [1]

มันสำปะหลัง (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Manihot esculenta* (L.) Crantz) เป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง เป็นพืชอาหารที่สำคัญอันดับ 5 รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง ชื่อสามัญเรียกหลายชื่อ เช่น Cassava, Yuca, Mandioca, Manioc, Tapioca [2] แป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง จะมีลักษณะเป็นสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย

แป้งเหนียวติดภาชนะหนักขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใย ติดกันหมด เนื้อแป้งใสเป็นเงา พอเย็นแล้วจะติดกันเป็นก้อนเหนียว[3]

Plasticizer นิยมใช้กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล แม้ว่าน้ำจะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยได้ง่ายทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิต TPS สารที่นิยมใช้เป็น Plasticizer ในการผลิต TPS ได้แก่ กลีเซอรอล [1]

อย่างไรก็ดีพลาสติกที่ผลิตจาก TPS มีข้อจำกัดที่สำคัญสองประการ คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ (Poor mechanical properties) และไม่ทนน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติทั้งสองด้านของ TPS ให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยม ได้แก่ การดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี และการผสม TPS กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ แต่วิธีการเหล่านี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนักอีกทั้งองค์ประกอบบางไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติหรืออาจย่อยสลายได้ยาก ต้นทุนในการจัดการสูง

ขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust) เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด เป็นของเสียในโรงงาน แต่ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลายประการ ขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่มีหมู่พอลิฟีนอลซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ขี้เลื่อยจากต้นพอบลาร์ และต้นเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ดี ขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวที่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกดูดซับนิกเกิลและปรอทได้ [4]

ไม้แอสวูด (Ash wood) โดยทั่วไปเป็นไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods) หนัก แข็งแรง แข็งเหนียว และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูง กระพี้มีสีเหลืองอ่อนจนเกือบขาว แก่นสีแปลผันจากน้ำตาลเทา, น้ำตาลอ่อน จนเป็นสีเหลืองอ่อนมีแนวลายไม้สีน้ำตาล โดยทั่วไปเรียก “แอสวูดอ่อน”, “แอสวูดเหนียว” ไม้แอสวูดมีแรงคัดและสมบัติการตกแต่งดีเยี่ยม เหมาะแก่การมาทำเฟอร์นิเจอร์ เพราะมีความสวยงามใช้งานง่าย [5]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเติมเส้นใยฝ้ายลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและลดการดูดซับน้ำลง [6] และเนื่องจากองค์ประกอบหลักที่เหมือนกันของเส้นใยฝ้ายและขี้เลื่อยคือเซลลูโลส ดังนั้นจึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา ภายใต้แนวความคิดที่จะปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้แอสวูดที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ภาพรวมของงานวิจัยจะเกี่ยวข้องกับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อย โดยศึกษาผลของขนาด

ได้แก่ มากกว่า 50, 50-100 , 100-200 และน้อยกว่า 200mesh และปริมาณอนุภาคของขี้เลื่อยได้แก่ 0, 2.5, 5, 7.5 และ10% ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การดูดซับน้ำ การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch)

1.2.2 เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้แอช

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง เช่น สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การดูดซับความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.2 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของขี้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

1.3.3 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ ดังนี้

1.3.3.1 สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing machine)

1.3.3.2 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซับน้ำ (Water absorption) และ การดูดความชื้นในบรรยากาศ

1.3.3.3 สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyser (TGA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้

1.3.3.4 สันฐานวิทยา ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3.5 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR

1.3.3.6 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลได้

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ซีลีเนียมได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถผลิตเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีสมบัติดีพอจะนำไปใช้งานได้

1.5.2 นำเอาวัสดุเหลือทิ้งอย่างซีลีเนียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าได้

1.5.3 ส่งเสริมการนำวัสดุจากธรรมชาติมาทดแทนการใช้วัสดุจากการสังเคราะห์ที่ก่อให้เกิดมลพิษและย่อยสลายได้ยาก

1.5.4 เป็นการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แป้ง

2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแป้ง [7]

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต (Homopolysaccharide) ที่พบมากในพืช และแป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืช พบทั้งในใบ ลำต้น ราก ผล และเมล็ด แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด มีขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้ง ชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีโครงสร้างโมเลกุล ขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งได้จากหัวของมันฝรั่ง แป้งข้าวโพดได้จากเมล็ดของข้าวโพด เป็นต้น แป้งในกระบวนการผลิตนั้นจะหมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีสิ่งเจือปนจำพวกไขมัน โปรตีน เกลือแร่อยู่ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งยังไม่มีกระบวนการสกัดเอาไขมันและโปรตีนออก จะเรียกแป้งพวกนี้ว่า “Flour” เช่น แป้งข้าวโพด (Corn flour) แป้งสาลี (Wheat flour) แป้งข้าวเจ้า (Rice flour) เป็นต้น ส่วนแป้งที่มีกระบวนการสกัด โปรตีนและไขมันออกแล้วให้เหลือเพียงแต่ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตจะเรียกว่า “Starch” ซึ่งแป้งสตาร์ชนี้จะมีความบริสุทธิ์สูงมาก จึงมักถูกนำมาใช้ผลิตเป็นแป้งดัดแปร (Modified starch) เพื่อปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีลักษณะที่ดีขึ้น เช่น กรรมวิธีในการผลิตแป้งดัดแปรประเภท Pregelatinized starch ของข้าว เพื่อให้รูปทรงของเม็ดแป้งมีรูปทรงกลม ทำให้แป้งมีคุณสมบัติการไหลดี แป้งประเภทนี้สามารถใช้ในทางเภสัชกรรม เช่น เป็นส่วนประกอบในการผลิต ยาเม็ด หรือ มีการดัดแปรโดยใช้สารเคมี เช่น Starch phosphate และ Starch acetate สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำให้อาหารข้นขึ้น (Food thickening) หรือใช้เป็น Emulsifier

2.1.2 องค์ประกอบภายในแป้ง [7]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของ

หน่วยกลูโคส กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง แป้งเกิดจากกลูโคสจำนวนหลายพันโมเลกุลมาต่อกัน มีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาว และกิ่งก้านสาขา แป้งประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด และทั้งสองชนิดมีหน่วยย่อยเป็นกลูโคส แต่มีมวลโมเลกุลและโครงสร้างต่างกัน พอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดในแป้ง ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ในแป้งมีอะไมโลส ประมาณ 10-30% และอะไมโลเพคตินประมาณ 70-90% โดยกลูโคสต่อกันเป็นโซ่ยาว 12 ถึง 25 โมเลกุล จะแตกกิ่งครั้งหนึ่ง และส่วนที่เป็นโซ่กิ่งมีกลูโคสต่อกัน 20 ถึง 25 โมเลกุล อะไมโลเพคตินประกอบด้วยกลูโคส 2000 – 200000 โมเลกุล นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “Intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

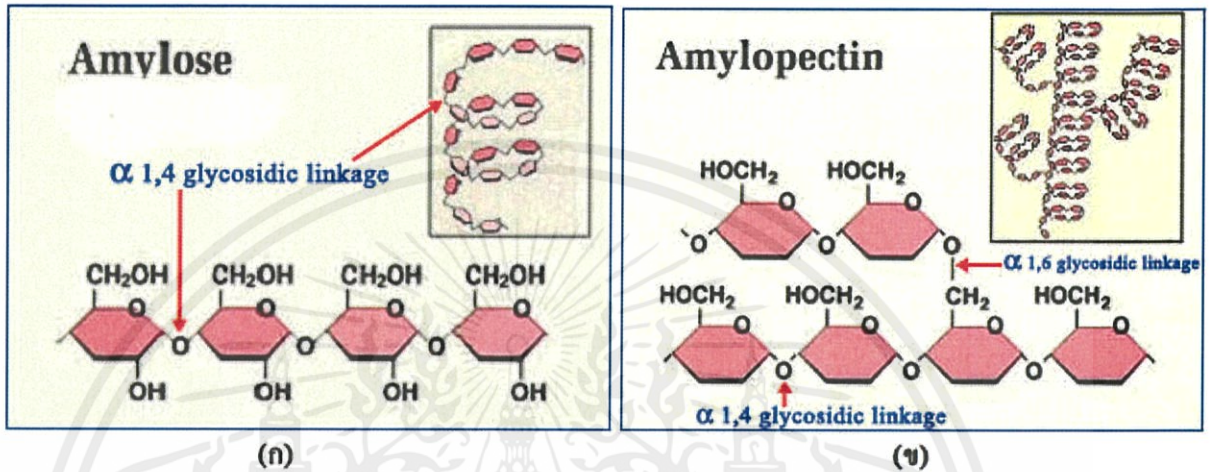
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [8]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นโซ่ยาวเส้นตรง ไม่มีกิ่ง ไม่มีการขดเป็นเกลียว	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นโซ่ยาวที่มีกิ่งก้าน
ขนาดโมเลกุล	มีขนาดเล็ก (200-2,000 หน่วยกลูโคส)	มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส)
พันธะที่เชื่อมโยง	พันธะ α -1,4	พันธะ α -1,4 และพันธะ α -1,6
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
การจับตัว	ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

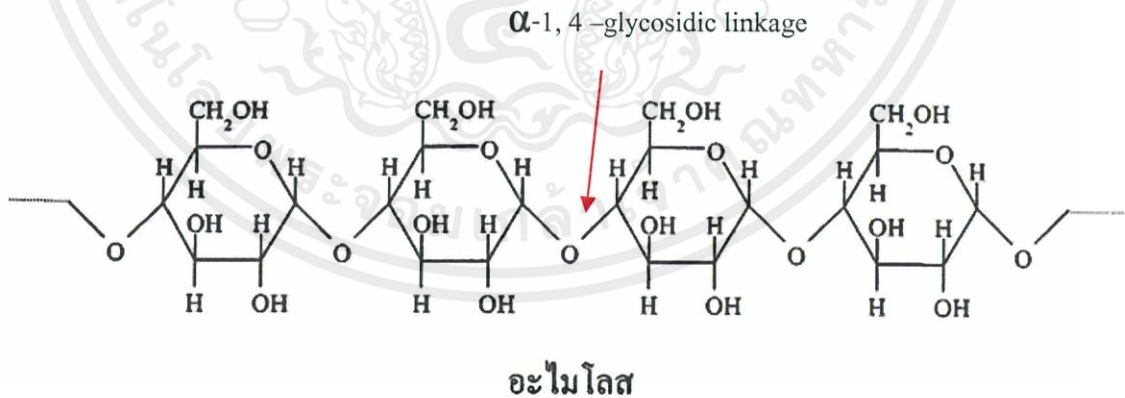
- อะไมโลส (Amylose)
- อะไมโลเพคติน (Amylopectin)
- สารมัธยันต์ (Intermediate material)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ (ก) แอลฟาอะไมโลส (α -Amylose) (ข) อะไมโลเพคติน (Amylopectin)[9]

2.1.2.1 อะไมโลส (Amylose) [8]

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 –glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย [7]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแบ่งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูจะมีปริมาณ อะไมโลสต่ำกว่าคือ อยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106

คาดค้น โดย อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ปริมาณของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [11]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลสที่ปรากฏ (% น.น. แห้ง)	ปริมาณอะไมโลสที่แท้จริง (% น.น. แห้ง)
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
พุทธรักษา	43.2	22.7
ถั่วเขียว	37.9	30.7

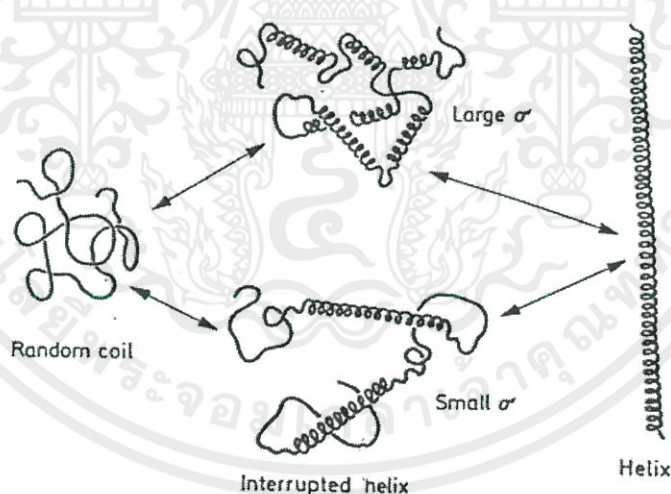
อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น Butanol, Fatty acid, Surfactant, Phenol และ Hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง (ตารางที่ 2.3) ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [12]

Chain length (glucose unit)	Number of helix turns	color
12	2	None
12-15>	2	Brown
20-30	3-5	Red
35-40	6-7	Purple
>45	9	Blue

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random Coil) ดังรูปที่ 2.3 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจมีบางส่วนละลายได้ และโมเลกุลอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวคู่ที่แข็ง [13]



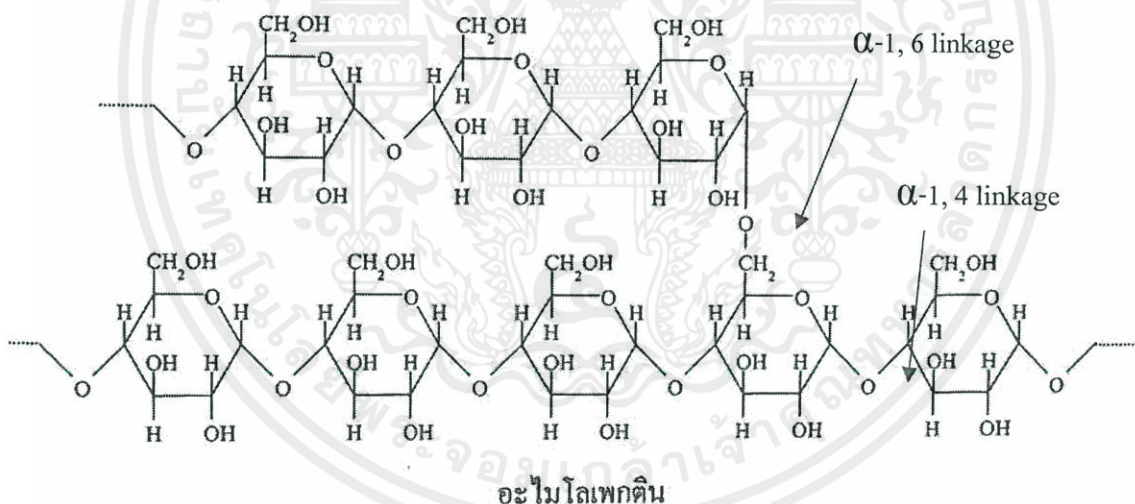
รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [13]

การตรวจสอบปริมาณอะไมโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและวัสดุที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวน ผลการวัดจากอะไมโลเพคติน โดยเฉพาะอะไมโลเพคตินที่มีความยาวสายโซ่กึ่งมาก ๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกันทำให้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะไมโลสอยู่เดิมจะทำให้อะไมโลสโมเลกุลนั้นจับ

กับไอโอดีน ไม่ได้ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้ต้องทำการสกัดไขมันออกก่อนการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส อาจใช้วิธีการวัดเอนทัลปีในการหลอมเหลวของ Starch-lipid complex แต่ประสิทธิภาพของวิธีการนี้จะขึ้นกับความสามารถในการละลายของอะไมโลสในตัวอย่างแบ่งแต่ละชนิด วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่า คือ การใช้ Gel Permeation Chromatography (GPC) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้ก็มีการใช้ High pressure size exclusion chromatography [14] ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกวิธีการคือการใช้ concanavalin A หรือ สารไมโตเจน ซึ่งเป็นสารที่สามารถกระตุ้นให้ลิมโฟไซต์เกิดการแบ่งตัวได้มาตกตะกอนอะไมโลเพคติน ออกไปและวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสที่เหลืออยู่

2.1.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin) [8]

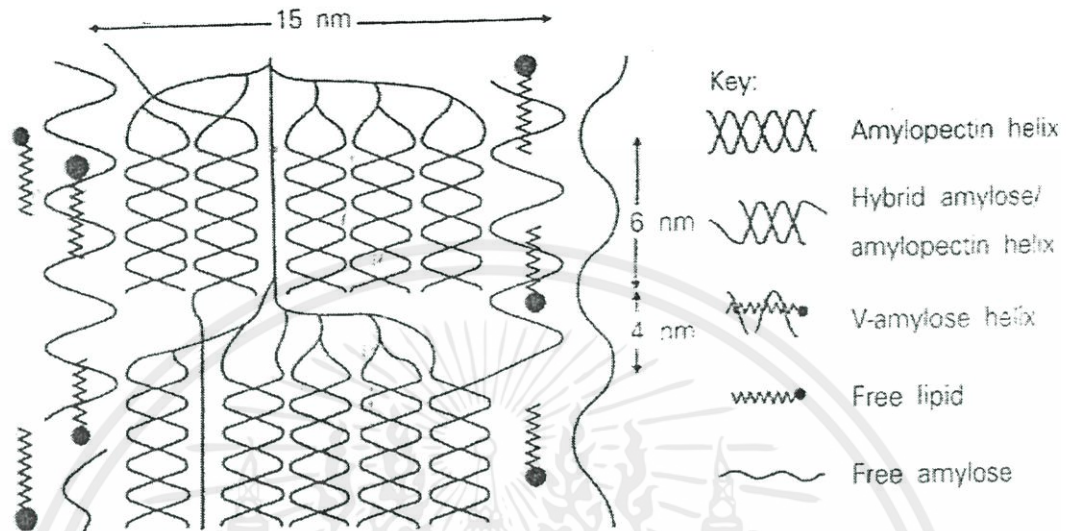
อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [10]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส และมีการกินตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

แบบจำลองของโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินและ Monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งคังรูปที่ 2.5 อะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินเป็นเกลียวคู่ (Double helix)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินและไขมัน [7]

2.1.2.3 สารมัธยันต์ (Intermediate material)

สารมัธยันต์เป็นสารที่มีเพียงส่วนน้อยในแป้ง องค์ประกอบของสารมัธยันต์นี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลสและอะไมโลเพคติน สารมัธยันต์มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่ง เช่นเดียวกับอะไมโลเพคติน แต่จะมีกิ่งก้านที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และสารมัธยันต์ในเม็ดแป้งนั้นจะไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก

2.1.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

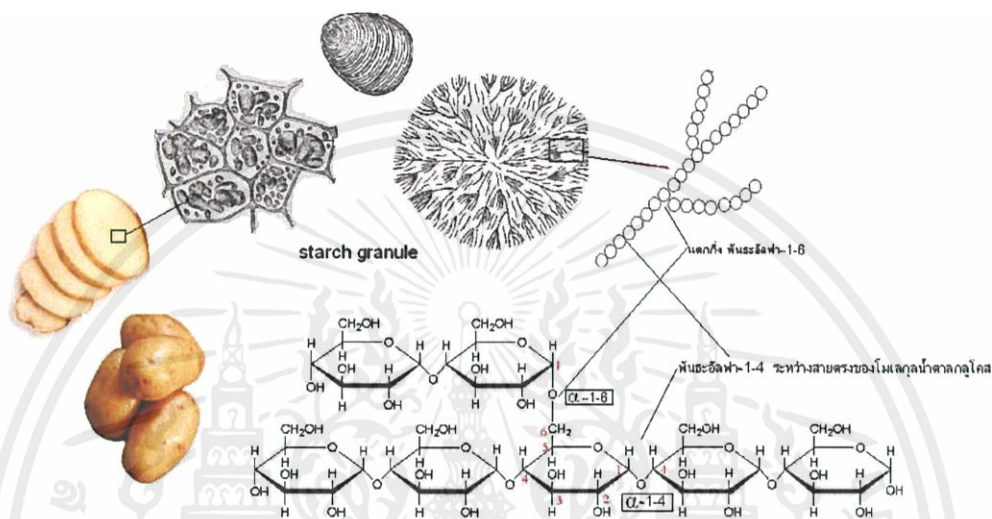
1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal material) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4. ส่วนประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน ฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

2.1.3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ช [15]

โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะอัดกันอยู่แน่นภายในเม็ดสตาร์ช ดังรูปที่ 2.6 ขนาดของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในสตาร์ชชนิดต่างๆ ซึ่งแสดงจากระดับในการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerisation, DP) เฉลี่ย รวมทั้งปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพกติน ดังแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดสตาร์ชจากธัญพืช [20]

ตารางที่ 2.4 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [6]

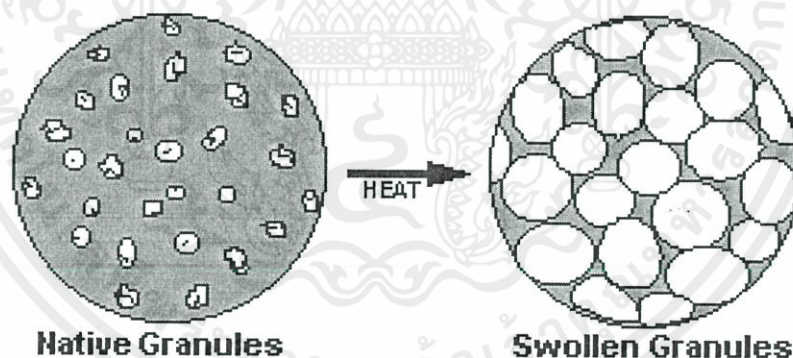
แหล่งของสตาร์ช	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	ปริมาณอะไมโลเพกติน (ร้อยละ)	ขนาด โมเลกุล (DP) เฉลี่ยของ	
			อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ข้าวเจ้าชนิด อินดิกา (Indica)	17	83	1,000	4,700
จาโปนิกา (Japonica)			1,100	12,800
ข้าวเหนียว	1	99	-	-
ข้าวโพด	28	72	930	8,200
มันสำปะหลัง	17	83	2,600	-
มันฝรั่ง	21	79	4,900	9,800
ข้าวสาลี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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 สมบัติของแป้ง

2.1.4.1 การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility) [17]

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วนที่มีความเป็นผลึกโมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของอสัณฐานซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วนของอสัณฐานจับกับน้ำได้มากขึ้นและ การจับกันของโมเลกุลในส่วนที่มีความเป็นผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.7) โมเลกุลในส่วนที่มีความเป็นผลึก ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแห เรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วนที่มีความเป็นผลึกที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและ โมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น



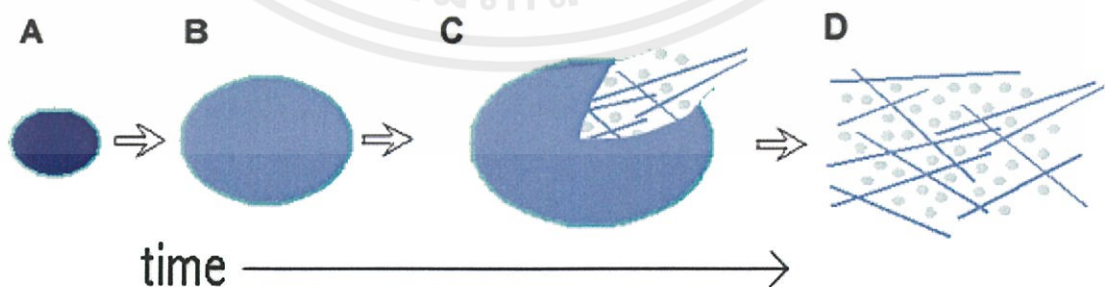
รูปที่ 2.7 การพองตัวของเม็ดแป้ง [17]

2.1.4.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) [18]

การเจลาตินในซ์ (Gelatinization) คือ ปรากฏการณ์ของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง (Starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง สายพอลิเมอร์ของอะไมโลส (Amylose) และเส้นการค้ำไม่ว่าอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัว และรวมเข้ากับน้ำที่ล้อมรอบไปใช้

ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏเม็ดแป้งพองตัว และความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาธิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ในส่วนที่เป็นผลึกจะจับตัวกันอย่างหนาแน่น แข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบ และมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60°C แก่แป้งสาธิตจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีความเป็นผลึกลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาตินในเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างของส่วนที่มีความเป็นผลึกที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาตินในซีไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 °C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาตินในซีได้ก่อนขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน แป้งอาจเกิด Gelatinized ได้ที่อุณหภูมิ 25°C โดยการละลายใน Solvent เช่น Alkali, Liquid ammonia, DMSO, Aq. CaCl₂



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ 2.8** การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [19] ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

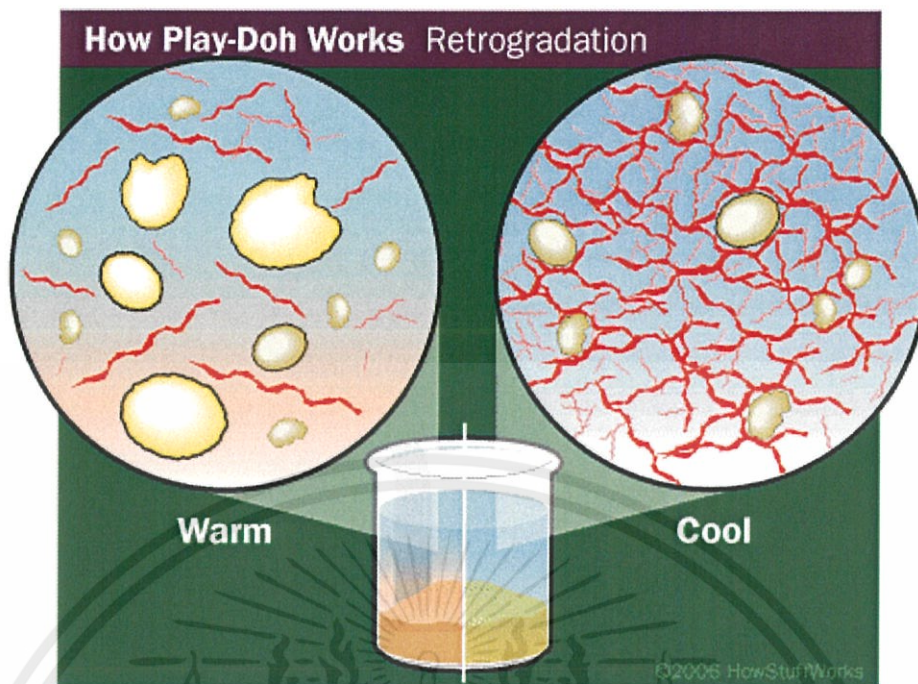
1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous)
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อผลึกที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ Double helical region เกิดการแตกออกของโครงสร้างผลึก สายโซ่ด้านข้างของอะไมโลเพกตินที่แยกตัวออกมาจะถูกไฮเดรต และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิดไฮเดรชันต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของ โมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของ โมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งแตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจล (Kofler gelatinization temperature) ($^{\circ}\text{C}$) ของแป้งชนิดต่างๆ [20]

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิการเกิดเจล ($^{\circ}\text{C}$)
แป้งข้าวโพด	62-73
แป้งมันสำปะหลัง Dominican	58.5-70
แป้งข้าวสาลี (Wheat)	58-64
แป้งข้าวเจ้า	68-78
แป้งมันเทศ	58-72
แป้งปาล์มสาธุ	60-72
แป้งท้าวยายหม่อม	62-70

2.1.4.3 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) [21]

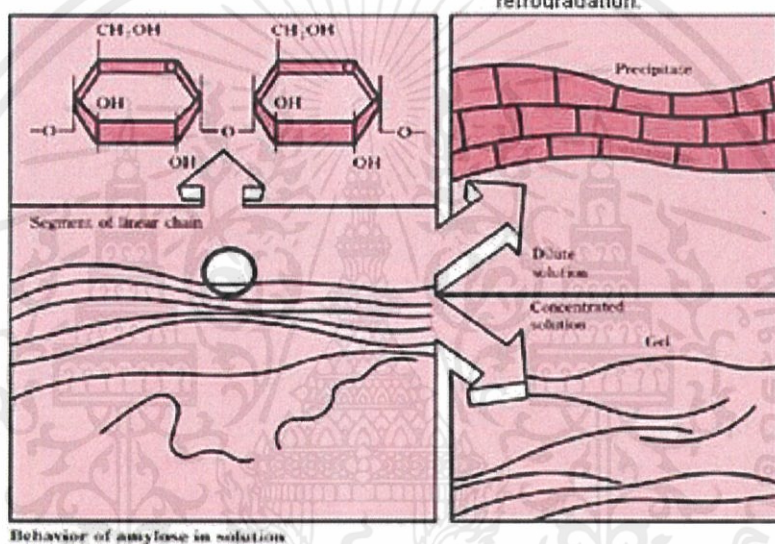
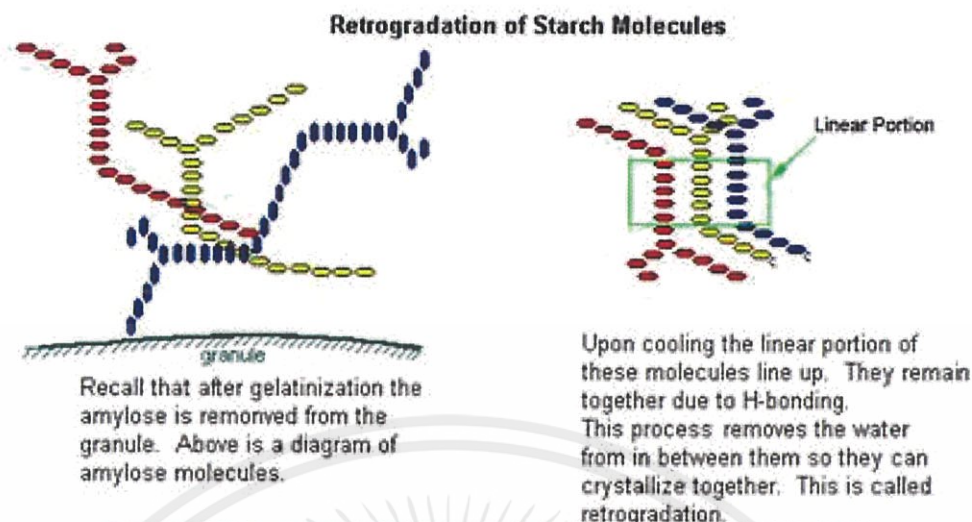
การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) สามารถเกิดได้ทั้งในเจลและสารแขวนลอย ซึ่งจะมี ความเข้มข้นสูง เมื่อถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็นผลึกเล็กๆ จากการรวมกลุ่มของโมเลกุล แป้งที่แน่นมากขึ้น และตกตะกอน ทำให้สมบัติของเจลเปลี่ยนไป ปัจจัยสำคัญของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ อุณหภูมิกับขนาดและรูปร่างโมเลกุลของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดการคืนตัวของแป้งสุกได้เร็วสุดจะอยู่ที่ช่วง 0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.9 การเกิดการคืนตัวของแป้งสุก [22]

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิแตกต่างกันขณะที่อุณหภูมิตกลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลส ซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 2.10) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



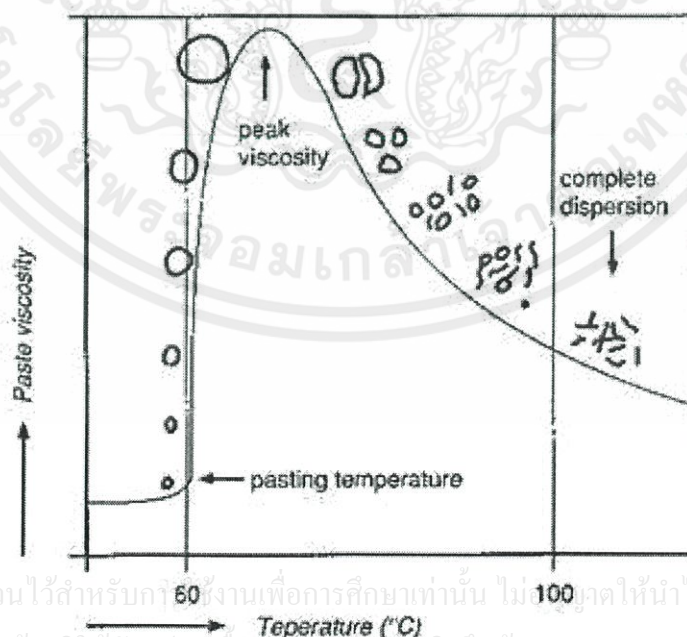
รูปที่ 2.10 การคืนตัวของแป้ง [21]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้คือน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก/หัวมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเมื่อดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยกที่โมเลกุลอะไมโลส จะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เมื่อดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คล้ายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น Matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกัก ยกที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงน้อยกว่าแป้งชนิดอื่นขนาด

โมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการกั้นตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.1.4.4 ความหนืด (Viscosity) [23]

เป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.11) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือ โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน บางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้น ความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของ โมเลกุลแป้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [21]

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ Shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ชนิดของแป้ง

2.1.4.5 การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ [24]

แป้งเป็นอาหารหลักของมนุษย์และสัตว์ซึ่งได้จากการบริโภคส่วน ราก ลำต้น และหัวของพืช ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ โดยโมเลกุลของแป้งเกิดจากการเชื่อมต่อกันของกลูโคสด้วยพันธะ α -1,4 และ α -1,6-glycosidic ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แป้งทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ โดยมีเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase และ α -glucosidase) ซึ่งเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์พันธะ α -1,4-กลูโคซิดิกของแป้ง ทำหน้าที่หลักในการย่อยแป้ง การย่อยแป้งจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์เพียงใดและได้ผลิตภัณฑ์อะไรนั้น ขึ้นอยู่กับความจำเพาะของเอนไซม์ในระบบการย่อยอาหารแป้งจะเริ่มถูกย่อยในปากซึ่งมี pH ในช่วง 6.2-7.4 โดยเอนไซม์ α -amylase จากนั้นจะผ่านกระเพาะอาหารและเข้าสู่ลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum) ซึ่งมี pH ในช่วง 7-8 แป้งจะเริ่มถูกย่อยอีกครั้งหนึ่งด้วยเอนไซม์ α -amylase ที่ผลิตจากตับอ่อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยคือ Dextrin, maltotriose, Maltose และ Glucose ไคแซคคาไรด์และโอลิโกแซคคาไรด์จะถูกย่อยต่อด้วยเอนไซม์ α -glucosidase ที่อยู่บนเยื่อรับฮอร์เตอร์ ซึ่งจะตัดกลูโคสครั้งละหนึ่งหน่วยโดยเริ่มจากปลาย non-reducing เข้าไป ส่วนแป้งที่ยังเหลืออยู่ จะผ่านลงไปที่ปลายของลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ ซึ่งอาจจะถูกย่อยสลายต่อด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในลำไส้ [25]

2.1.5 แป้งมันสำปะหลัง [26]

2.1.5.1 ประวัติความเป็นมาของมันสำปะหลัง [26]

มันสำปะหลัง เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญพืชหนึ่งที่เกษตรกรนิยมปลูกมาก เป็นพืชอาหารที่ใช้เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต ถ้าพิจารณาจากปริมาณการผลิตพืชอาหารทั่วโลกมันสำปะหลังอยู่ในอันดับที่ 5 รองมาจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวและมันฝรั่ง เป็นพืชอาหารที่สำคัญของประเทศในเขตร้อน โดยเฉพาะในทวีปแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชียบางประเทศ เช่น อินโดนีเซีย อินเดีย และฟิลิปปินส์ ซึ่งปลูกมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการบริโภคโดยตรง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกง่าย มีแมลงและศัตรูพืชไม่มาก มันสำปะหลังเป็นพืชอุตสาหกรรมกว่าร้อยละ 70 ใช้ทำมันเส้น

และอัดเม็ด ส่วนร้อยละ 30 ที่เหลือนำมาแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้ปีละหลายหมื่นล้านบาท

2.1.5.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ [27]

มันสำปะหลังมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. หรือ *Manihot utilissima* Pohl. อยู่ในตระกูล Euphorbiaceae เป็นไม้พุ่มเตี้ย อายุหลายปี

ราก มันสำปะหลังมีรากน้อยและอยู่ไม่ลึกจากผิวดิน มีราก 2 ชนิด คือ รากจริงและรากสะสมอาหาร ที่เรียกกันทั่วไป หัวมีปริมาณแป้งประมาณ 15–40 % มีกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) หรือ กรดพรัสซิก (Prussic acid) ซึ่งมีพิษ มีอยู่มากในส่วนของเปลือกมากกว่าเนื้อของหัว การแช่น้ำ การต้ม จะทำให้กรดระเหยไป

ลำต้น มีลักษณะเป็นข้อๆ ซึ่งเป็นรอยที่ก้านใบร่วงหลุดไป สีของลำต้นส่วนยอดจะเป็นสีเขียวส่วนทางด้านล่างอาจมีสีน้ำตาล หรือ สีม่วงแดงขึ้นอยู่กับพันธุ์

ใบ เป็นใบเดี่ยว ใบแยกเป็นแฉกคล้ายใบปาล์มมีสีเขียว ก้านใบอาจมีสีเขียว หรือสีแดง บางพันธุ์ใบจะมีสีเหลือง หรือขาว หรือใบด่างที่ใช้เป็นไม้ประดับ

ดอก มันสำปะหลังมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกตัวผู้จะอยู่ทางส่วนปลายของช่อดอกมีขนาดเล็กกว่าดอกตัวเมีย มีกลีบดอก 5 กลีบ มีสีเหลืองหรือมีลายแดง ผลและเมล็ด ในแต่ละผลจะมี 3 เมล็ด เมล็ดจะมีสีเทาหรือลายจุดดำ



รูปที่ 2.12 ลักษณะของต้นมันสำปะหลัง [28]

2.1.5.3 ชนิดและสายพันธุ์ [27]

พันธุ์ มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. **พันธุ์ที่ใช้ประดับ** นิยมปลูกตามบ้านเพื่อความสวยงาม เนื่องจากใบมีแถบสีขาวและเหลืองกระจายไปตามความยาวของใบจึงเรียกว่า มันต่าง และยังมีพันธุ์อีกชนิดหนึ่งเป็นพันธุ์ป่า มีลักษณะเป็นไม้พุ่มขนาดกลางถึงใหญ่ใช้ปลูกเพื่อให้ร่มเงาพบบนแถบจังหวัดชลบุรีและระยอง

2. **พันธุ์ชนิดหวาน** พันธุ์นี้จะใช้หัวเป็นอาหารมนุษย์โดยเชื่อม ต้ม ปิ้ง หรือเผา ไม่มีรสขม เนื่องจากมีปริมาณ ไฮโดรไซยานิก (HCN) ต่ำ ที่พบในบ้านเรามี 3 พันธุ์ ได้แก่ มันสวน มันห่านาที่หรือก้านแดงและระยอง 2 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่กรมวิชาการเกษตรปรับปรุงขึ้นมาใช้สำหรับทอดเป็นแผ่นบางเช่นเดียวกับ Potatochips

3. **พันธุ์ชนิดขม** เป็นพันธุ์ที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกสูง ต้องนำไปแปรรูปก่อนเพื่อผลิตเป็นมันเส้น มันอัดเม็ด และแป้ง แต่เดิมปลูกพันธุ์เดียวคือพันธุ์ดั้งเดิมที่มีผู้นำเข้ามาในประเทศไทยเป็นเวลานาน ผ่านการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้จึงจัดเป็นพันธุ์พื้นเมือง เช่น พันธุ์ระยอง 1, 3, 5, 60, 90 พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และ พันธุ์ห้วยบง 60 การจำแนกสายพันธุ์ใช้คุณลักษณะหลายอย่างช่วยในการจำแนกเช่น สีของใบอ่อน สีก้านใบ สีลำต้น ขนที่ยอดอ่อน ลักษณะทรงต้น หูใบ

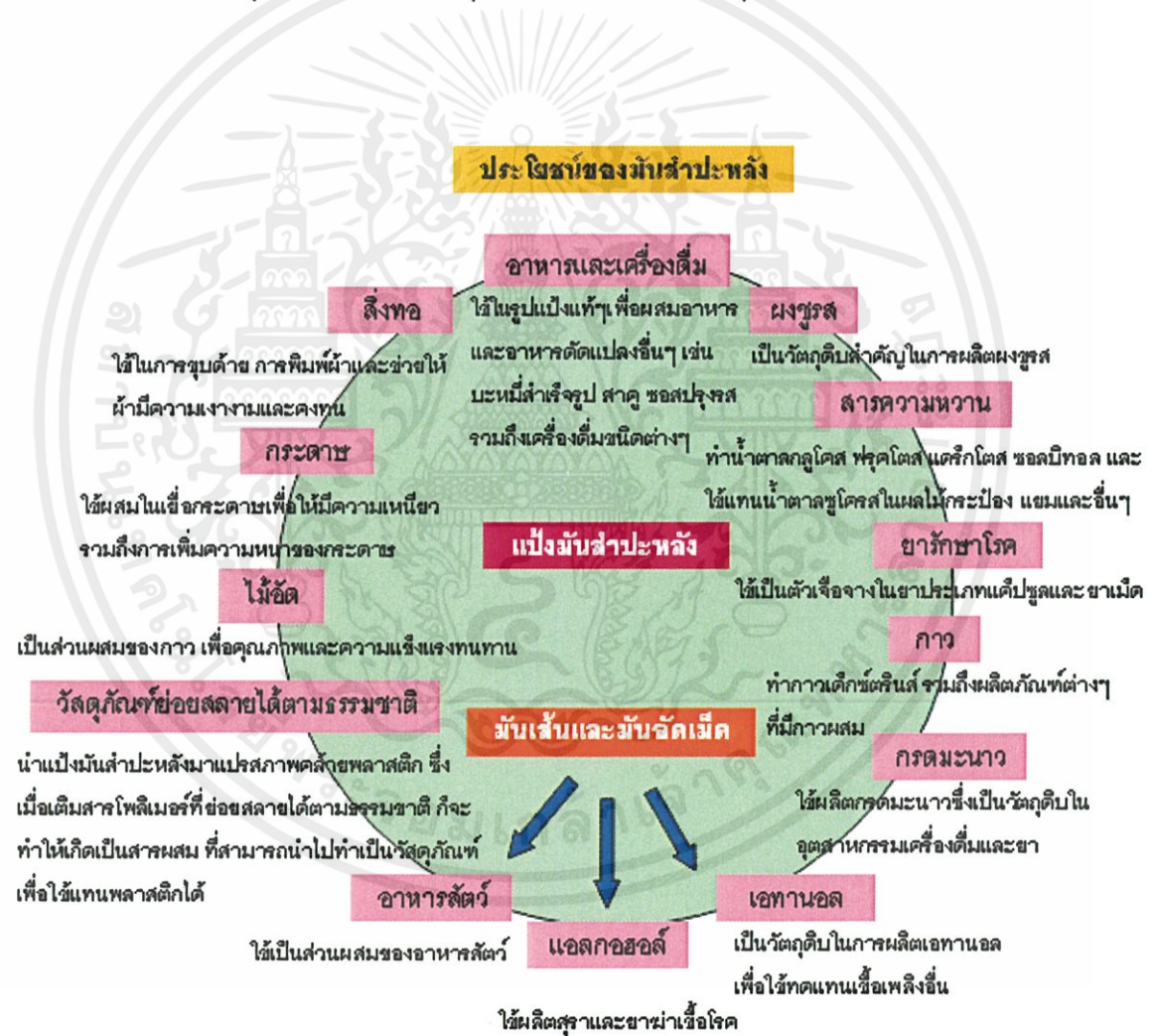
2.1.5.4 การใช้ประโยชน์ [29]

1. ใช้เป็นอาหารมนุษย์ โดยนำหัวสดไปต้ม นึ่ง ปิ้ง เผา หรือเชื่อม สำหรับประเทศที่บริโภคมันสำปะหลังเป็นอาหารหลักจะมีวิธีการปรุงแต่งโดยเฉพาะ เช่น Gari อาหารของชาวไนจีเรีย หรือ Bononoka ของชาวมาดากัสกา นอกจากนี้ยังนำแห้งมันสำปะหลังไปปรุงเป็นอาหารทั้งคาวและหวานอีกหลายชนิด

2. ใช้เป็นอาหารสัตว์ ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในรูปแบบมันเส้นและมันอัดเม็ด ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ส่งออกทั้งหมด เพื่อการเลี้ยงสัตว์ของประเทศในกลุ่มประชาคมยุโรปสำหรับการเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยใช้มันสำปะหลังน้อยมาก แม้ว่ามันสำปะหลังสามารถใช้เลี้ยงสัตว์ทุกชนิด แต่ผู้ใช้จะต้องปรับสูตรอาหารให้เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์แต่ละชนิด

ข้อดีของการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์คือราคาถูกและยังไม่เคยพบสาร Aflatoxin จึงปลอดภัยต่อการบริโภค แต่มีข้อเสียบ้างที่ว่า การใช้มันสำปะหลังต้องป่นให้ละเอียดและต้องผสมกากน้ำตาลซึ่งวิธีการผสมค่อนข้างยุ่งยาก

3. ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่จะนำแป้งดิบ (Native starch) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปอื่นๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ผงชูรส และไลซีน สารให้ความหวานเช่น Glucose, Dextrose, Sorbital, Manitol, Inositol และสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เช่น สารคอลลอยด์ (Polymer) พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพ ผลิตภัณฑ์โพรเซียม ผลิตภัณฑ์ Flexible foam สำหรับทำที่นอนและเฟอร์นิเจอร์ ผลิตภัณฑ์ Rigid foam เพื่อการบรรจุหีบห่อและตกแต่งภายใน นอกจากนี้ยังนำไปผลิตแป้งแปรรูป (Modified starch) โดยการนำเอาแป้งดิบมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของแป้งให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมเฉพาะอย่างเช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมทำกาวและอุตสาหกรรมแอลกอฮอล์



รูปที่ 2.13 ประโยชน์ของแป้งสาลี [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.5 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Native Tapioca Starch) [31]

การผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Native Tapioca Starch) มีดังนี้

การรับและตรวจสอบคุณภาพหัวมันสำปะหลัง

หลังจากที่หัวมันสำปะหลังส่งมายังโรงงานและผ่านการชั่งน้ำหนัก และการสุ่มตัวอย่าง นำมาวัดความหนาแน่น เพื่อปริมาณของแป้งในหัวมัน โดยอาศัยหลักการลอยตัว (Bouyancy) ของวัตถุในของเหลวแล้วจึงเข้ากระบวนการแปรรูปดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ: คือการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง และปอกเปลือก ร่อนดินทราย ใช้รถดัก ป้อนหัวมันสำปะหลังสู่ถังป้อน (Root Hopper) สายพานลำเลียง (Belt conveyor) จะพาหัวมันเข้าสู่เครื่องร่อนดินทราย (Root Siever) เป็นการทำความสะอาด เพื่อทรายและหินที่ติดมากับมันสำปะหลัง ด้วยการร่อน (Sieve) และทำให้ผิวหน้าของหัวมันหลุดออก สับแยกเหง้า (Chopping) เพื่อแยกเหง้า ของหัวมันสำปะหลังออกซึ่งแข็งเป็นอุปสรรคในการโม่หัวมัน

2. โม่หัวมัน (Rasping): หลังจากมันสำปะหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วจะถูกนำเข้าสู่เครื่องโม่หัวมัน (Root Chopper) ก่อนเพื่อสับเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว จากนั้นเข้าเครื่องโม่ (Rasper) เพื่อบดหัวมันพร้อมเติมน้ำให้สามารถโม่ได้ง่ายขึ้น ได้มันบดมีลักษณะเป็น ของเหลวข้น (Middle Fresh Pulp) ที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และ สารอาหารต่างๆ รวมทั้งสิ่งเจือปนต่างๆ

3. เครื่องแยกกากหยาบ (Coarse Extractor): เครื่องแยกกากจะทำการแยกกากมันสำปะหลัง ที่ไม่ได้ใช้ในกระบวนการผลิตออกจากน้ำแป้ง โดยน้ำแป้งที่ได้จากเครื่องโม่หัวมัน จะมาผ่านเครื่องแยกกากหยาบ 2 ครั้ง กากหยาบที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้จะถูกส่งต่อไปยังโรงอัดกาก

4. เครื่องแยกกากละเอียด (Fine Extractor): น้ำแป้งภายหลังจากผ่านเครื่องแยกกากหยาบ มาแล้วนั้น ยังมีเยื่อของมันสำปะหลังหรือกากอ่อนรวมอยู่ในน้ำแป้ง ซึ่งจะทำให้ น้ำแป้งที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นน้ำแป้งภายหลังจากผ่านเครื่องแยกกากหยาบมาแล้ว จะถูกนำมาผ่านเครื่องแยกกากละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

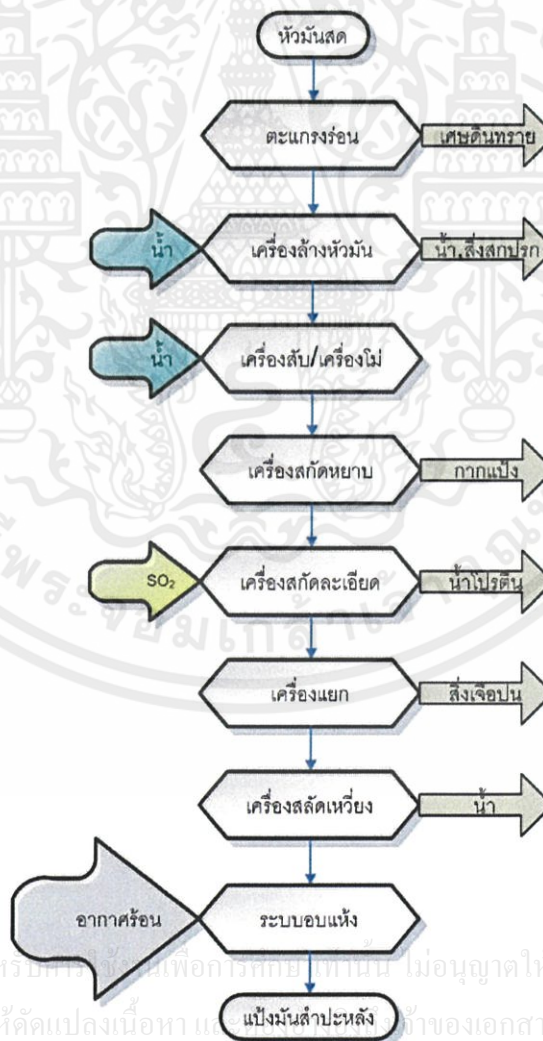
5. น้ำแป้ง 20 โบเม: น้ำแป้งที่ผ่านกระบวนการแยกกากละเอียด จะถูกนำมาปรับความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ โดยการผ่านเครื่องแยกน้ำ (Separator) 2 ครั้ง ซึ่งจะทำให้ น้ำแป้งที่ผ่านกระบวนการนี้ จะมีความเข้มข้นประมาณ 20 โบเม

6. เครื่องสกัดแป้ง (Centrifuge): น้ำแป้งที่ได้จะไหลเข้าสู่เครื่องสกัดแป้ง ซึ่งจะทำการแปรสภาพน้ำแป้งเป็นแป้งหยาบ โดยแป้งหยาบจะถูกส่งเข้าไปใน 2 กระบวนการผลิตคือ การผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Tapioca Starch)

7. เครื่องอบแห้ง (Flash Dryer): แป้งหยาบจะถูกลำเลียงตามสายพานเข้าสู่เครื่องอบแห้ง เพื่อผ่านลมร้อน ทำให้แป้งหยาบมีความชื้นลดลง จากนั้นก็จะทำให้เย็นลง แล้วส่งผ่านไปตามไซโลไปยังเครื่องร่อนแป้ง ซึ่งปัจจุบันเครื่องอบแห้งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง

8. เครื่องร่อนแป้ง (Sieve): แป้งที่ผ่านเครื่องอบแห้งมานั้น จะถูกนำมาผ่านเครื่องร่อนแป้ง เพื่อคัดขนาดเม็ดแป้ง ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

9. เครื่องบรรจุแป้ง: แป้งที่ผลิตได้จะถูกนำมาบรรจุใส่ถุงขนาด 25, 50, 500 หรือ 1000 กิโลกรัม แล้วแต่คำสั่งของลูกค้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้เพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

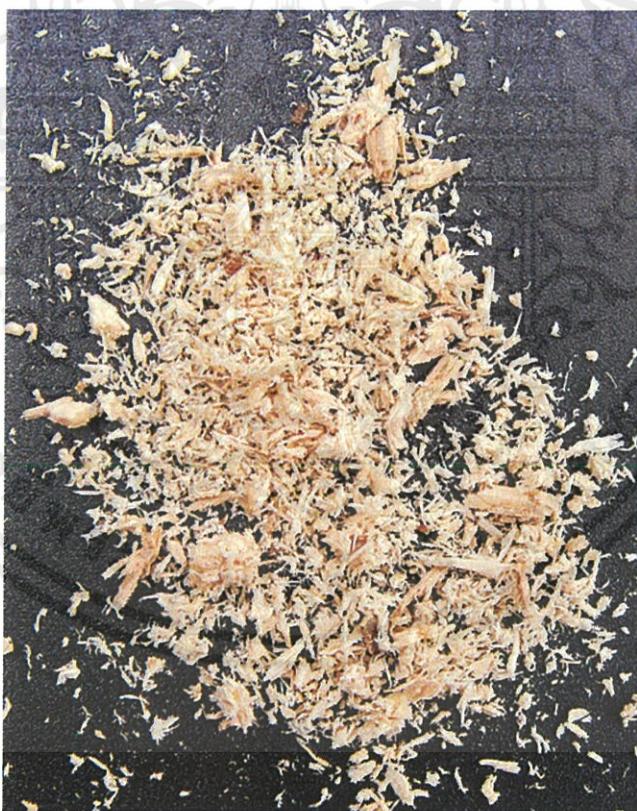
รูปที่ 2.14 กระบวนการในการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [31]

2.2 ขี้เลื่อย

2.2.1 ความหมายและลักษณะของขี้เลื่อย [32]

ขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust) เป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด เป็นของเสียดในโรงงานที่เป็นพิษ โดยเฉพาะการทำให้เกิดอาการอักเสบทางทางเดินหายใจ แต่ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลายประการ [33]

ขี้เลื่อย มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่มีหมู่โพลีฟีนอลซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ขี้เลื่อยจากต้นพอบลาร์และต้นเฟอร์ ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ดี ขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวที่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก ดูดซับนิกเกิลและปรอทได้



รูปที่ 2.15 ลักษณะของขี้เลื่อยที่เกิดจากการเลื่อยด้วยมือ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ไม้แอส (Ash wood) [34]

2.2.2.1 ลักษณะทั่วไปของไม้แอส

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Fraxinus americana* (Oleacea) พบมากทางฝั่งตะวันออกของทวีปอเมริกาเหนือเป็นไม้ขนาดใหญ่ หนัก แข็งแรง แข็ง เหนียว เนื้อไม้มีสีชาวครีม ไปจนถึงสีน้ำตาลอ่อน

ไม้แอสที่เรานำมาใช้กัน มี 2 ชนิด คือ ไม้แอสเนื้อแข็ง (ไม้แอสเนื้อแข็งจากทางเหนือ) กับ Swamp Ash (ไม้แอสเนื้ออ่อนจากทางใต้) [35]

ไม้แอสเนื้อแข็ง (ไม้แอสเนื้อแข็งจากทางเหนือ Northern Hard Ash) จะมีเนื้อที่แข็ง หนัก และแน่นกว่า มีความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงของเนื้อไม้ ทำให้ไม้ชนิดนี้เป็นที่นิยมมาก เนื้อไม้แท้มีสีครีม แต่ก็มีบ้างที่จะออกเป็นชมพูหรือสีน้ำตาลอ่อนจางๆ (หรือที่เรียกว่า ฮาร์ทวูด) เนื้อไม้ค่อนข้างหยาบ มีร่องเสี้ยนไม้และรอยตาไม้ค่อนข้างเยอะ จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการอุตสาหกรรมไม้มากกว่าไม้อื่นๆ ทำให้ต้องใช้เวลามากในการทำสีพื้นผิว

Swamp Ash (ไม้แอสเนื้ออ่อนจากทางใต้) นั้น มีน้ำหนักเบา ทำให้เป็นจุดที่แตกต่างจากไม้แอสเนื้อแข็งจากทางเหนืออย่างชัดเจน และด้วยเนื้อไม้ธรรมชาติที่มีลายไม้ชั้นชัดเจนสีครีม ทำให้เป็นไม้ที่เหมาะสมมาก สำหรับทำสีแบบใสมองทะลุเห็นเนื้อไม้ นอกจากนี้ยังเป็นไม้ที่สวยงาม และนับเป็น ไม้ยอดนิยมนำดับสอง



รูปที่ 2.16 ลักษณะของต้นแอสเนื้อแข็ง [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูตัวอย่างเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 สมบัติพิเศษ และการใช้งานของไม้แอซ

สมบัติพิเศษของไม้แอซ คือ มีความเหนียวและแข็งแรงเป็นพิเศษ สามารถทนต่อแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี ไม้หนัก แข็งแรง แข็งเหนียว และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูง กระทั่งมีสีเหลืองอ่อนจนเกือบขาว แก่นสีแปรผันจากน้ำตาลเทา, น้ำตาลอ่อน จนเป็นสีเหลืองอ่อนมีแนวลายไม้สีน้ำตาล โดยทั่วไปเรียก “แอซอ่อน”, “แอซเหนียว” ไม้แอซมีแรงดัดและคุณสมบัติการตกแต่งดีเยี่ยม เหมาะแก่การมาทำเฟอร์นิเจอร์ เพราะมีความสวยงามใช้งานง่าย [37]

การใช้งานของไม้แอซ ไม้แอซมีลวดลายเด่นชัดสวยงาม มีเนื้อไม้ที่ดูสะอาดตา ปัจจุบันจึงนิยมนำมาใช้ผลิตเฟอร์นิเจอร์เป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะสร้างชิ้นงานได้หลายรูปแบบแล้ว ยังมีความสวยงาม และทนทานมากกว่าไม้ชนิดอื่น ๆ ด้วย [38]



รูปที่ 2.17 ลักษณะไม้แอซ [39]



รูปที่ 2.18 เฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากไม้แอซ [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) [41]

พลาสติกย่อยสลาย (Degradable plastic) คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ ซึ่งสามารถวัดการย่อยสลายได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [40]

2.3.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [42]

โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โพลีเมอร์ ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสิต หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอฟิลินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรอกไซด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อไปในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ* (Biomass)

*มวลชีวภาพหมายถึง มวลรวมของสสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิตและเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมถึงพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

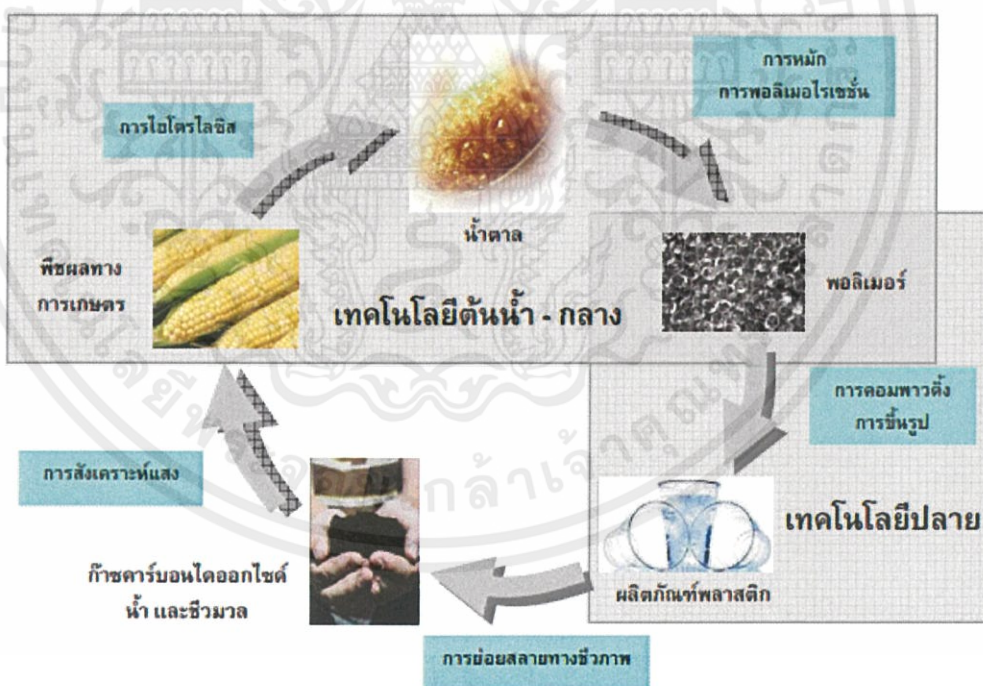
นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้

เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

2.3.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ [43]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเทอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น



รูปที่ 2.19 วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร [44]

2.3.2.1 พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch-based plastics)

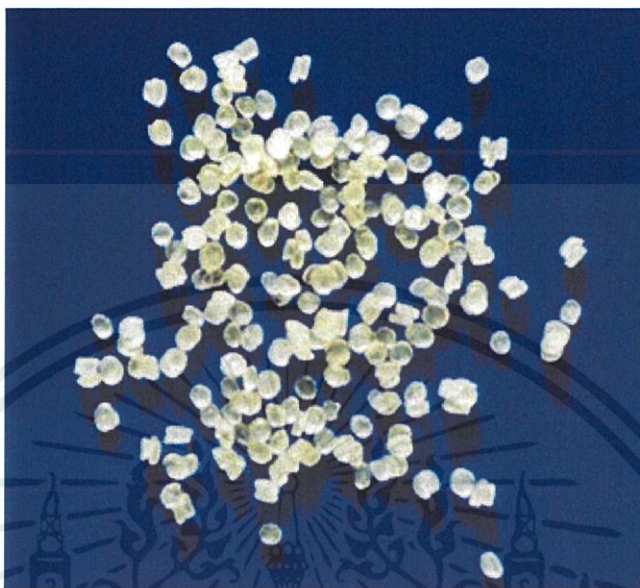
แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งประกอบด้วย 2 โมเลกุลหลัก ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบสายโซ่ตรงที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบกิ่งที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความยาวเฉลี่ยระหว่าง 500 และ 2,000 หน่วยย่อยกลูโคส

พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานอาจมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 90 แต่พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ต้องมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป โดยที่ปริมาณแป้งยิ่งมากขึ้นส่งผลให้พลาสติกสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดีขึ้น และทิ้งสารตกค้าง (recalcitrant residues) ปริมาณน้อยลง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานส่วนใหญ่ถูกผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมรรถนะสูง (High-performance polymers) (เช่น พอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรง และ PVA) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะ และเหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานสามารถจำแนกได้หลายประเภท ได้แก่ แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (TPS) แป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA, PCL, PBS, Poly(Butylenes succinate adipate) (PBSA) และ แป้งผสม PVA เป็นต้น

2.3.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS)

เทอร์โมพลาสติก หมายถึงพอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนตัวและหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อทำให้เย็นลงก็จะสามารถแข็งตัวและคงรูปร่างได้ พลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ภาชนะและชิ้นส่วนรูปทรงต่างๆ ได้ การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย อย่างไรก็ตามหากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) ได้สารที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) เม็ดพลาสติก

TPS (รูปที่ 2.20) ที่ผลิตได้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น



รูปที่ 2.20 ลักษณะเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ [44]

ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยได้ง่ายทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิต TPS สารที่นิยมใช้เป็น Plasticizer ในการผลิต TPS ได้แก่ กลีเซอรอล เนื่องจาก TPS สามารถหลอมตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและแรงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้ TPS เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจาก TPS มีข้อจำกัดที่สำคัญสองประการ คือมีสมบัติเชิงกลต่ำ (Poor mechanical properties) และไม่ทนน้ำ งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งสองด้านของ TPS ให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่ การตัดแปร โครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี และการผสม TPS กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ บริษัทที่เป็นผู้นำในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งที่สำคัญได้แก่ บริษัท

เป็นต้น

การนำไปใช้งานของแป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก [43]

เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ (TPS) จะถูกนำไปใช้งานในรูปของ

- แผ่นฟิล์ม เช่น ถุงต่างๆ
- ฟิล์มสำหรับหีบห่อในรูปโฟมกันกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

- ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยการฉีด เช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 2.6 ประเภทของพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ [45]

ประเภทของพลาสติก	รายละเอียด
<p>แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Starch)</p>	<p>1. การคอมพาวด์</p> <p>-TPS มีปริมาณแป้ง (อะไมโลส) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเจลาติน (Gelatinized starch) โดยทั่วไปแป้งมักถูกเติมสารเติมแต่ง เช่น สารปรับสภาพพลาสติก (Plasticizer) ถูกตัดแปรรูป โครงสร้าง และหรือผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่มีประโยชน์และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน และการย่อยสลายทางชีวภาพ</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>-TPS สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป</p>
<p>แป้งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง</p>	<p>1. การคอมพาวด์</p> <p>-โดยทั่วไปมักมีการใช้พอลิเอสเทอร์ประมาณร้อยละ 50-60 ผสมกับแป้ง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และมีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยให้ขึ้นรูปง่ายขึ้น</p> <p>-แป้งที่ผสมกับพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ เช่น PLA และ PCL ได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแป้งร้อยละ 45 ผสมกับ PCL มีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยส่วนใหญ่ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวเพียง 60 องศาเซลเซียส และเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 40</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอื่นใดของเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

	<p>องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน</p> <p>-PBS และ PBSA เป็นพอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาผสมกับแป้ง เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล จากการวิจัยพบว่าแป้งที่ผสม PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก จะมี Tensile strength ต่ำกว่า ที่มี PBSA อย่างเดียว และ Tensile strength จะต่ำลง เมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว และสมบัติในการขึ้นรูป</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>-แป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง มักใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแผ่นหรือฟิล์มพลาสติกคุณภาพสูง โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดเป็นแผ่นฟิล์ม การเป่าฟิล์มบาง และการขึ้นรูปด้วยความร้อน</p>
<p>แป้งผสม PVA</p>	<p>1. การคอมพาวด์</p> <p>-มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมต่อการใช้งาน</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>-แป้งผสม PVA มักนำไปขึ้นรูปโดยการอัดรีดหรือเป่าเป็นแผ่นฟิล์ม หรือการทำเป็นโฟม</p>

2.3.3 สมบัติของพอลิเมอร์ [46]

นอกเหนือจากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพแล้ว TPS บางเกรดยังสามารถละลายในน้ำอีกด้วย ด้วย PBSA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและแสดงสมบัติทางเทอร์โมพลาสติกดีมาก จากการวิจัยพบว่าแป้งผสม PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก จะมี Tensile strength ต่ำกว่าที่มี

PBSA อย่างเดียว และ Tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อย เมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและสมบัติในการขึ้นรูป

2.3.4 ความสามารถในการย่อยสลาย [47]

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาที่ต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น มีกฎข้อบังคับ รวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

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

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

- ISO 472:1998 – Biodegradable plastics are plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastics and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- BPS Japan (1994) – Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ
- DIN FNK103.2 (1993) – A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation arc to be determined by standardized test methods. วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน
- CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/ หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับคำว่า biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก biotic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สมีเทนและน้ำ

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานจะเกิดขึ้นที่ตัวเชื่อมไกลโคซิดิกระหว่างโมเลกุลน้ำตาล โดยเอนไซม์ ทำให้ความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และง่ายต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวเคมี สำหรับพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 60 อนุภาคแป้งจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานอย่างอ่อนๆ ในเนื้อพลาสติกและเป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลาย ซึ่งพลาสติกจะแตกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เท่านั้น แต่จะไม่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ข้อมูลทางวิชาการเท่านั้น
 จากการศึกษาการทดสอบการฝังกลบ พบว่า แป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรง สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8 สัปดาห์ และจากการวัดปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์จากการทดสอบ โดยการฝังกลบ พบว่า การเติมปริมาณแอมโมเนียร้อยละ 5 ลงใน PBSA จะทำให้พลาสติกถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกที่มี PBSA อย่างเดียว

PVA ไม่มีสมบัติในการละลายน้ำ ดังนั้นการย่อยสลายของพลาสติกที่ผลิตจากแป้งผสมกับ PVA จึงเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายทางชีวภาพของโมเลกุลน้ำตาล

2.3.5 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [48]

2.3.5.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณการหาน้ำหนักแห้ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_d คือ คาร์บอนที่ถูกย่อยสลาย

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

2.3.5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือลักษณะทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่

มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2.3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

(ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังกินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้างนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ใช้สำหรับการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว โดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก ซึ่งจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ จึงพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป และมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีการเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังกินไว้ 6 เดือนมาตรวจสอบปริมาณในโตรเจน พบว่าปริมาณในโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% ซึ่งเกิดจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือ จุลินทรีย์เจริญเติบโตและสร้างโคโลนีอยู่บนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

2.3.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของ โมเลกุล หรือกลุ่มอะตอมใน โมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะของแถบที่เกิดเฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์ สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแป้งที่หายไปในช่วงการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของ

พอลิเมอร์ ที่รู้เหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.3.5.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

2.3.5.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัตถุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30×120 มิลลิเมตร เตรียมหลายตัวอย่าง แล้วนำไปฝังดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือน ให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 3 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างกระจายไปกับดิน และทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิมพ์ชนก แสงนิติเดช และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เริ่มจากการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำการเตรียมแป้งข้าวเจ้ากับกลีเซอรอลผสมเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียสและ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) พบว่าเส้นใยฝ้ายมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากนั้นปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยการใส่สารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีน ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นชัดเจนกว่าการใช้สารคู่ควบไวนิล ไตรเมทอกซีไซเลน แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า ในส่วนของสถาบันวิทยาเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนและสารคู่ควบไวนิล ไตรเมทอกซีไซเลน ทำให้เมทริกซ์ของแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนหรือไวนิล ไตรเมทอกซีไซเลน

กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ [49] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากแป้งชนิดต่างๆ (TPS) โดยการนำแป้งและกลีเซอรอลผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเทคนิคการอัดเข้าแม่พิมพ์ โดยในการทดลองใช้แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว ผสมกับกลีเซอรอลด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนัก รวมถึงศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS ด้วยการเติมผงแคลบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.250-0.355 มม. และ 0.038-0.150 มม. ผสมกับแป้งในอัตราส่วนผงแคลบ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่า TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล 15% โดยน้ำหนัก มีค่า Tensile strength มากที่สุด และการเติมผงแคลบขนาด 0.038-0.150 มม. ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก ทำให้ TPS มีค่า Tensile strength และ Impact strength สูงขึ้น

สุกสิทธ์ ผู้มีโชคชัย [50] ได้ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปรและไม้คัดแปรกับพอลิพรอพิลีน โดยแป้งมันสำปะหลังคัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ไซโตลิม ไสโตรค ไสค์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการคัดแปร คือ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 2 ชั่วโมง แล้วนำแป้งมัน

ลำปะหลังทั้งที่ตัดแปรและไม่ได้ตัดแปรมาผสมกับพอลิพรอพิลีนและขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จนไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ และเมื่อปริมาณแป้งเป็น 0-50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงคดโค้ง การดูดซึมความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

ปนัดดา พวงเกษม [51] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบริโกลจากแป้งมันสำปะหลัง และทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ผลิตได้เพื่อหาแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ที่สามารถทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติก ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีสมบัติเหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ โดยเตรียมได้จากน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไซเซเซอร์ แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะปรากฏ คือ สี ฟ้าเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร และมีสมบัติทางกลดังต่อไปนี้ ค่าการต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร การยืดตัวร้อยละ 10.13 และความทนทานต่อการพับ 45 ครั้ง ส่วนสมบัติด้านการซึมผ่านพบว่า มีค่าการซึมผ่านของออกซิเจน 6 มิลลิเมตร มิลลิเมตรต่อตารางเมตร ต่อ 24 ชั่วโมงต่อบรรยากาศ การซึมผ่านของไอน้ำ 0.37 กรัม มิลลิเมตรต่อตารางเมตรต่อ 24 ชั่วโมงต่อมิลลิเมตรปรอท และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต้านทานน้ำมันได้ 120 วัน ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ และหมักคิดได้ด้วยความร้อนจึงสามารถนำมาทำเป็นถุ โดยมีค่าความแข็งแรงของตะเข็บ 19.07 นิวตันต่อ 25 มิลลิเมตร เมื่อบรรจุเครื่องปรุงระหมีกึ่งสำเร็จรูปรสต้มยำพบว่า มีอายุการเก็บรักษานาน 22 เดือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยไม่มีแสงส่องผ่าน และละลายในน้ำดื่มเดือดภายใน 5 นาที ส่วนการเคลือบผิวสตรอเบอร์รี่ เบบี้แครอต และมะเขือเทศด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง สามารถช่วยยืดอายุการเก็บได้

ธนิตา ปะบุญเรือง [52] ได้ศึกษาและทดลองผลิตวัสดุบรรจุหีบห่อที่สลายตัวได้ โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์หลักและผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ได้ฟิล์มทดสอบการสลายตัวของฟิล์มเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยการนำฟิล์มไปตากแดดนอกอาคารและฝังดิน ในขณะที่การสลายตัวทางชีวภาพกระทำโดยการทดสอบด้วยเชื้อรา *Aspergillusniger* และ *penicillium pinophilum* ติดตามความก้าวหน้าของ การสลายตัวโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟิล์มตัวอย่าง โดยวัดค่าความต้านทานแรงดึงค่าการยืดเมื่อขาด ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ย โดยการวัดความหนืด ฟิล์มที่ผสมแป้งในปริมาณมากมีอัตราการสลายตัวสูง และมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยมากหลังการตากแดด 6 เดือน จากการนำฟิล์มนี้ไป ตากแดดและฝังดินไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญกับ

ฟิล์มพอลิเอทิลีนส่วนฟิล์มที่ผสมสาร Prooxidant มีการสูญเสียสมบัติดังกล่าวมากกว่าฟิล์มที่ปราศจาก prooxidant การสลายตัวทางชีวภาพด้วยเชื้อราที่มีความสัมพันธ์ โดยตรงกับสมบัติที่ลดลงในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้ง

ธีระพงษ์ บัวศรี และคณะ [53] ได้ทำการพัฒนาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลให้มีความอ่อนไหวต่อความชื้นลดลง โดยการเคลือบผิวเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วย Fatty acids (stearic acid, behenic acid, linoleic acid, oleic acid), Chitosan และ Chitosan derivatives โดยวิธีการที่ใช้ในการเคลือบผิว คือ Solution dipping ในการทดสอบสมบัติความอ่อนไหวต่อการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิว ซึ่งจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เคลือบผิวมีการดูดความชื้นน้อยกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้เคลือบผิว โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย Chitosan และ Chitosan derivatives มีการยึดติดกันระหว่างสารที่นำมาเคลือบผิวกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้ดีกว่าชิ้นงานเทอร์โม-พลาสติกสตาโรลที่เคลือบด้วย Fatty acids แต่ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย Fatty acids มีการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เคลือบผิวด้วย Chitosan และ Chitosan derivatives หลังจากเก็บชิ้นงานไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วัน สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้เคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเคลือบผิว

ปิยะรัตน์ เรียวรักษา [54] ได้ศึกษาการเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยใช้แป้ง 2 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด โดยนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 70 : 30 โดยน้ำหนัก และผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวโพดในอัตราส่วน 70 : 30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วนำไปทดสอบสมบัติของผสมเหล่านี้ ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาด ได้ถูกตรวจสอบเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของของผสมของสารช่วยผสมหลายชนิด ได้แก่ กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต, ซิงค์สเตียเรต และอีโพลีน ได้ถูกเติมลงไปปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของของผสม สมบัติเชิงกลของของผสมแต่ละส่วนผสมได้ถูกเปรียบเทียบกับส่วนผสมเดียวกันที่ไม่มีสารช่วยผสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตหรือซิงค์สเตียเรตในของผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่าเมื่อมีอีโพลีนและสูงกว่าของผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมเลย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมอีโพลีนกลับทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวเมื่อขาดลดลง ในการเปรียบเทียบกับของผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวโพดที่ผสมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตและซิงค์สเตียเรตในลักษณะเดียวกัน พบว่าของผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังทุกส่วนผสม มีความต้านทานแรงดึง

และค่าการยึดตัวเมื่อขาดสูงกว่าของผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวโพด เมื่อมีกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตหรือซิงค์สเตียเรตอยู่ด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปได้แสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่บนพอลิเมอร์เมทริกซ์

Y. Lu และคณะ [55] ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลคอมโพสิตจากแป้งข้าวสาลีที่ผสมเส้นใยป่านรามิ โดยใช้ความยาว 538.5 ± 125.3 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 85.4 ± 25.3 นาโนเมตร เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยใช้ปริมาณเส้นใยที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 40% โดยน้ำหนักของแป้ง จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยสูงขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยบนเมทริกซ์ของแป้ง ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งเมื่อปริมาณเส้นใยสูงขึ้นทำให้คอมโพสิตมีสมบัติการดูดซับน้ำได้น้อยลง จึงกล่าวได้ว่า การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากเส้นใย ทำให้โครงสร้างของคอมโพสิตมีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ และมีแรงกระทำระหว่างพันธะไฮโดรเจนของเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้ง

L. Dobircan และคณะ [56] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวสาลีที่มีโปรตีนสูง โดยเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่มีความยาวระดับนาโนเมตรถึงมิลลิเมตร ซึ่งทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ปริมาณเส้นใยที่ใช้ คือ 0, 5, 7.5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก แล้วทำการผสมด้วยเครื่องความเร็วสูง จากนั้นทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อมีเส้นใยผสมมากขึ้น ทำให้สมบัติการดึงยืดลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ค่าการดึงยืดที่ได้ลดลง 78% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ผสมเส้นใย เนื่องจากเส้นใยที่มากขึ้นทำให้ความเหนียวลดลงจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และปริมาณเส้นใย 10% โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยกับเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ดี กระจายตัวดี และการกระจายแรงระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน ระหว่างแป้งกับเซลลูโลสที่อยู่ในเส้นใย จึงทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (Flax) พบว่าสมบัติเชิงกลเป็นไปในแนวเดียวกัน แต่ค่าความแข็งแรงดึงและค่าการดึงยืดสูงกว่าการใช้เส้นใยฝ้ายเสริมแรง เนื่องจากสภาวะการอัดรีดที่อุณหภูมิและความดันต่างกัน และผลของการระเหยของน้ำและกลีเซอรอลเป็นอีกส่วนหนึ่งเช่นกันที่ทำให้สมบัติของคอมโพสิตที่ได้แตกต่างกัน จากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของเส้นใยบนเมทริกซ์ ซึ่งพบว่าเส้นใยมีการกระจายตัวอยู่ทั่วเมทริกซ์ แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยที่มากเกินไป ทำให้เส้นใยเริ่มจับตัวกันเป็นก้อน จากการศึกษา

ปริมาณการใช้เส้นใยที่ 15% โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของเส้นใยเริ่มไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำลง จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใย ไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของคอมโพสิต โดยพีคที่ปรากฏมีลักษณะเส้นสเปกตรัมคล้ายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการผสมเส้นใย สำหรับสมบัติทางความร้อน ซึ่งวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า การผสมเส้นใยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน

A.A.S Curvelo และคณะ [57] งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการใช้เส้นใยเซลลูโลสจากยูคาลิปตัส เป็นสารเสริมแรงในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช วัสดุคอมโพสิตนี้เตรียมจากแป้งข้าวโพดกับกลีเซอริน เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสเส้นสั้น (16% w/w) จากเชื้อฟอกขาวใส่เส้นใยเข้าไปในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยตรงโดยใช้เครื่อง Intensive batch mixer ที่อุณหภูมิ 170°C ให้ความร้อนและกดอัดให้เป็นแผ่นหนา 2-3 มิลลิเมตร ตัดและเตรียมนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วย DSC และ TGA ทดสอบการดูดซับน้ำ ซึ่งคอมโพสิตนี้มีการความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 100% มอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้เสริมแรง จากการตรวจวัดด้วย SEM พบว่ามีการยึดติดกันได้ดีระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ผลที่ได้แสดงข้อดีในการใช้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส คือ มาจากธรรมชาติ ราคาถูก และเป็นวัสดุที่อยู่มาก

X. Ma และคณะ [58] เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมด้วยยูเรียและฟอร์มมาไมด์เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัวของแป้ง จาก SEM แสดงให้เห็นการกระจายที่ดีและการยึดเกาะระหว่างแป้งและเส้นใย จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าคอมโพสิตนี้เมื่อมีปริมาณเส้นใย 0-20% ความต้านทานแรงดึงสูงถึง 15.16 MPa ขณะที่ความสามารถในการดึงยืดลดลงจาก 105 ไปเป็น 19% แต่ที่ปริมาณน้ำที่มีอยู่สูง (>30%) ทั้งปริมาณน้ำและปริมาณเส้นใยที่มีอยู่ไม่มีผลต่อความแข็งแรงดึง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนี้มีสมบัติความเสถียรทางความร้อนและด้านการดูดซับน้ำที่ดี แต่จาก XRD แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตนี้ยังคงถูกจำกัดสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ปริมาณเส้นใยต่ำกว่า 20%

E.M. Teixeira และคณะ [59] ได้นำ Cellulose cassava bagasse nanofibrils (CBN) ที่สกัดโดยตรงจาก By-product ของแป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมมาศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของนาโนไฟเบอร์โดย SEM, TEM, กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และจากการตรวจวิเคราะห์ด้วย High performance liquid chromatography (HPLC), Thermogravimetric analysis (TGA) และ X-ray diffraction (XRD) แสดงให้เห็นว่านาโนไฟเบอร์มีความเป็นผลึกต่ำและพบว่ามีค่าความหนาที่ประมาณ 2-11 นาโนเมตรและมีความยาว 360-1,700 นาโนเมตร เส้นใยนาโนไฟเบอร์ที่ได้เหล่านี้นำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่มี

Plasticizer คือ Glycerol/Sorbitol (1:1) นาโนคอมโพสิตฟิล์มที่เตรียมจากเครื่องผสมระบบปิดและขึ้นรูปด้วยการกดอัด ที่ 140 องศาเซลเซียส ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย Dynamical mechanical tests (DMA) และทดสอบการดึงยืด พบว่าสมบัติขึ้นกับชนิดของ Plasticizer ที่ใช้ กรณีที่ใช้กลีเซอรอลทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแข็ง หลังจากการใส่ นาโนไฟเบอร์ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล การดึงยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับนาโนคอมโพสิตที่ใช้ Glycerol/Sorbitol เป็นพลาสติกไซเซอร์ การเกิด Transcrystallization ของอะไมโลเพกติน ที่พื้นผิวของนาโนไฟเบอร์ทำให้เกิดการขัดขวางการเป็นตัวเสริมแรงที่ดีของ CBN ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังทำให้ความแข็งแรงดึงต่ำกว่า นอกจากนี้การผสม CBN ทำให้การร่อนนำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลดลงในกรณีที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์มากกว่าในกรณีที่ใช้ Glycerol/Sorbitol เป็นพลาสติกไซเซอร์

K. Kaewtatip และคณะ [60] คอมโพสิตระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับเส้นใยบัว (Luffa fiber) ขึ้นรูปโดยการกดอัด (Compression molding) โดยใช้เส้นใยบัวในปริมาณ 0 wt.% - 20 wt.% จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงดึงยืดของคอมโพสิตที่ 10 wt.% ของเส้นใยบัวเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ใส่เส้นใย ส่วนอุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดของคอมโพสิตสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยบัวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้มีการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยบัวและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ดีเพราะโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นโดย Scanning electron microscope (SEM) micrographs และ Fourier transform infrared (FTIR) spectra

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แป้งมันสำปะหลัง ตรา ปลามังกรคู่ โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง [61]

รายละเอียด	ผลวิเคราะห์
แหล่งวัตถุดิบ	หัวมันสำปะหลัง
ลักษณะ	เป็นผง มีสีขาว
ปริมาณความชื้น (ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65% และ อุณหภูมิ 20 °C)	13%
ลิวิน	0.1%
โปรตีน	0.1%
เถ้า	0.2%
ฟอสฟอรัส	0.01%
รสชาติและกลิ่น	ต่ำ
อะไมโลส	17%
อะไมโลเพกติน	83%
องศาการเกิดพอลิเมอร์ของอะไมโลส (Amylose, Degree of Polymerisation : DP)	3000
องศาการเกิดพอลิเมอร์ของอะไมโลเพกติน ($\times 10^6$) (Amylopectin, Degree of Polymerisation : DP)	2
จำนวน โมเลกุลอะไมโลสต่อกรัมแป้ง ($\times 10^{20}$)	20
จำนวน โมเลกุลอะไมโลเพกติกต่อกรัมแป้ง ($\times 10^{17}$)	150
อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน	150
องศาการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ยของโมเลกุลแป้ง	18000
อุณหภูมิการสร้างพันธะ (°C)	65-70

(Pasting temperature)	
การบวมตัว (ที่ 95 °C)	71%
ความสามารถในการละลาย (ที่ 95 °C)	48%
จำนวนอนุภาคต่อกรัมแป้ง ($\times 10^6$)	500
ปริมาณแป้งเฉลี่ยต่อหนึ่งอนุภาค ($\times 10^{12}$)	4
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	4-35 ไมโครเมตร

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3. ซีลี้อยจากไม้แอซ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer): Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001

2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding): LABTECH ENGINEERING รุ่น PL 20

3. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine): LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K

4. เครื่องชั่งน้ำหนัก: Precisa Instrument: Scientific Promotion CO., Ltd รุ่น ED2245

5. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer, TGA): Perkin Elmer Instrument Co., Ltd รุ่น Pyris I TGA HT

6. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR): Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM): LEO รุ่น 1455VP

8. เครื่องร่อนแยกขนาดอนุภาค (Vibratory Sieve Shaker)

9. ตะแกรงร่อนขนาด 50 mesh, 100 mesh และ 200 mesh

10. เครื่องบดตัวอย่าง

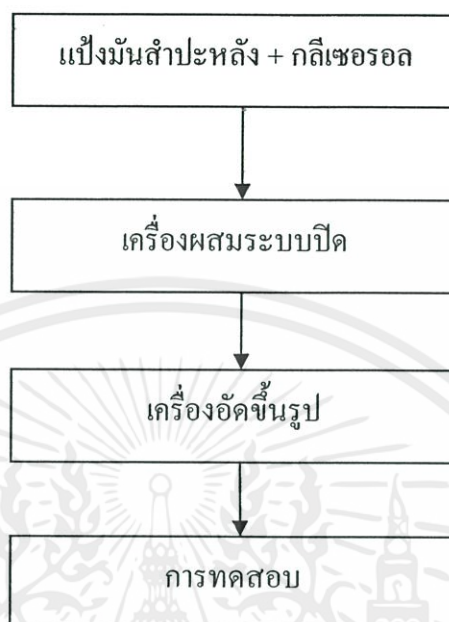
11. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ แสดงได้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2

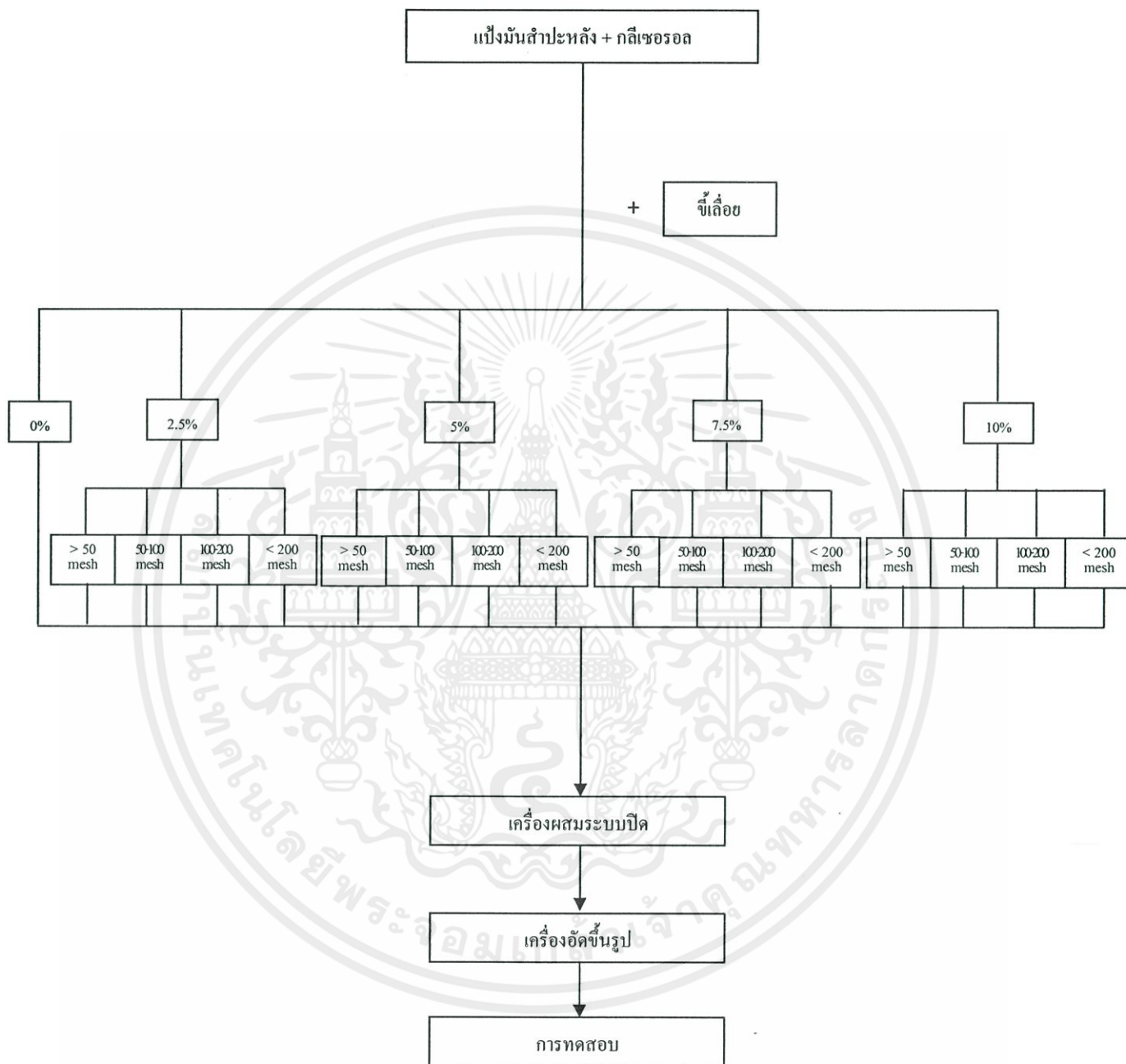
ตอนที่ 1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยซีลีเนียม
ไม้แอส



รูปที่ 3.2 แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยซีลีเนียมจาก

ไม้แอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.3.1.1 การเตรียมขี้เลื่อย

1. นำขี้เลื่อยจากไม้แฉะมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่มีอยู่ในขี้เลื่อย
2. นำขี้เลื่อยไปบดละเอียด เพื่อให้ขี้เลื่อยมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50, 100 และ 200 mesh ได้
3. นำขี้เลื่อยที่ผ่านการบดแล้วไปร่อนในตะแกรงร่อน โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 50, 100 และ 200 mesh ตามลำดับ ซึ่งตะแกรงร่อนที่อยู่ด้านบนสุด คือ ขนาด 50 mesh แล้วทำการเปิดเครื่องร่อน
4. หลังจากร่อนขี้เลื่อยแล้ว นำขี้เลื่อยมาแยกขนาดตามขนาดของตะแกรงร่อน โดยจะได้ขี้เลื่อยที่มีขนาดแตกต่างกันดังนี้ คือ ขนาด >50, 50-100, 100-200 และ <200 mesh ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวในช่วง >0.294, 0.294-0.149, 0.149-0.074 และ <0.074 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.3.1.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

1. นำแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลมาผสมให้เข้ากันด้วยมือ ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 3.2
2. เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในเนื้อแป้ง
3. จากนั้นนำของผสมมาผสมต่อในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140°C โดยใช้ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง

1. นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร
2. ทำความสะอาดแม่พิมพ์ แล้ววางแผ่นโพลีเอทิลีนลงไปในแม่พิมพ์ ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
3. วางเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลงในแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล คือ 140°C และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นต่ออีก 2 นาที
4. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปคัมเบล เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอส

1. นำแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลมาผสมให้เข้ากันด้วยมือ
2. เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในเนื้อแป้ง
3. นำขี้เลื่อยที่ได้จากการร่อนคัดขนาด แล้วมาผสมกับของผสมที่เตรียมได้ โดยใช้ขี้เลื่อยที่มีขนาดแตกต่างกัน ในปริมาณที่ต่างกัน ดังตารางที่ 3.2 แล้วผสมให้เข้ากันด้วยมือ
4. จากนั้นนำของผสมมาผสมต่อในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140°C โดยใช้ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นต่ออีก 2 นาที

5. นำเทอร์โมพลาสติกที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอล และปริมาณของขี้เลื่อยที่มีขนาดแตกต่างกัน ในขั้นตอนการผสมก่อนนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด

สูตรที่	อัตราส่วน แป้งมันสำปะหลัง : กลีเซอรอล (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณของขี้เลื่อย (%)	ขนาดของขี้เลื่อย (mesh)
1	70 : 30	0	0
2	70 : 30	2.5	>50
3	70 : 30	2.5	50-100
4	70 : 30	2.5	100-200
5	70 : 30	2.5	<200
6	70 : 30	5	>50
7	70 : 30	5	50-100
8	70 : 30	5	100-200
9	70 : 30	5	<200
10	70 : 30	7.5	>50
11	70 : 30	7.5	50-100
12	70 : 30	7.5	100-200
13	70 : 30	7.5	<200
14	70 : 30	10	>50
15	70 : 30	10	50-100
16	70 : 30	10	100-200
17	70 : 30	10	<200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่ได้

1. สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่เตรียมได้ [62]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Elongation at maximum load)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ แรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 638	Shore A

1.1 แรงดึง, ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุดมอดุลัส, การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์ การดึงยืด ณ แรงดึงสูงสุด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซึ่งานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 5 KN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [62]

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด, มอดุลัส และ เปอร์เซ็นต์ การดึงยืด ณ แรงดึงสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) = F/A

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

การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Elongation at maximum load)

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

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L_0 คือ ระยะทางที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

2. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 [63] นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไป

อบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปวางในบรรยากาศที่อึมตัวของที่

อึมของในห้องเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้น้ำกลั่น (Distilled water) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 99%

โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น
 W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ
 W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

3. การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [64]

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20×50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยการฝังดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิในการย่อยสลาย $32 \pm 2^\circ\text{C}$ ควบคุมความชื้นที่อยู่ในดินให้อยู่ในช่วง 20-30% ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ตกลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน

4. การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

5. สมบัติทางความร้อน

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสียดสภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$ ในช่วงอุณหภูมิ $50-600^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศไนโตรเจน

6. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างไปให้ความร้อนจน

อ่อนตัวจนกระทั่งเป็นแผ่นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ไล่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำไปวิเคราะห์ จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

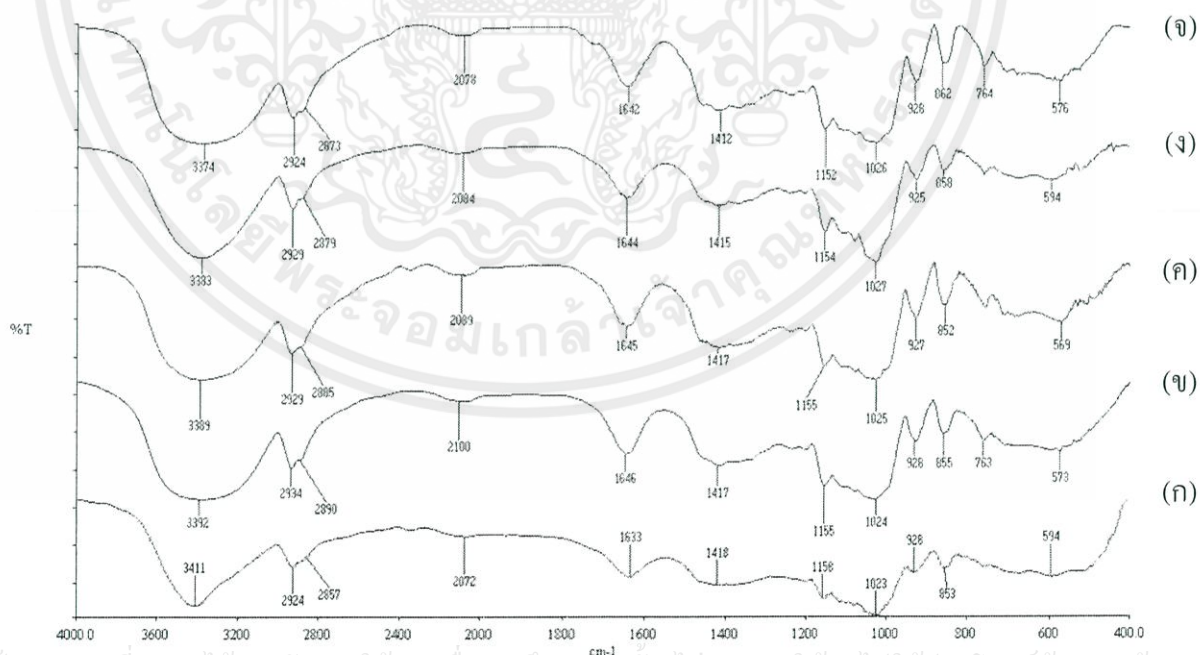
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์หาค่าหมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หาค่าหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้ซีลีอียจากไม้แอสที่มีขนาดอนุภาคและปริมาณที่ต่างกัน

4.1.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียจากไม้แอสที่มีปริมาณต่างกัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีอียจากไม้แอสที่มีปริมาณต่างกัน

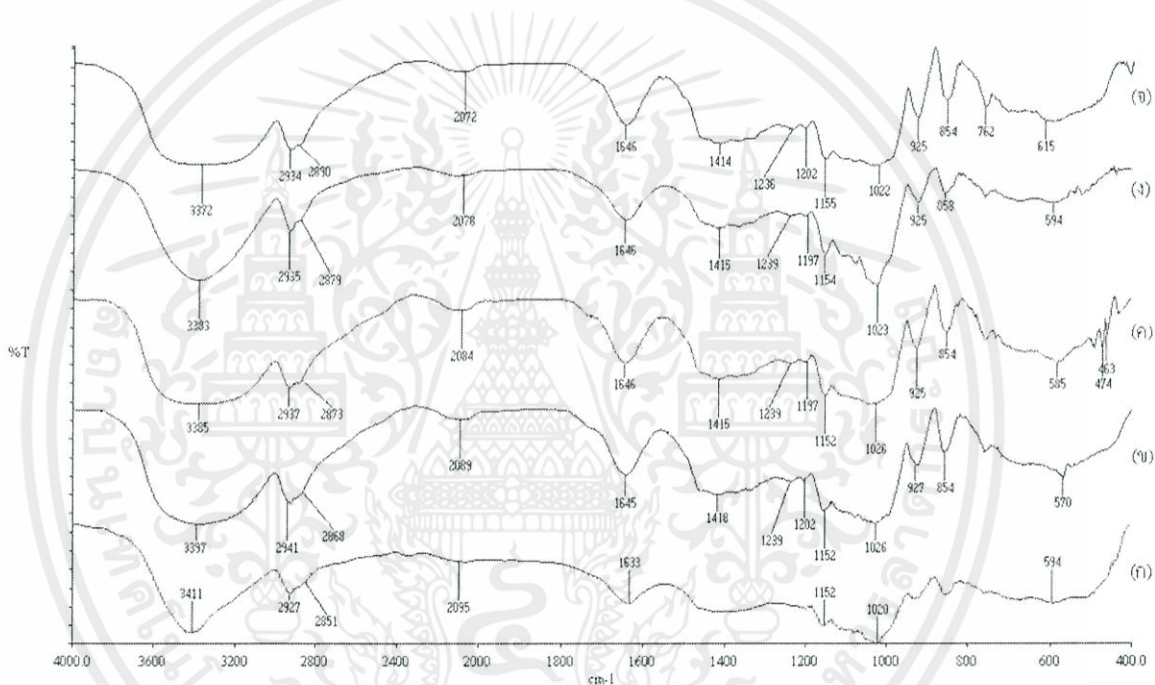


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยซีลีเยอขนาด 100-200 mesh ในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 2.5% (ค) 5% (ง) 7.5% และ (จ) 10%

4.1.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเยอจากไม้แอสที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ซีลีเยอจากไม้แอสที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยซีลีเยอปริมาณ 7.5% ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (ก) > 50 mesh (ข) 50-100 mesh (ค) 100-200 mesh และ (ง) < 200 mesh

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของรอยตะการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยในพิคช่วง 3250-3500 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ OH-stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พิคช่วง 2800-3000 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH-stretching ของ CH_2 หรือ CH_3 ของแป้ง พิคที่ 1633 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นของ O-H ของ

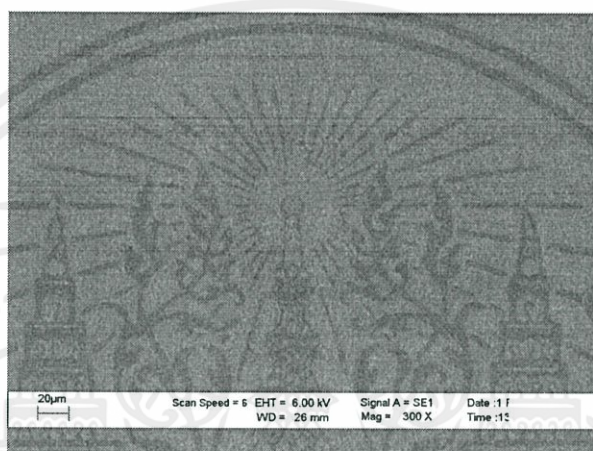
โมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง พิคที่ประมาณ 1418 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ OH-bending แป้ง พิคที่ช่วง $1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง พิคที่ช่วง $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [60]

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีโอ กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีโอที่ขนาดอนุภาคและปริมาณต่างๆ กัน พบว่า พิคที่ 3411 cm^{-1} และ 1410 cm^{-1} ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ OH-stretching และ OH-bending ในแป้ง เมื่อผสมซีลีโอทำให้พิกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเลื่อน ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้ แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่[60] ระหว่างแป้งและซีลีโอที่ใส่เข้าไป ปริมาณที่ใส่มากขึ้นหรือขนาดอนุภาคเล็กลงส่งผลให้พิกเกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง เนื่องจากปริมาณการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโครงสร้างซีลีโอกับโครงสร้างของแป้งมีมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าที่พิกการสั่นแบบ OH-stretching มีความกว้าง (Broad) มากขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น จากหมู่ OH ของโครงสร้างในกลีเซอรอล แป้ง และซีลีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

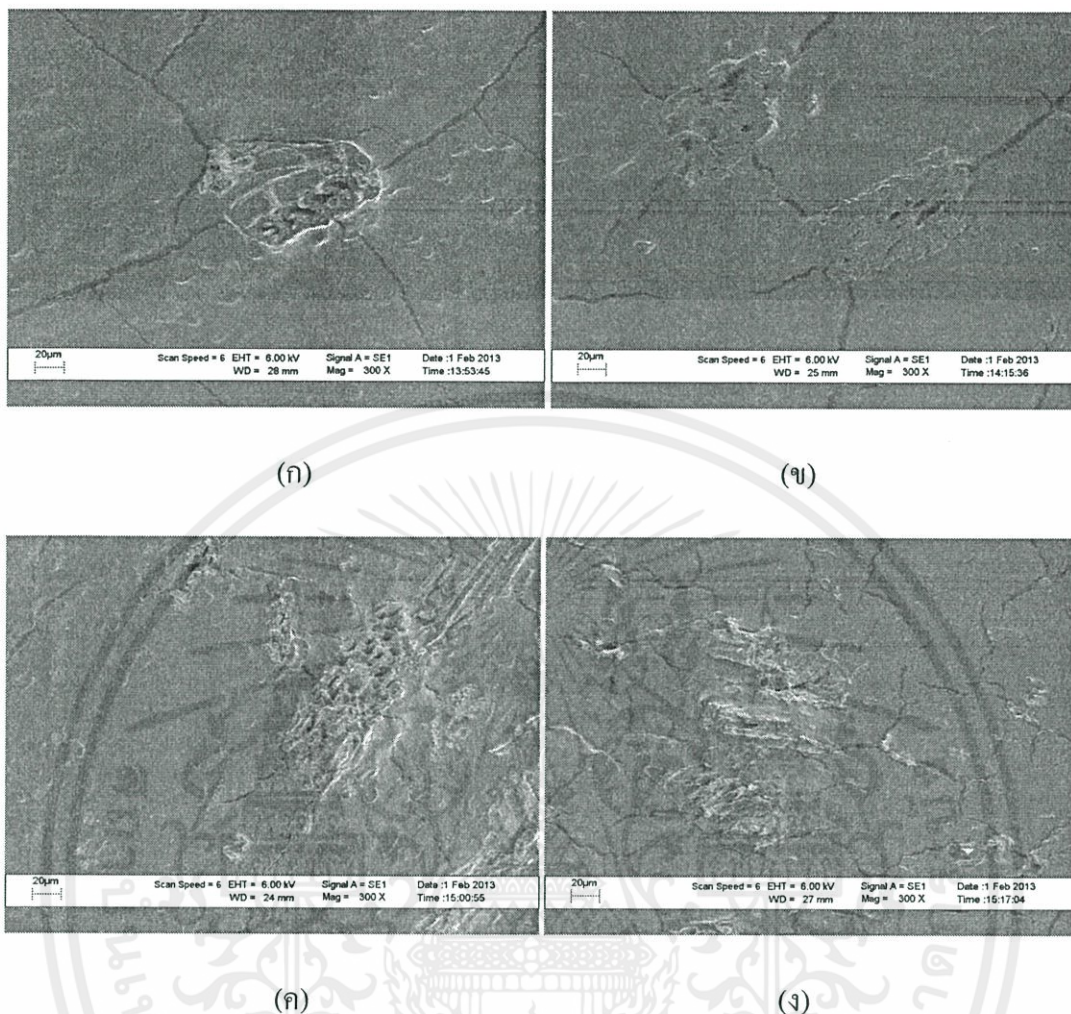
การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังโดยการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แฉะที่มีปริมาณและขนาดอนุภาคต่างๆ ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว (Dispersion) และลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) ดังนี้



รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง พื้นที่ผิวกำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกำลังขยาย 300 เท่า พบว่าพื้นที่ผิวมีลักษณะเรียบ แต่ยังมีบางบริเวณที่มีเม็ดแป้งซึ่งไม่หลอม ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม

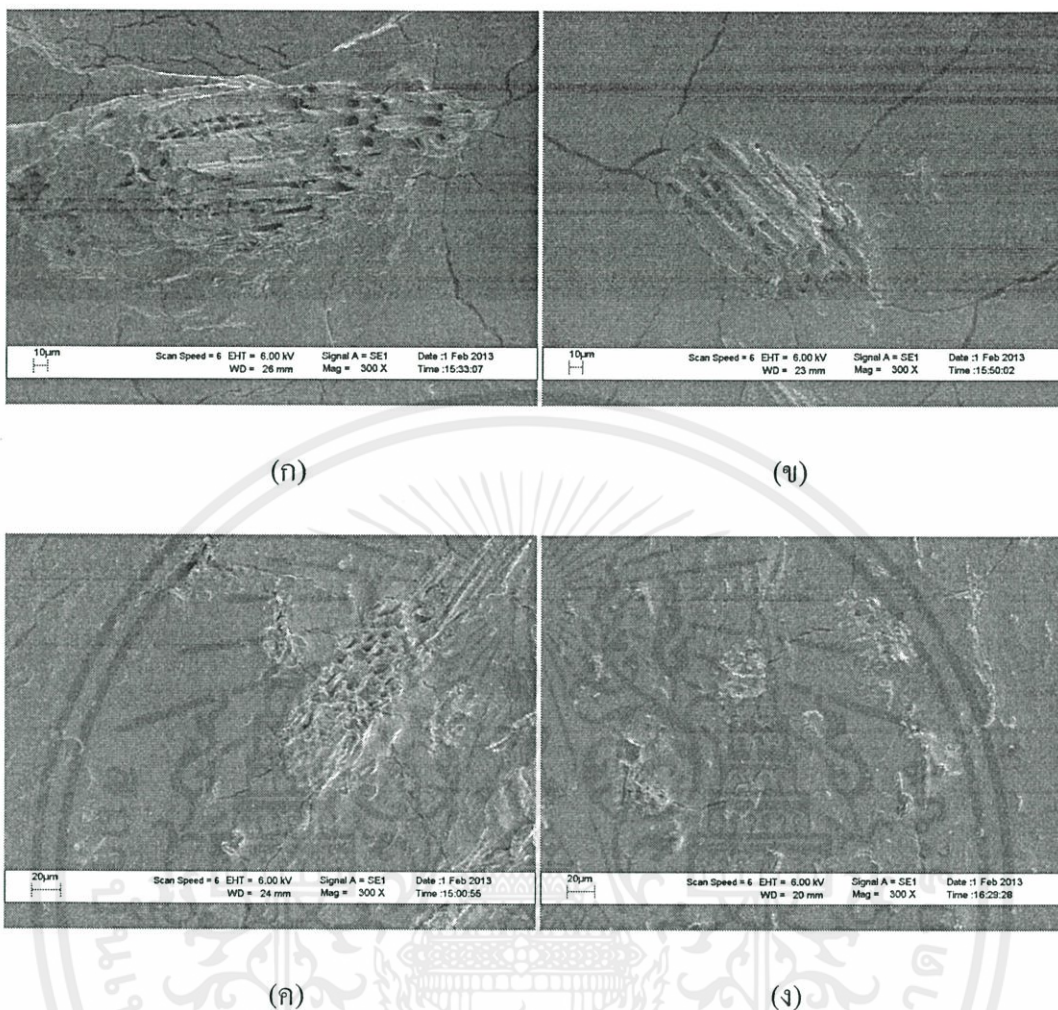
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลื้อยจากไม้แอส ด้วยขนาดอนุภาคเดียวกัน (100-200 mesh) ที่ปริมาณต่างกัน (ก) 2.5% (ข) 5% (ค) 7.5% และ (ง) 10%

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสสารจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงด้วยซีลื้อยจากไม้แอส ด้วยขนาดอนุภาคเดียวกัน แต่ปริมาณต่างกัน โดยใช้กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าซีลื้อยมีความเข้ากันได้กับวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสสารได้ดี โดยสังเกตได้จากรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ไม่มีการแยกส่วนกัน นอกจากนี้พื้นผิวของซีลื้อยยังถูกปกคลุมด้วยแป้ง (Surface wetting) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของซีลื้อยและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกจากเป้งมันสำปะหลังที่มีปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอส ที่ปริมาณ 7.5% โดยมีขนาดต่างกัน (ก) >50 mesh (ข) 50-100 mesh (ค) 100-200 mesh และ (ง) <200 mesh

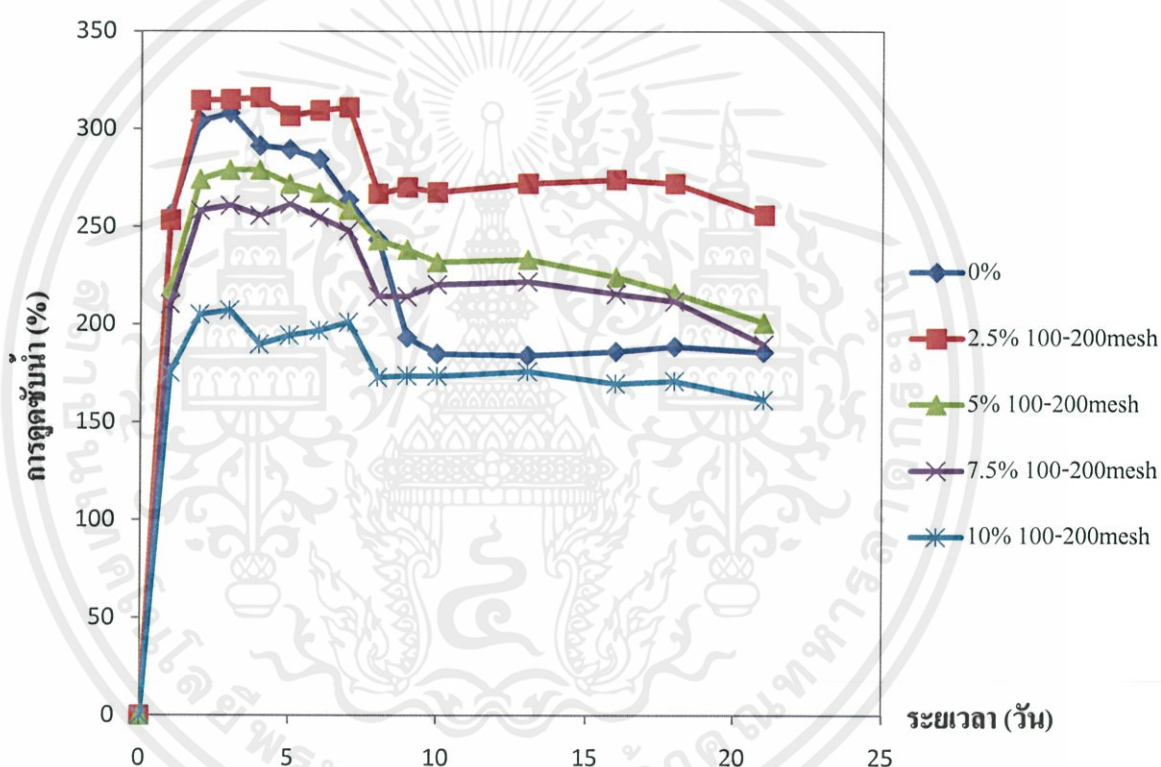
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเทอร์โมพลาสติกจากเป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงด้วยขี้เถ้าจากไม้แอส ด้วยขนาดอนุภาคต่างกัน ปริมาณเท่ากัน โดยใช้กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าขนาดอนุภาคของขี้เถ้าขนาด >50 mesh มีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมา คือ ขนาด 50-100, 100-200 และ <200 mesh ตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาคของขี้เถ้าที่ต่างกันนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อรอยต่อระหว่างผิวภาคของเป้งมันสำปะหลังและขี้เถ้าจากไม้แอส เนื่องจากผิวภาคทั้งสองสามารถเข้ากันได้ดี

เอกสารนี้ แยกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมบัติทางกายภาพ

4.3.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

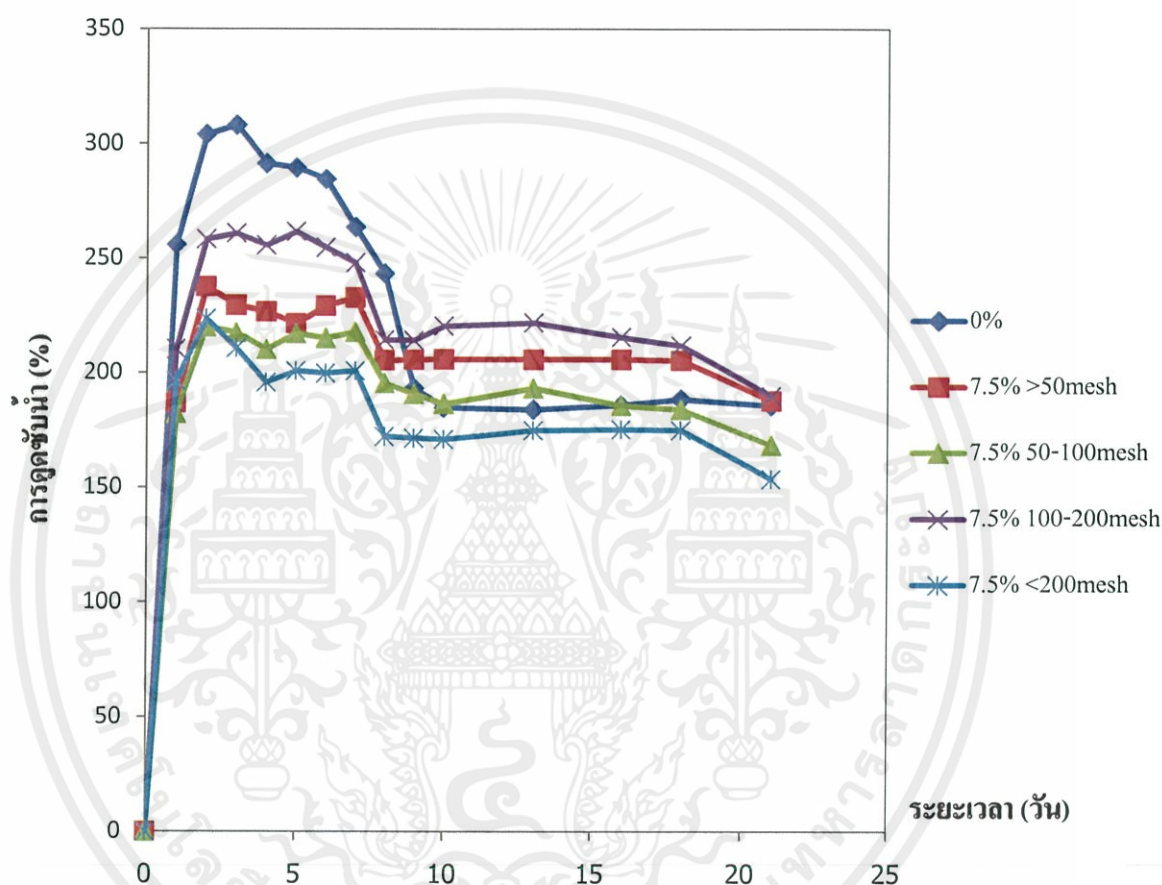
ผลของปริมาณขี้เลื่อยจากไม้แอสที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาจากการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆไปแช่ในน้ำกลั่น



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณขี้เลื่อยจากไม้แอสที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอสที่ขนาดอนุภาค 100-200 mesh ในปริมาณ 0%, 2.5%, 5%, 7.5% และ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
















ผลของขนาดอนุภาคซีลี้อยจากไม้แอสที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาจากการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ ไปแช่ในน้ำกลั่น



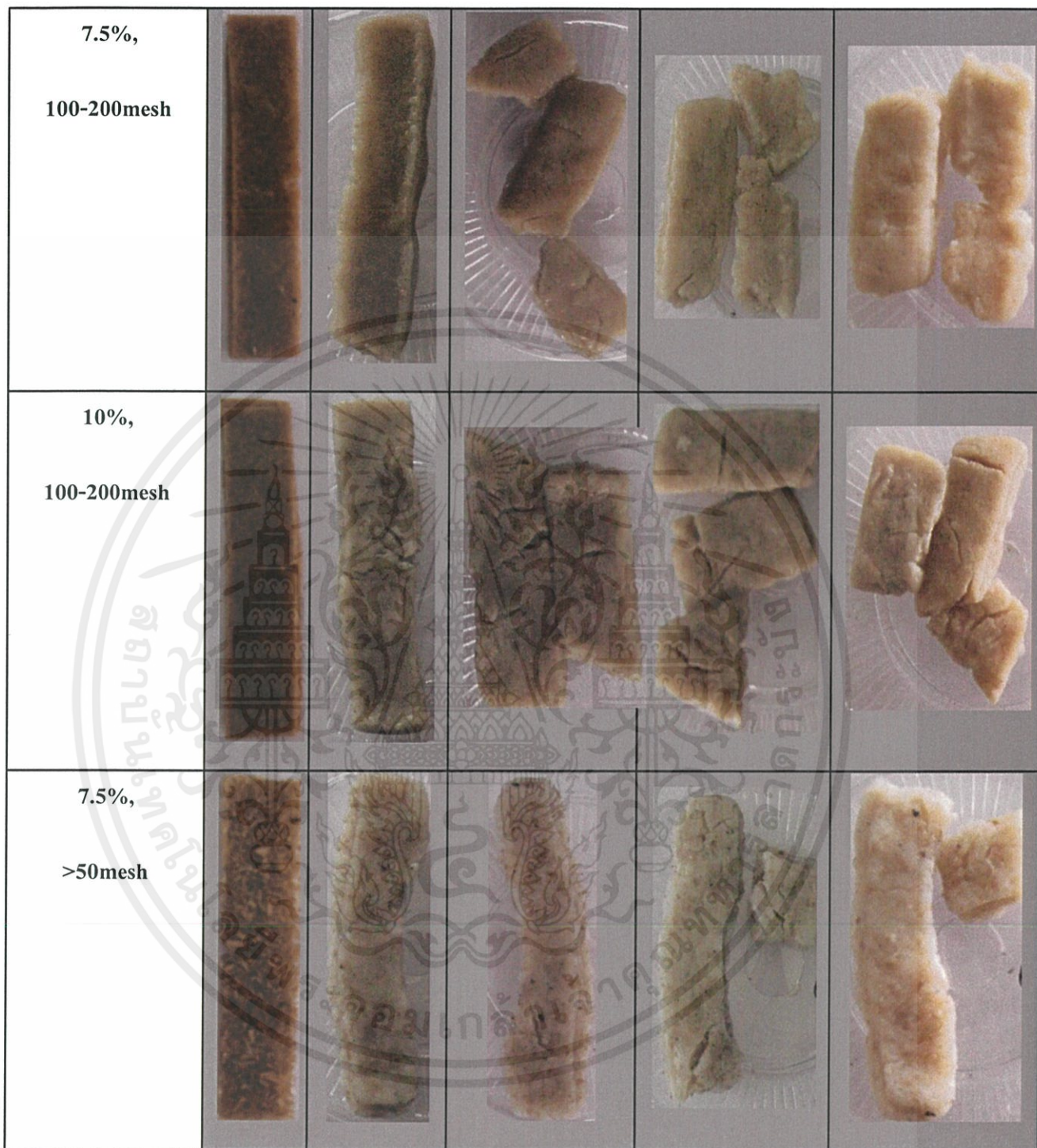
รูปที่ 4.7 ผลของขนาดอนุภาคซีลี้อยจากไม้แอสที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อยจากไม้แอสที่มีปริมาณ 7.5% เท่ากัน และมีขนาดอนุภาค >50 mesh, 50-100 mesh, 100-200 mesh และ <200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

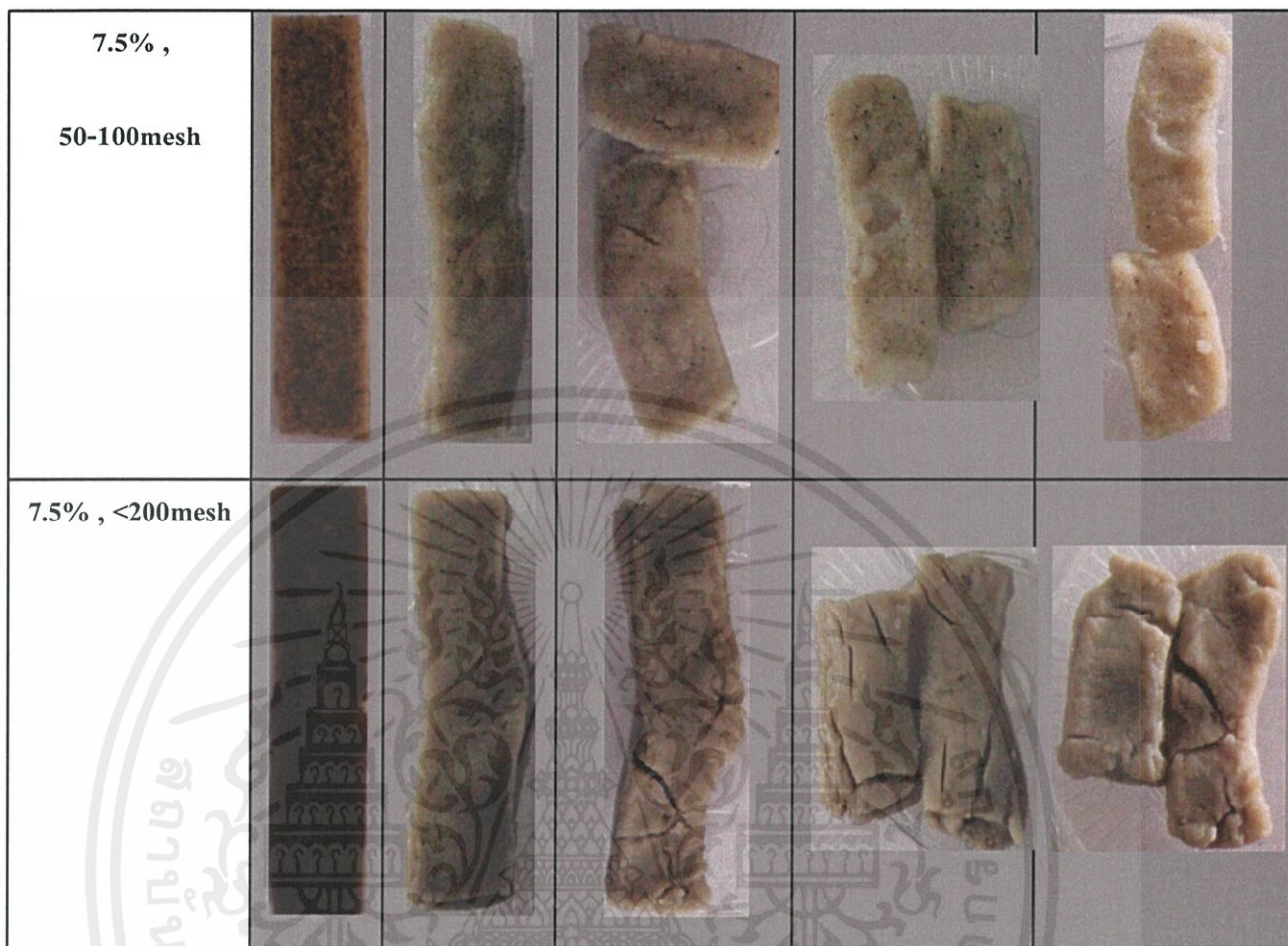
สมบัติการดูดซับน้ำ โดยนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ ด้วยจีลีนจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ มาแช่น้ำ ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8

ปริมาณจีลีน, ขนาดอนุภาคของจีลีน	0 วัน	1 วัน	4 วัน	10 วัน	20 วัน
0%					
2.5%, 100-200mesh					
5%, 100-200mesh					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยจากไม้แอสที่อัตราส่วนต่างๆ กันที่ได้จากการแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.6-4.8 แสดงให้เห็นถึงสมบัติการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยจากไม้แอสสูตรต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีออยจากไม้แอสนั้นสามารถดูดน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยมี %การดูดซับน้ำมากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน จากนั้น %การดูดซับน้ำเริ่มมีแนวโน้มคงที่ และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 7 วัน ซึ่งจากการเพิ่มอัตราส่วนของซีลีออยลงไป ทำให้ %การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากซีลีออยมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยกว่าแป้ง [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของปริมาณซีลีเนียม (รูปที่ 4.6) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีลีเนียมเป็น 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% โดยให้ขนาดอนุภาคของซีลีเนียมคงเดิม คือ 100-200 mesh ทำให้ %การดูดซับน้ำลดลงตามลำดับ เพราะในสูตรที่มีปริมาณซีลีเนียมจากไม้แอส (ส่วนเสริมแรง) เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของแป้ง (วัฏภาคต่อเนื่อง) ลดลง แต่สูตร 2.5% 100-200 mesh มีการดูดซับน้ำมากกว่าสูตร 0% เป็นเพราะในช่วงแรกสูตร 2.5% 100-200 mesh มีการหลุดออกของแป้งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่มีการเปื่อยยุ่ย (รูปที่ 4.8) ซึ่งจากความไม่เรียบของพื้นผิวดังกล่าวทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปในชิ้นงานได้ดีมากกว่าสูตร 0% ซึ่งมีผิวเรียบ มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และไม่มีการแยกส่วนกัน อ้างอิงได้จากผล SEM (รูปที่ 4.3) แต่หลังจากการทดสอบไป 7 วัน จะเห็นได้ว่าสูตร 0% มี %การดูดซับน้ำลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด เป็นเพราะแป้งเกิดการดูดซับน้ำในปริมาณที่มากเกินไป และมีการหลุดออกของเนื้อแป้งในชิ้นงาน ซึ่งสังเกตได้จากสีของน้ำกลั่นที่แช่เปลี่ยนแปลงไป

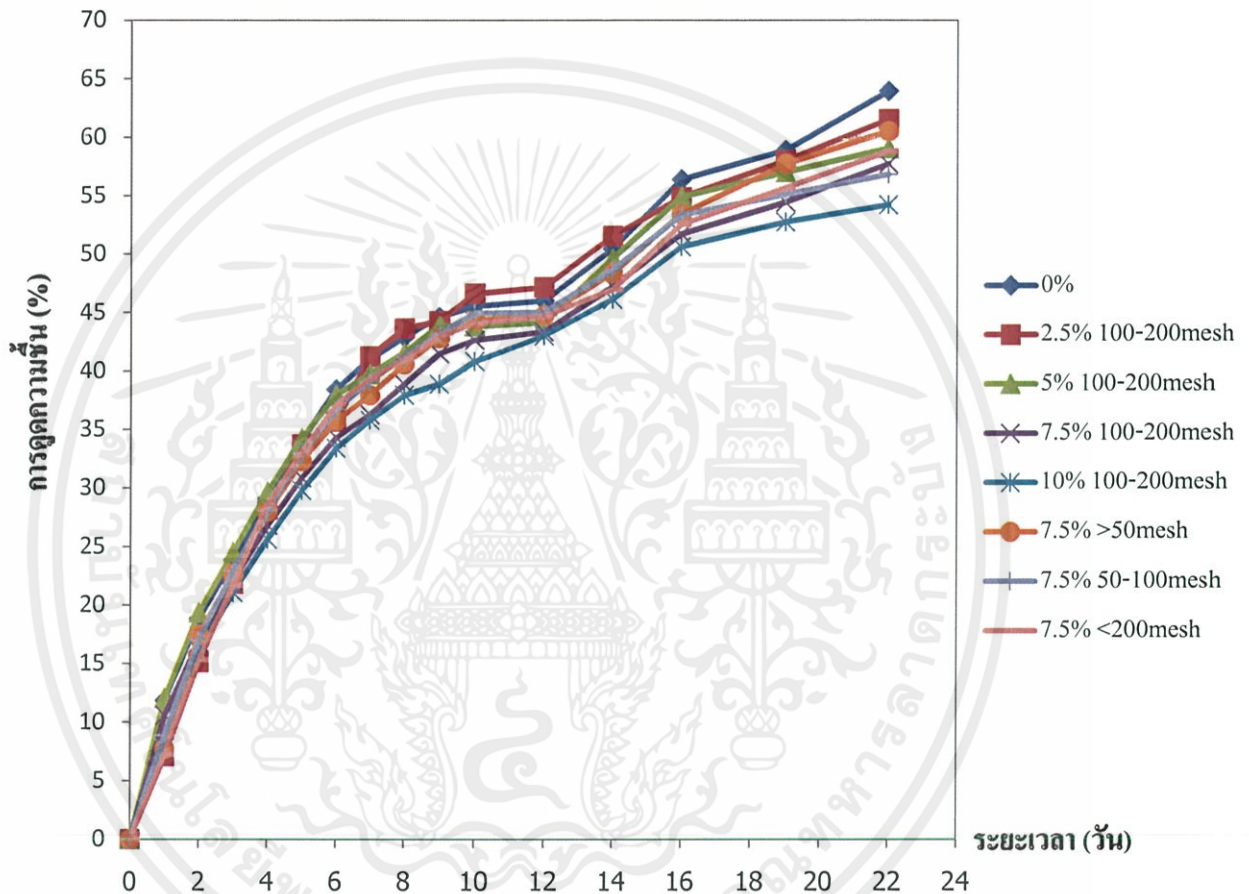
จากผลของขนาดซีลีเนียม (รูปที่ 4.7) เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดอนุภาคเป็น ขนาดมากกว่า 50 mesh, 50-100 mesh, 100-200 mesh และ น้อยกว่า 200 mesh โดยให้ปริมาณของซีลีเนียมคงเดิม คือ 7.5% พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่ คือ เมื่อซีลีเนียมมีขนาดอนุภาคเล็ก การดูดซับน้ำมีแนวโน้มน้อยลง

จากผลการทดลองการแช่น้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูตร 2.5% 100-200 mesh ดูดน้ำได้มากที่สุด รองลงมา คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูตร 10% 100-200 mesh ดูดน้ำได้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การดูความชื้นในบรรยากาศ

ผลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดูความชื้นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99%



รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์การดูความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ ที่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99%

จากการทดสอบการดูความชื้นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99% ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์

จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.9 พบว่าภายในช่วง 5-6 วันแรก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในทุกอัตราส่วน สามารถดูความชื้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเทอร์โมพลาสติก

สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีซีลีเยอเป็นส่วนผสมอยู่นั้น มีความสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังนั้นดูดซับน้ำได้ดีกว่าโมเลกุลของเซลลูโลสในไม้แอซ [15] ในขณะที่สูตรที่มีอัตราส่วนของปริมาณซีลีเยอเพิ่มขึ้นนั้น มีความสามารถในการดูดความชื้นนั้นลดลงตามลำดับดังนี้ 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% ของน้ำหนักทั้งหมด และสูตรที่มีปริมาณของซีลีเยอเท่ากัน คือ 7.5% ของน้ำหนักทั้งหมด แต่แตกต่างกันที่ขนาดของอนุภาค คือ มากกว่า 50 mesh, 50-100 mesh , 100-200 mesh และ น้อยกว่า 200 mesh โดยซีลีเยอขนาดอนุภาคมากกว่า 50 mesh มีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ 50-100 mesh, 100-200 mesh และน้อยกว่า 200 mesh คือ ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด ส่งผลให้สูตรที่มีซีลีเยอขนาดอนุภาคมากกว่า 50 mesh ดูดความชื้นได้ดีกว่าสูตรที่มีซีลีเยอขนาดอนุภาค 50-100 mesh, 100-200 mesh และ น้อยกว่า 200 mesh ตามลำดับ เพราะซีลีเยอมีท่อกลวงที่บริเวณกระพี้ไม้ ที่ใช้เป็นทางลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ ซึ่งทำให้น้ำและความชื้นสามารถซึมผ่านท่อกลวงนี้ได้ [70]

จากการทดสอบการดูดความชื้นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99% สามารถสรุปได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีซีลีเยอเป็นส่วนผสมอยู่นั้น มีความสามารถดูดซับความชื้นได้เร็วและได้มากที่สุด ซึ่งเราสามารถแยกสรุปได้ 2 ส่วนคือ

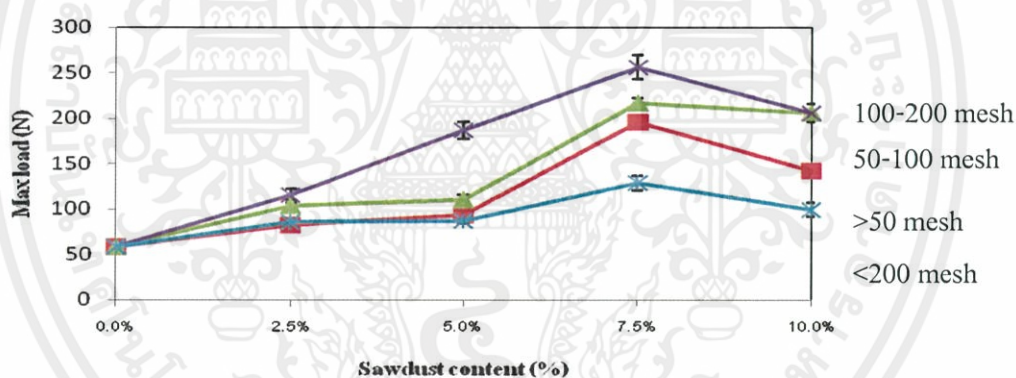
1. ในเชิงปริมาณของซีลีเยอ กล่าวคือ ในสูตรที่มีอัตราส่วนของปริมาณซีลีเยอมากขึ้น ความสามารถในการดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลง
2. ในเชิงของขนาดอนุภาคซีลีเยอจากไม้แอซ กล่าวคือ ในสูตรที่มีอัตราส่วนของปริมาณซีลีเยอที่เท่ากัน คือ 7.5% แต่แตกต่างกันที่ขนาดอนุภาค ทำให้สูตรที่มีขนาดอนุภาคซีลีเยอใหญ่กว่าดูดความชื้นได้ดีกว่าสูตรที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เพราะซีลีเยอที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีปริมาตรของท่อลำเลียงน้ำมากกว่าซีลีเยอขนาดเล็ก ซึ่งทำให้น้ำและความชื้นสามารถซึมผ่านท่อกลวงนี้ได้มาก [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

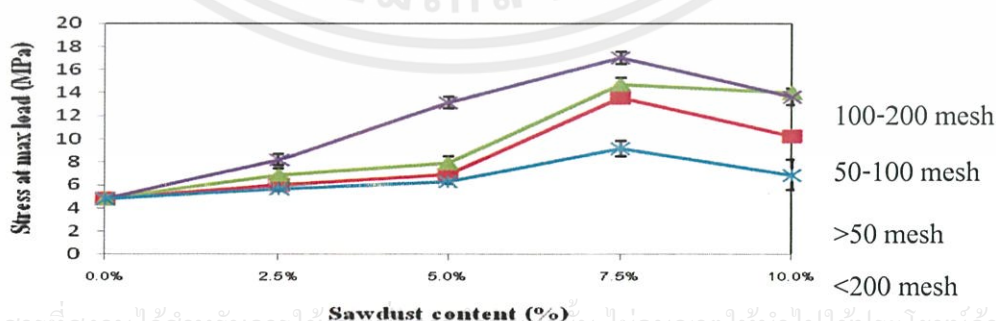
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด โมดูลัส เปรอร์เซ็นต์ การยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยที่ปริมาณ 0%, 2.5%, 5.0% และ 7.5% โดยน้ำหนัก และมีขนาดอนุภาค มากกว่า 50, 50-100, 100-200 และน้อยกว่า 200 mesh เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยขี้เลื่อย โดยให้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคและที่มีปริมาณต่างกัน (ก) แรงดึง (ข) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ค) โมดูลัส (ง) การยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด และ (จ) ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

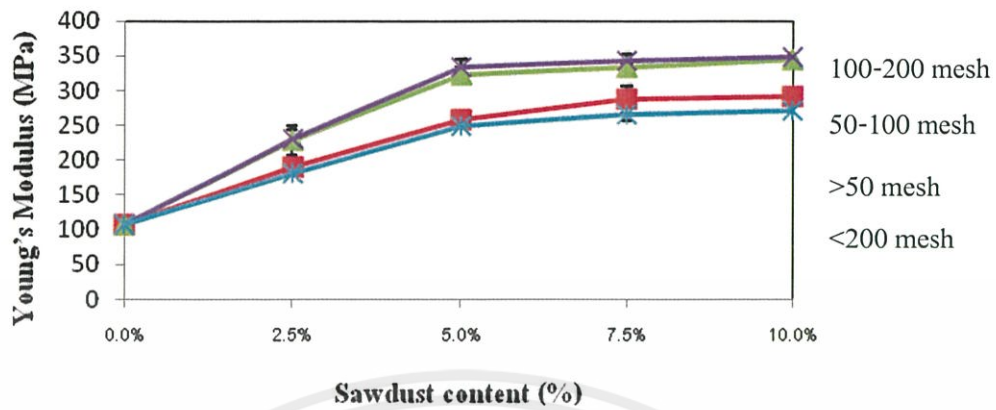


(ก)

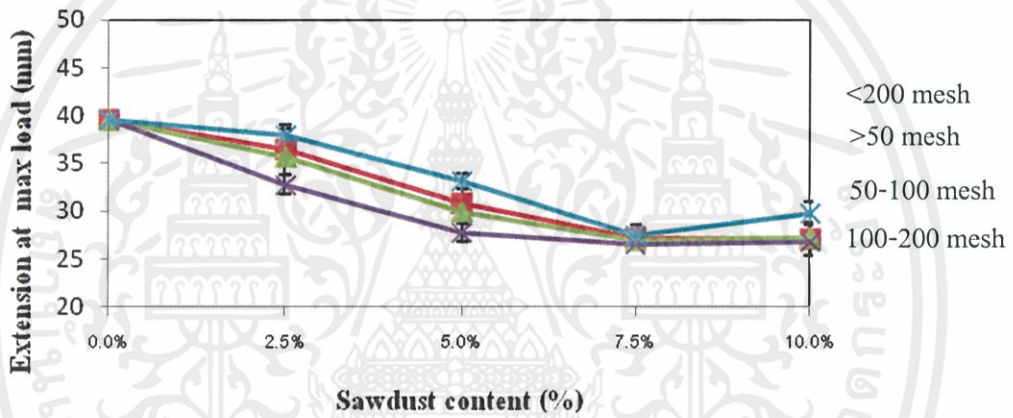


(ข)

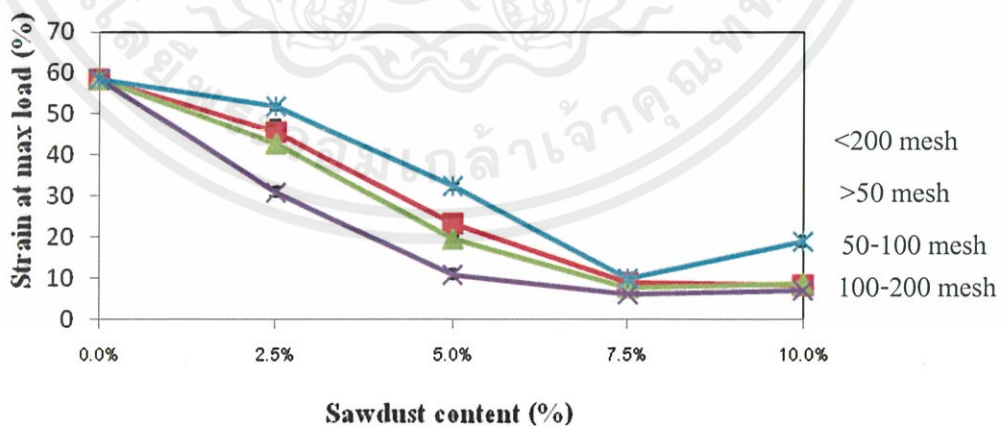
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (จ) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมที่มีขนาดอนุภาคและปริมาณต่างกัน พบว่าแรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และโมดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของซีลีเนียมเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณซีลีเนียม 7.5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากซีลีเนียมทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ซึ่งยืนยันได้จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังและซีลีเนียมซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ที่ตำแหน่ง OH-stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.1 และ 4.2) และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4.3-4.5) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัสดุที่ซีลีเนียมกับแป้ง แต่เมื่อปริมาณซีลีเนียมมีมากเกินไป (ที่ 10%) ทำให้แรงดึงความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และโมดูลัสมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก ปริมาณซีลีเนียมที่มากเกินไปทำให้เมทริกซ์ขาดความต่อเนื่อง การส่งผ่านแรงทำได้ไม่ดี ความแข็งแรงจึงลดลง

เมื่อพิจารณาขนาดของซีลีเนียมพบว่าที่ขนาดอนุภาคที่เล็กลง แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และโมดูลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแรงกระทำเกิดขึ้นได้ดี แต่ที่ขนาดอนุภาคซีลีเนียม <200 mesh พบว่าแรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และโมดูลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ ทำให้ไปกระจายตัวอยู่มากเกินไปจนทำให้วัสดุขาดความต่อเนื่องขาดความต่อเนื่องการส่งผ่านแรงทำได้ไม่ดี ความแข็งแรงจึงลดลง

จากรูปที่ 4.10 (ง) และ (จ) แสดงการยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด พบว่ามีแนวโน้มที่ตรงข้ามกับแรงดึง ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเพราะมีซีลีเนียมเป็นส่วนเสริมแรงเนื่องจากสมบัติขององค์ประกอบภายในของซีลีเนียมมีความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวต่ำจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมซีลีเนียมลงไป ดังนั้นจึงทำให้การยืดออกและการเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สรุปได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมซีลีเนียมปริมาณ 7.5% โดยน้ำหนัก และขนาด 100-200

mesh มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยทำให้แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น 343.4%, 254.6% และ 218.5% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มิได้ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

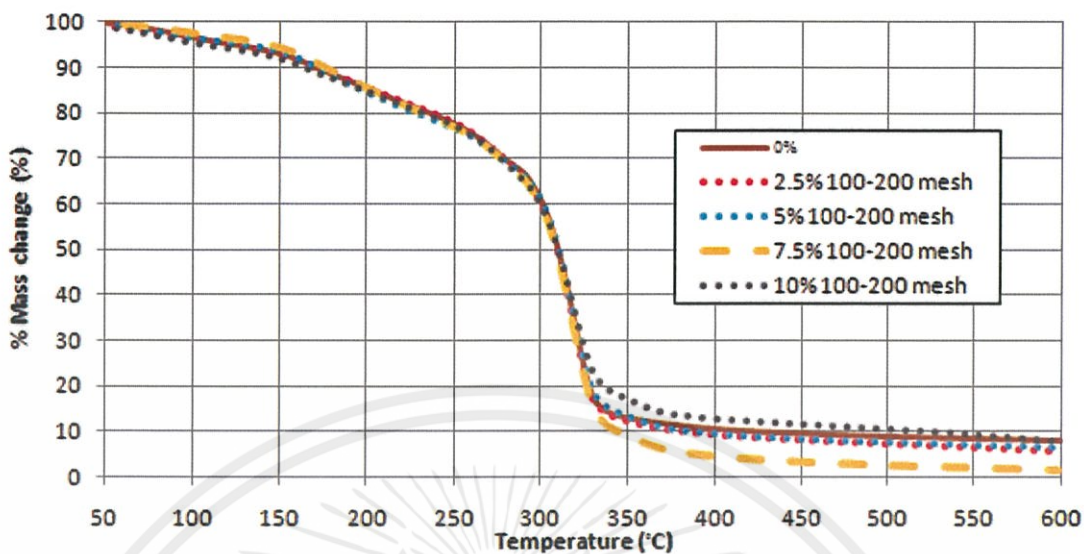
สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้มีการศึกษาสมบัติของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Onset decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (% mass change) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอสที่มีปริมาณและขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA)

4.5.1 ผลของปริมาณของขี้เลื่อยที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

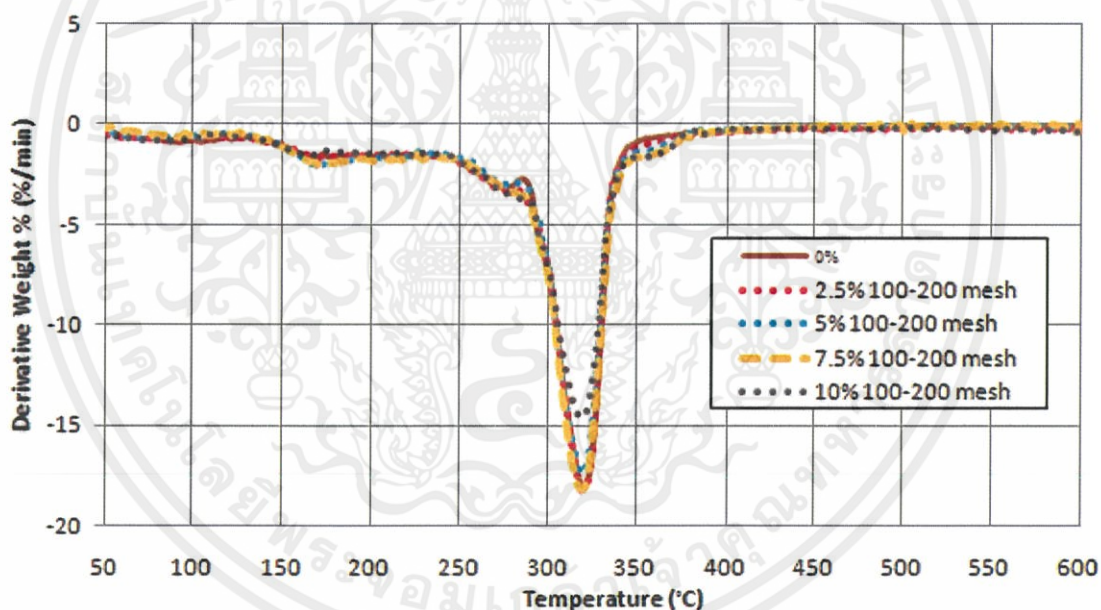
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยและที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เลื่อยจากไม้แอสด้วยขนาดอนุภาคเดียวกันปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป (แป้ง)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (ขี้เลื่อย)	
0%	168.6	320.1	-	60.3
2.5% 100-200 mesh	176.5	319.8	351.0	55.7
5% 100-200 mesh	170.5	319.6	351.5	54.3
7.5% 100-200 mesh	171.3	319.3	357.2	57.4
10% 100-200 mesh	168.0	319.5	352.0	63.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

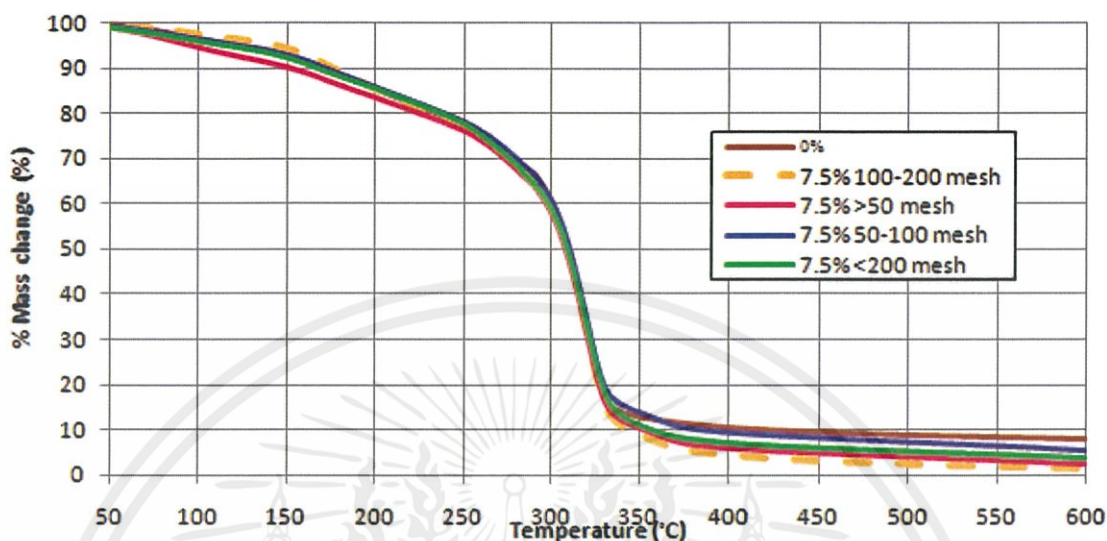
รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอซ โดยใช้อนุภาคของซีลีเนียมเท่ากัน (100-200 mesh) ที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

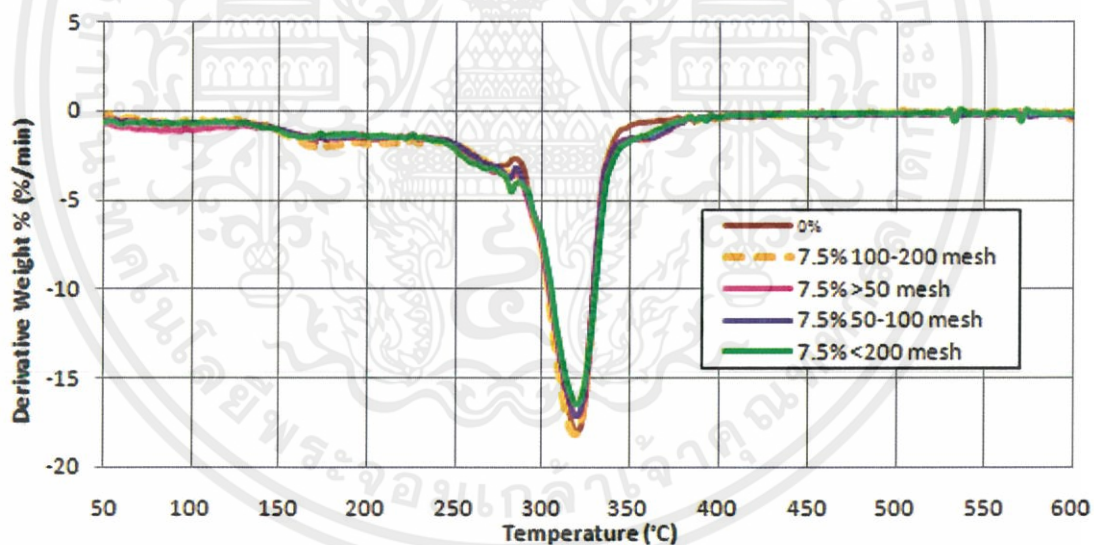
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.11 เป็นการศึกษาปริมาณของขี้เถ้าที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยการเติมขี้เถ้าที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน (100-200 mesh) ที่ปริมาณ แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีการปรับปรุงสมบัติด้วย ขี้เถ้าจากไม้แอส อุณหภูมิการสลายตัวจะปรากฏขึ้น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัว ของกลีเซอรอลในช่วง 165-175 องศาเซลเซียส [66-67] ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ แป้งประมาณ 320 องศาเซลเซียส [68] ช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของขี้เถ้าจาก ไม้แอสอยู่ในช่วง 351-357.2 องศาเซลเซียส [69] ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัว นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณอนุภาคของขี้เถ้าส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของแป้ง โดยเพิ่ม ปริมาณขี้เถ้า ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าเสถียรภาพ ทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของขี้เถ้า เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังลดลง เมื่อสัมผัสความร้อนจึงทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของน้ำหนักได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลของขนาดอนุภาคของซีลีเนียมที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งมันสำปะหลัง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งมันสำปะหลังและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอส โดยใช้ออนุภาคของซีลีเนียมต่างกัน ปริมาณเท่ากัน (7.5%) (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผู้เขียนได้ส่งมอบให้ทางมหาวิทยาลัยขอนแก่น ไปเผยแพร่ให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







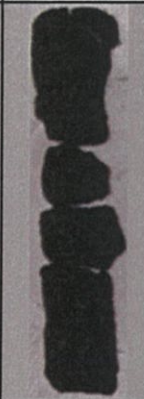



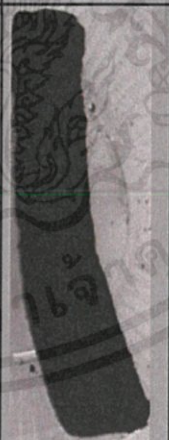

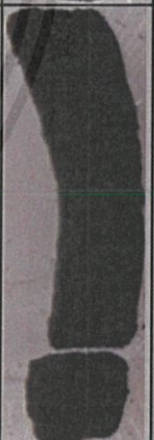

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าและที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอส ด้วยขนาดอนุภาคต่างกัน ที่ปริมาณเท่ากัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			% น้ำหนักที่หายไป (แป็ง)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป็ง)	ช่วงที่ 3 (ขี้เถ้า)	
0%	168.6	320.1	-	60.3
7.5% >50 mesh	170.5	320.3	358.6	55.3
7.5% 50-100 mesh	176.2	319.7	362.1	54.5
7.5% 100-200 mesh	171.3	319.3	357.2	57.4
7.5% <200 mesh	166.5	320.2	352.0	54.9

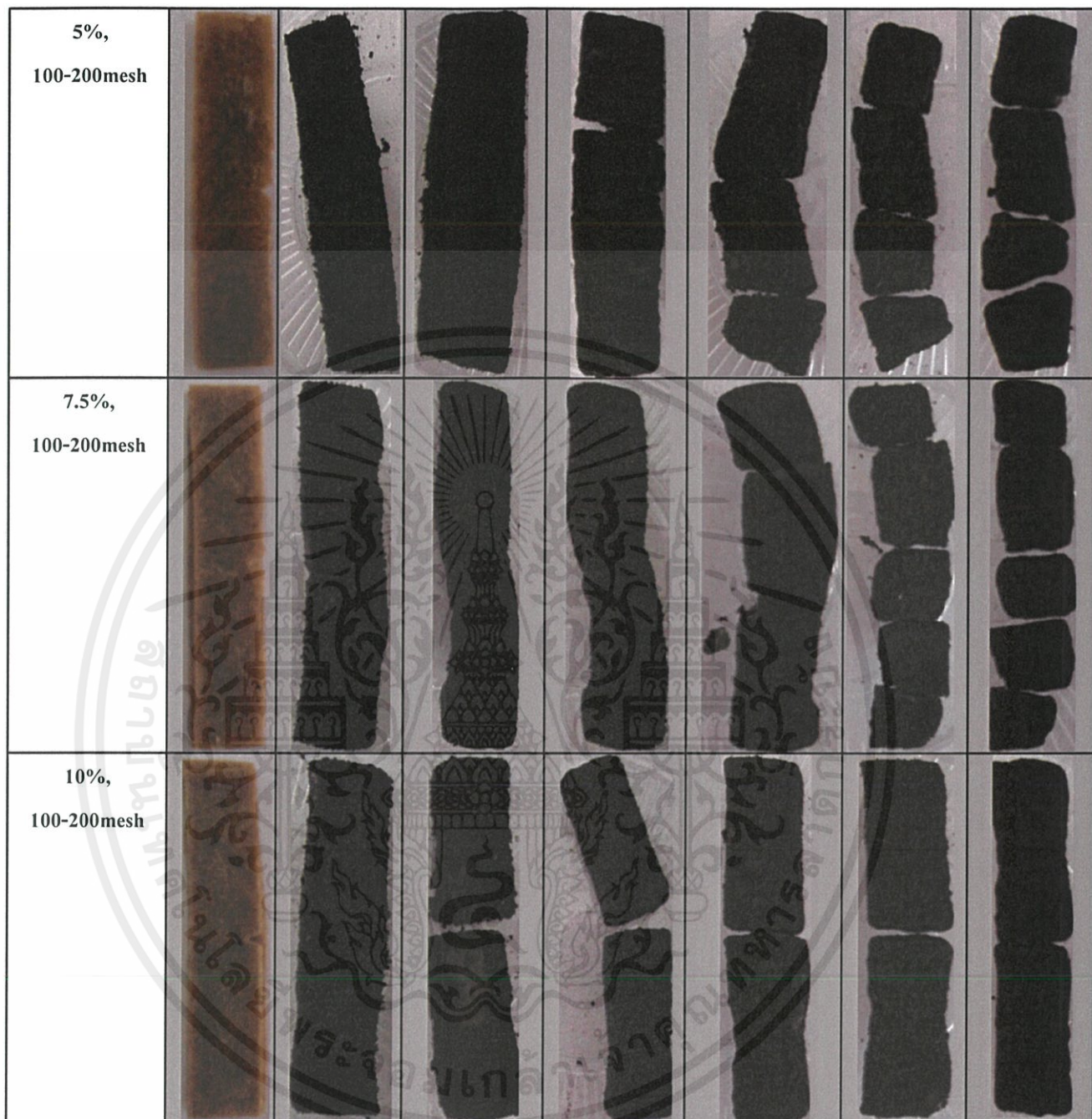
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป็งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอสมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เริ่มต้นที่ 167 องศาเซลเซียส เป็นของกลีเซอรอล [66-67] และช่วงที่ 2 เริ่มต้นที่ 320 องศาเซลเซียส เป็นของแป็งมันสำปะหลัง [68] และเมื่อมีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยการเติมขี้เถ้าจากไม้แอส โดยใช้ขนาดอนุภาคต่างกัน คือ >50 mesh, 50-100 mesh, 100-200 mesh, <200 mesh ในปริมาณที่เท่ากัน (7.5%) พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลอยู่ในช่วง 165-175 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป็งมันสำปะหลังประมาณ 320 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของขี้เถ้าในช่วง 352-362.1 องศาเซลเซียส [69] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป็งมันสำปะหลังที่มีการเติมขี้เถ้าจากไม้แอส พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวไม่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของขี้เถ้า นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลพบว่ามีแนวโน้มลดลงจากการเติมขี้เถ้า ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงโดยขี้เถ้าที่ขนาดต่างกัน

4.6 สมบัติการย่อยสลาย

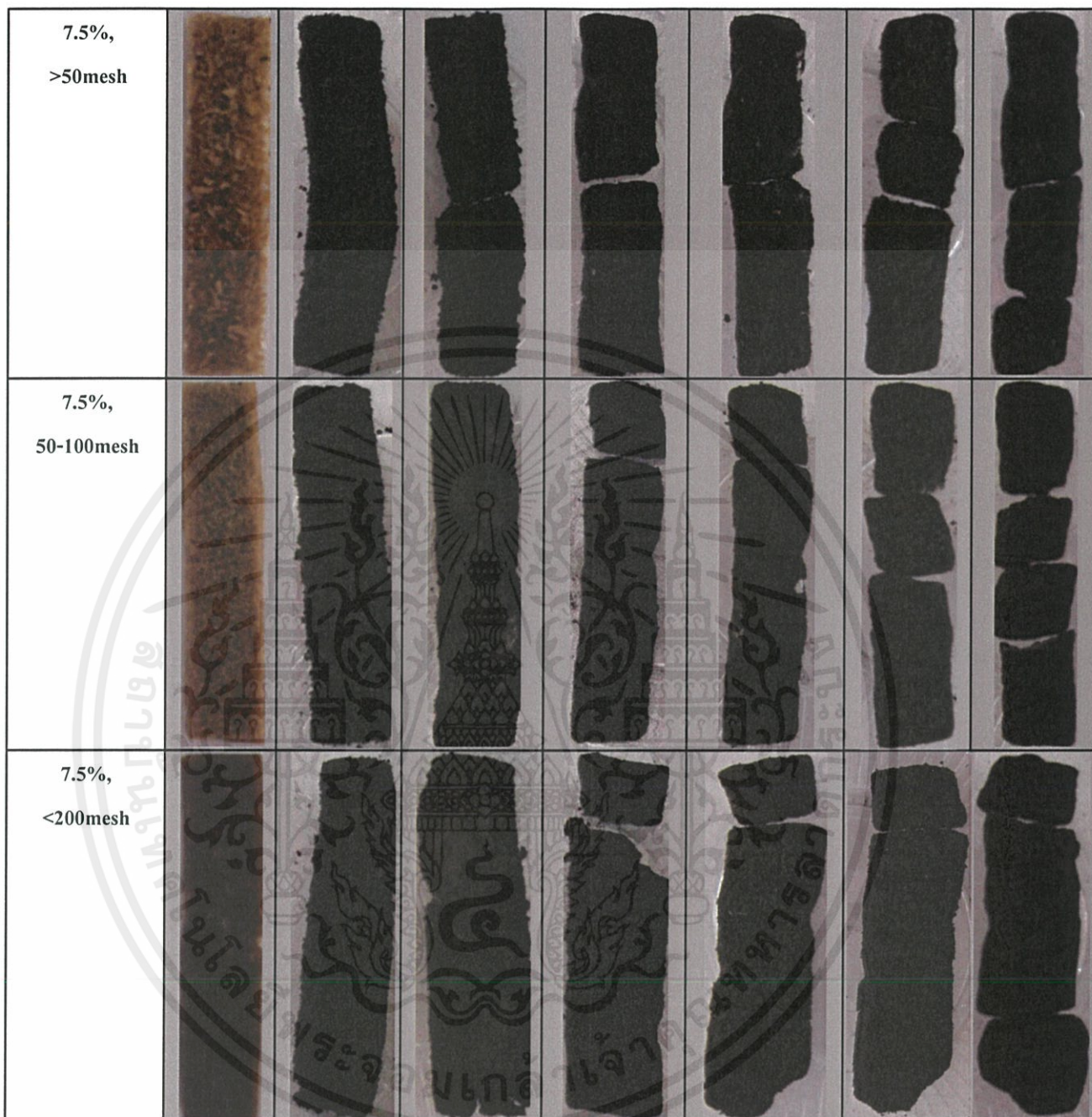
สมบัติการย่อยสลายทดสอบได้โดยการฝังดิน โดยนำเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเยอจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ มาฝังดินที่มีความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 และควบคุมความชื้นของดินคงที่ช่วง 20-30% เป็นระยะเวลา 30 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.13

ปริมาณซีลีเยอ, ขนาดอนุภาค ของซีลีเยอ	0 วัน	3 วัน	6 วัน	10 วัน	15 วัน	25 วัน	30 วัน
0%							
2.5%, 100-200mesh							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



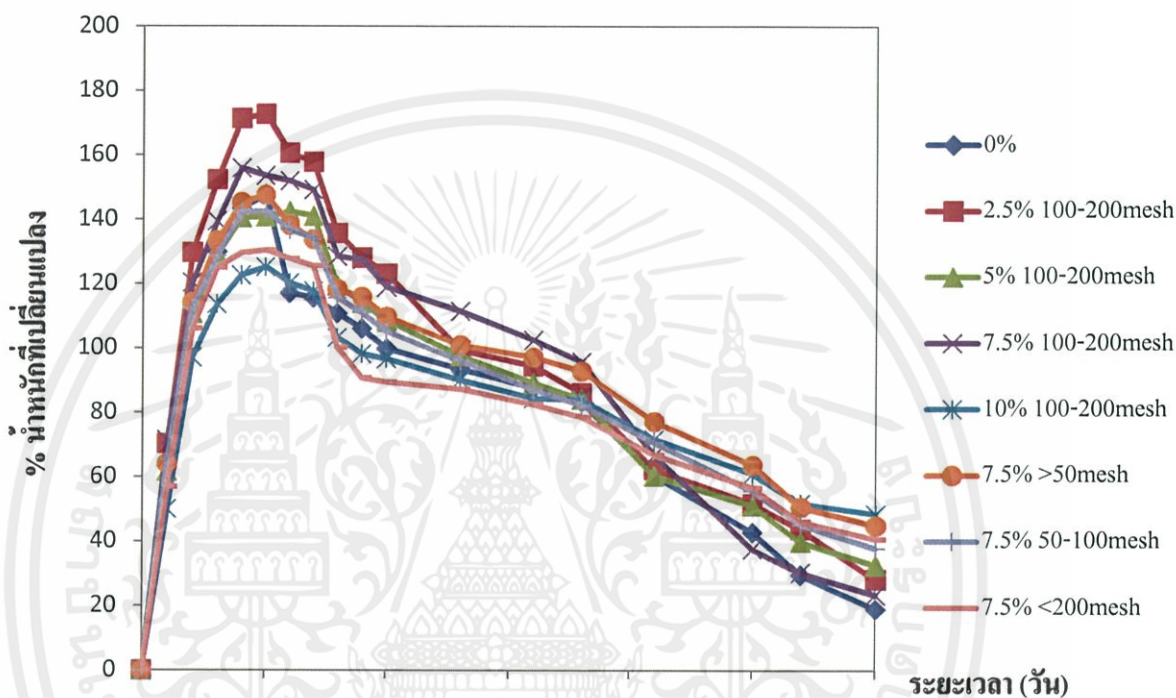
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้
แอสที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ที่ได้จากการทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายโดยการฝังดิน



รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอสในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินจากรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเยอจากไม้แอสทริคมีแนวโน้มในการย่อยสลายที่เหมือนกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการดูดซับน้ำและความชื้นจากดิน โดยในช่วง 5-6 วันแรกของการฝังดินนั้นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จากนั้นทุกชิ้นงานเริ่มมีน้ำหนักที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงโดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายในดิน ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมบัติการดูดซับน้ำ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 99% (หัวข้อที่ 4.3.1) กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีซีลีเยอเป็นส่วนผสมอยู่นั้นมีการดูดน้ำมากที่สุด ส่งผลให้เกิดการสลายตัวได้มากที่สุด และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเพิ่มปริมาณของซีลีเยอ โดยให้ขนาดอนุภาคของซีลีเยอเท่ากัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซีลีเยอน้อยๆ เกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซีลีเยอมากๆ เนื่องจากแป้งสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่าซีลีเยอ [15] และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีอัตราส่วนของปริมาณ ซีลีเยอที่เท่ากัน คือ 7.5% แต่ต่างกันที่ขนาดอนุภาคได้แก่ มากกว่า 50 mesh, 50-100 mesh, 100-200 mesh และ น้อยกว่า 200 mesh ทำให้สูตรที่มีขนาดอนุภาคซีลีเยอใหญ่ (มากกว่า 50 mesh) ดูดความชื้นได้มากกว่าสูตรที่มีขนาดอนุภาคของซีลีเยอเล็กๆ เนื่องจากซีลีเยอขนาดใหญ่ยังคงมีช่องว่างของท่อลำเลียงน้ำและอาหารอยู่ ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในช่องว่างดังกล่าวได้ทำให้เกิดการดูดความชื้นได้มากกว่า จึงย่อยสลายเร็วกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ซีลี้อย่างจากไม้แอสเพื่อปรับปรุงสมบัติ โดยใช้ซีลี้อย่างขนาดต่างๆ กัน ได้แก่ 50, 50-100, 100-200 และน้อยกว่า 200 mesh และปริมาณอนุภาคของซีลี้อย่างได้แก่ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10% หลังจากทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าพีคการสั่นแบบ OH-stretching และ OH-bending เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง

2. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบ ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลี้อย่างจากไม้แอส พบว่าวัฏภาคของแป้งมันสำปะหลังและวัฏภาคของซีลี้อย่างจากไม้แอสสามารถเข้ากันได้ดีโดยสังเกตจากการเปียกที่พื้นผิวของซีลี้อย่าง

3. จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติการดูดความชื้นในบรรยากาศภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99% พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีซีลี้อย่างเป็นส่วนผสมอยู่นั้น มีความสามารถดูดน้ำและความชื้นได้เร็วและได้มากที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีอัตราส่วนของปริมาณซีลี้อย่างเพิ่มมากขึ้นหรือขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นลดลง ซึ่งทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูตร 10% 100-200 mesh ดูดน้ำและความชื้นได้น้อยที่สุด

4. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังอื่น ๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งหากนำไปใช้

เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณซีลี้อย่าง 7.5% โดยน้ำหนัก และที่อนุภาคซีลี้อย่างเล็กลง แรงดึง ความ

เกิน ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์มีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ขึ้นที่เนื้อขนาดขึ้นที่เนื้อ 100-200 mesh แต่หากมีขนาดที่เล็กเกินไป (<200 mesh) แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์มีค่าต่ำที่สุด

5. จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าขนาดและอนุภาคไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ แต่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6. จากการทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และควบคุมความชื้นของดินคงที่ช่วง 20-30% พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีขึ้นที่เนื้อเป็นส่วนผสมอยู่นั้นมีการสลายตัวได้เร็วที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีขึ้นที่เนื้อขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 10% มีย่อยสลายได้ช้าที่สุด

7. จากการทดลองพบว่าสูตรที่ดีที่สุด คือ สูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงด้วยขึ้นที่เนื้อจากไม้แอสที่ปริมาณ 7.5% ขนาดอนุภาค 100-200 mesh โดยพิจารณาจากสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เถ้าจาก ไม้แฉะที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้โดย

1. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกลิเซอรอล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปให้ดีขึ้น เช่น การปรับอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกลิเซอรอล จาก 70:30 โดยน้ำหนัก เป็น 65:35 โดยน้ำหนัก เป็นต้น

2. ศึกษาชนิดของขี้เถ้าที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เช่น การศึกษาขี้เถ้าจากไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากไม้แต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงอาจส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแตกต่างกัน ชนิดของไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้สัก ไม้ยางแดง ไม้พะยอม ไม้พญาไม้ ไม้ทำมัง ไม้ตะบูนขาว ไม้กะบาก ไม้กระเจา เป็นต้น

3. ปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เช่น การอัดรีด การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานที่หลากหลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กุลฤดี แสงสีทอง และ กล้าณรงค์ ศรีรอด.2554 แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.thaitapiocastarch.org>. วันที่เข้าถึง: 10 กรกฎาคม 2555
- [2] มันสำปะหลัง (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/มันสำปะหลัง>. วันที่เข้าถึง: 10 กรกฎาคม 2555
- [3] แป้งมันสำปะหลัง (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/แป้งมันสำปะหลัง>. วันที่เข้าถึง: 10 กรกฎาคม 2555
- [4] ซีลี้อย (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ซีลี้อย>. วันที่เข้าถึง: 10 กรกฎาคม 2555
- [5] คุณสมบัติของไม้นื้อแท้ (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://pratoothai.com/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=74 วันที่เข้าถึง: 10 กรกฎาคม 2555
- [6] พิมพ์ชนก แสงนิติเดช และเพ็ญฤทัย บุญประสิทธิ์, “ผลของสารตัวเติมและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆของเทอร์มาพลาสติกจากแป้งข้าวเจ้า”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2551.
- [7] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543, เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 292 หน้า
- [8] G.M.A. Beynum, J.A. van, and Roels, 1985, Starch Conversion Technology, Marcel Dekker, Inc. New York, p. 326.
- [9] โครงสร้างแอลฟาอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://science.srru.ac.th/org/sci-elearning/courseonline/4022503/chapter3-storage1.htm>. วันที่เข้าถึง: 23 สิงหาคม 2555
- [10] อะไมโลสและอะไมโลเพคติน (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/lesson/view.php?id=1468>. วันที่เข้าถึง: 23 สิงหาคม 2555
- [11] T. Kasemsuwan, J. Jane, Y.Y. Chen, L.F. Lee, A.E. McPherson, K.S. Wong and M.Radosavljevic, "Effects of Amylopectin Branch Chain Length and Amylose Content on the Gelatinization and Pasting Properties of Starch", Cereal Chem, 76 (1999) 629-637.
- [12] Y. Pomeranz, " Functional properties of food components", Academic Press. Inc. New York, 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] A. Bulemon, P. Colonna, V. Planchot, and S. Ball, "Starch granules: structure and biosynthesis", *International Journal of Biological Macromolecules*, 23 (1998) 85–112.

[14] A.G.W. Bradbury and A.B. Bello, Determination of molecular size distribution of starch and debranched starch by a single procedure using high-performance-size-exclusion chromatography, *Cereal Chemistry*, 70 (1993) 543-547.

[15] โครงสร้างเม็ดสตาร์ชและพอลิแซ็กคาไรด์ (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/FT320/026.htm>. วันที่เข้าถึง: 25 สิงหาคม 2555

[16] นิธิยา รัตนานพนธ์. 2550. เม็ดแป้ง (*starch granule*) (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/567/starch%20granule>. วันที่เข้าถึง: 25 สิงหาคม 2555

[17] ศิริรจนา กันภัย. 2550. การพองตัวและการละลาย (*Swelling and solubility*) (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[18] นิธิยา รัตนานพนธ์. 2550. การเจลาติไนซ์ (*gelatinization*) (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/350>. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[19] W.R. Morrison and B. Laignelet, "An Improved Colorimetric Procedure for Determining Apparent and Total Amylose in Cereal and Other Starches", *J. Cereal Sci.* 1 (1983) 9-20.

[20] J. Jane and J.J. Shen, "Internal Structure of the Potato Starch Revealed by Chemical Gelatinization", *Carbohydrate Res*, 247 (1993) 279-280.

[21] ศิริรจนา กันภัย. 2550. การคืนตัวของแป้งสุก (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_5.html. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[22] Assassingao. 2551 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (*Retrogradation*) (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://gumunbah.pbworks.com/w/page/8665289/7>. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[23] ศิริรจนา กันภัย. 2550. ความหนืด (*Viscosity*) (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_5.html. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[24] ศิริรจนา กันภัย. 2550. การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_5.html. วันที่เข้าถึง: 26 สิงหาคม 2555

[25] มนตรี จุฬาววัฒนทล และประหยัด โกมารทัต, 2542, "ระบบทางเดินอาหาร" *ชีวเคมีฉบับ 2542*, ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ, หน้า 365-378.

- [26] อนุชิต ชุ่มใจ. *ความเป็นมาของมันสำปะหลัง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.agriman.doae.go.th/home/Research/FieldCrop/Cassava.pdf>. วันที่เข้าถึง: 28 สิงหาคม 2555
- [27] จำลอง เขียมจันรรจา, 2541, “มันสำปะหลัง”, *พฤกษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ, ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ*, หน้า 47-51.
- [28] มยุรี โสคา. 2554. *ลักษณะต้นมันสำปะหลัง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://primfarmkaset.blogspot.com/2011/02/blog-post.html>. วันที่เข้าถึง: 28 สิงหาคม 2555
- [29] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2542. *ประโยชน์จากมันสำปะหลัง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.tapiocathai.org/E5.html>. วันที่เข้าถึง: 28 สิงหาคม 2555
- [30] กรมการค้าต่างประเทศ (กระทรวงพาณิชย์). 2549. *อุตสาหกรรมการแปรรูปมันสำปะหลังและภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้อง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.afet.or.th/v081/thai/product/ts/index.php?page=3>. วันที่เข้าถึง: 28 สิงหาคม 2555
- [31] ห้างหุ้นส่วนจำกัด สหมิตรแป้งมัน ชลบุรี. 2548. *การผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Native Tapioca Starch)* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.sahamitr.com/about.html>. วันที่เข้าถึง: 28 สิงหาคม 2555
- [32] W.S. Ngah and M.A.K.M. Hanafiah, “Removal of heavy metal from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents”, *A review Bioresource Technology*, 99 (2008) 3935 – 3948.
- [33] *ขี้เถ้า* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ขี้เถ้า>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555
- [34] บริษัท โพเดียม โฮลดิ้ง กรุ๊ป จำกัด. 2552. *ไม้แอส (Ash wood)* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www.podium.co.th/podium_online/other/podium_wood.php. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555
- [35] Diplomat Publishing Co.Ltd. 2010. *Ash wood* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.guitaristthailand.com/article/58-best-wood-for-guitars-2.html>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555
- [36] *Donnan Landscape Services*. 2012. *Ash firewood* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.donnan.com/firewood.htm>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555
- [37] *คุณสมบัติของไม้เนื้อแท้* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://pratoothai.com/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=74. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555
- [38] *การใช้งานและสมบัติทั่วไปของไม้จริง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.eastcoast.co.th/faq.asp>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555

[39] *ไม้แอส* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.sdp-group.com/Ash.html>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555

[40] *เฟอร์นิเจอร์บิลท์อินไม้แอส* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://gimfurniture.com/otherProfile.asp?id=160>. วันที่เข้าถึง: 1 กันยายน 2555

[41] ศูนย์วิจัยมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเทคโนโลยี. *พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic)* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://web.sut.ac.th/cassava/index.php?name=10cas_technology&file=readknowledge&id=19. วันที่เข้าถึง: 2 กันยายน 2555

[42] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). *ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. วันที่เข้าถึง: 2 กันยายน 2555

[43] *เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf. วันที่เข้าถึง: 2 กันยายน 2555

[44] กุลฤดี แสงสีทอง และ ก่อฉัตรศรี สิริรอด. 2554. *แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร* (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www.thaitapiocastarch.org/article26_th.asp. วันที่เข้าถึง: 2 กันยายน 2555

[45] Environment Australia, *Biodegradable plastics*, (Online Resources), Friday, 05-Mar-2010, Available from: <http://www.environment.gov.au/archive/settlements/waste/index.html>. Cited: 5 Sep 2012

[46] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, *พลาสติกย่อยสลายได้* (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://www2.mtec.or.th>. วันที่เข้าถึง: 27 สิงหาคม 2555

[47] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, *ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้*. (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://www2.mtec.or.th>. วันที่เข้าถึง: 8 กันยายน 2555

[48] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, *พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ*. (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://www2.mtec.or.th>. เข้าถึงวันที่: 9 กันยายน 2555

[49] K.Uthaichay, K.Hachawee, N.Arsaipanot and N.Supapat, "Preparation and testing of Thermoplastic starch", 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18-20 October 2005.

[50] S.Pumeechokechai, "Preparation of modified cassava starch and polypropylene blends", Thesis, Science (Applied Polymer Science And Textile Technology), Chulalongkorn University, (2004).

- [51] P.Phuangkasem, "Preparation and application of edible film from cassava starch", Thesis, Food Science and Technology (Food Science), Kasetsart University, (1997).
- [52] T.Pabunruang, "Degradation of cassava starch-filled polyethylene films", Thesis, Science (Inter-Polymer Science), Chulalongkorn University, (1994).
- [53] T. Buasri, M. Nomnut, S. Thammarugsakun, W. Lerdwilitjarud, and N. Sittattrakul, "Decrease of moisture sensitivity of thermoplastic starch with fatty acids and chitosan derivatives" 34th Congress on Science and Technology of Thailand at Queen Sirikit National Convention Center, 31 October - 2 November, 2008
- [54] P.Reawraksa, "Preparation of biodegradable plastic from low density polyethylene and tapioca starch", Thesis, Science (Environmental Science), Chulalongkorn University, (1997).
- [55] Y.Lu, L.Weng and X.Cao, "Morphological, thermal and mechanical properties of ramie crystallites reinforced plasticized starch biocomposites", *Carbohydrate Polymers*, 63(2006) 198-204.
- [56] L.Dobircan, P.A.Sreekumar, R.Satah, N.Lebanc, C.Terrie, R.Gattin and J.M.Saiter, "Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre: Argo-green composites", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40 (2009) 329-334.
- [57] A.A.S Curvelo, A.J.F de Carvalho, J.A.M Agnelli, "Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results", *Carbohydrate Polymers*, 45 (2001) 183-188.
- [58] X. Ma, Jiugao Yu, John F. Kennedy, "Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites", *Carbohydrate Polymers*, 62 (2005) 19-24.
- [59] E.M. Teixeira, D. Pasquini, A. A.S. Curvelo, E. Corradini, M. N. Belgacem and A. Dufresne, "Cassava bagasse cellulose nanofibrils reinforced thermoplastic cassava starch", *Carbohydrate Polymers*, 78 (2009) 422-431.
- [60] K. Kaewtatip and J. Thongmee. "Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites", *Materials & Design*, 40 (2012) 314-318.
- [61] J.J.M.Swinkels and Veendam. "Composition and Properties of Commercial Native Starches". *Starch/Starke*, 37 (1985) 1-5.
- [62] ASTM D 638,1996. "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic(Metric)".

- [63] ASTM E 104.2002. "Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions". Philadelphia : American Society for Testings and Materials.
- [64] R.Chandra and R.Rustgi, "Biodegradable polymer", Progress in polymer Science, 23 (1998) 1273-1335.
- [65] L.Fama, L.Gerschenson and S.Goyanes, "Starch-vegetable fibre composites to protect food Products", Carbohydrate Polymers, 75 (2009) 230-235.
- [66] Curvelo A.A.S., Carvalho A.J.F. and Agnelli J.A.M., "Thermoplastic starch cellulosic fiber composite preliminary results", Carbohydrate Polymer, 45 (2011) 183-188.
- [67] Ma X., Yue J., and Kennedy J.F., "Studies on the properties of natural fibers reinforced thermoplastic starch composites", Carbohydrate Polymer, 62 (2005) 19-24.
- [68] Costa F. J. O. G., Almeida R. R., Lacerda L. G., Carvalho-Filho M. A. S., Bannach G., Schnitzler E., "Thermoanalytical studies of native cassava starch and treated with hydrogen peroxide", Alim. Nutr., 22 (2011) 7-15.
- [69] H. S. Yang, H. J. Kim, H. J. Park, B. J. Lee and T. S. Hwang., "Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler-polyolefin bio-composites", Journal of Composite Structures, 72 (2006) 429-437.
- [70] โครงสร้างภายในของลำต้นพืช (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin>. วันที่เข้าถึง: 11 มีนาคม 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

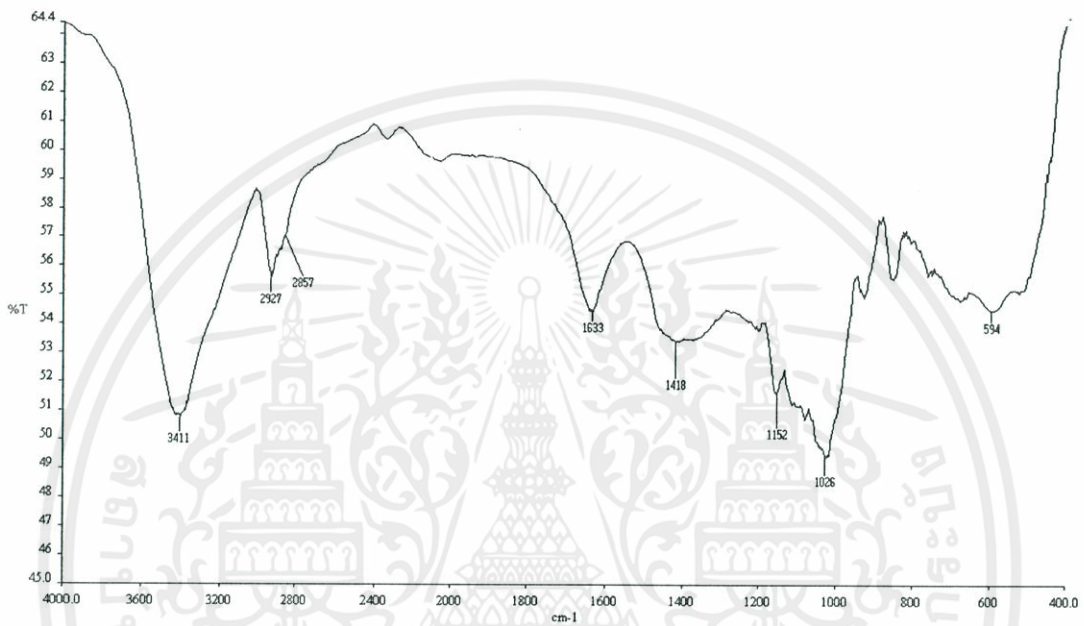


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

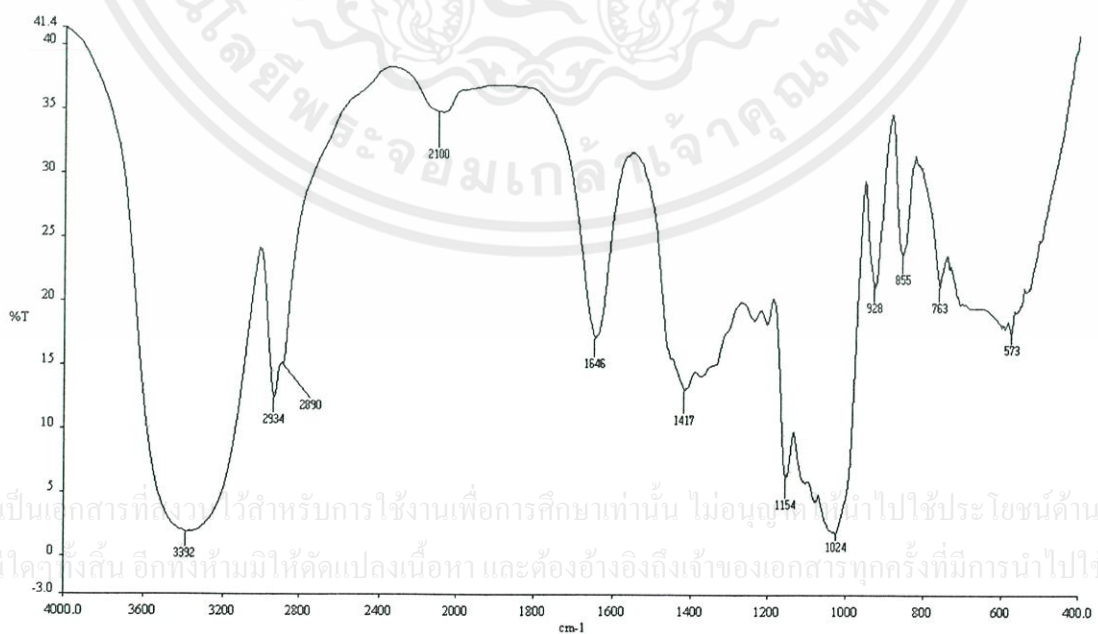
ภาคผนวก ก

4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

(ก) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีย

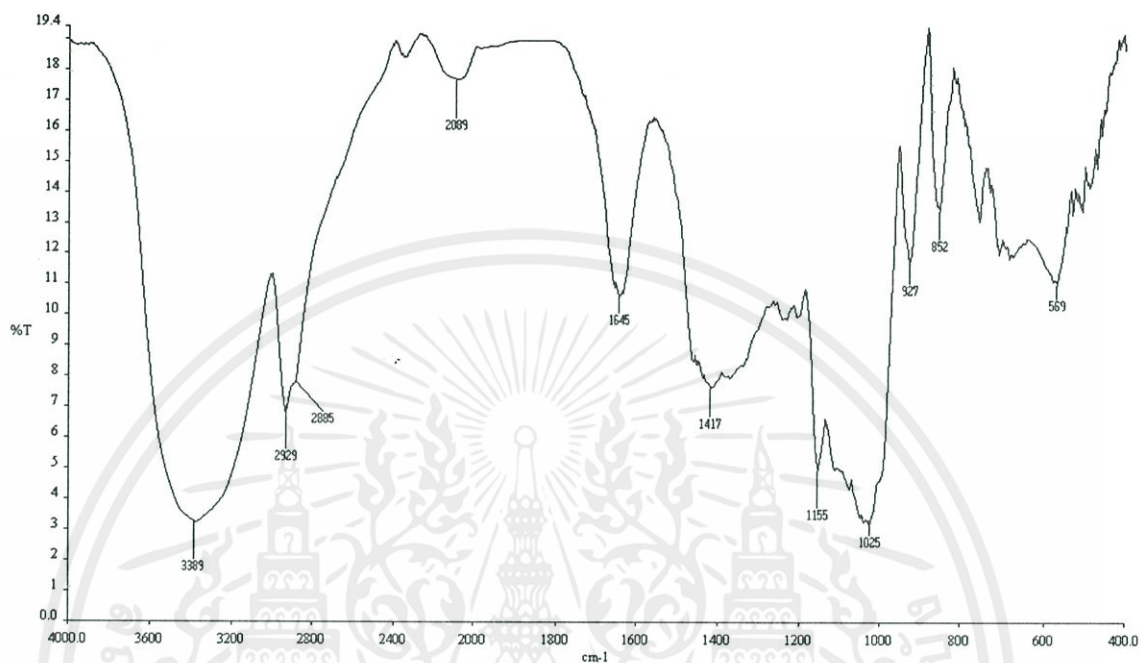


(ข) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลียขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 2.5%

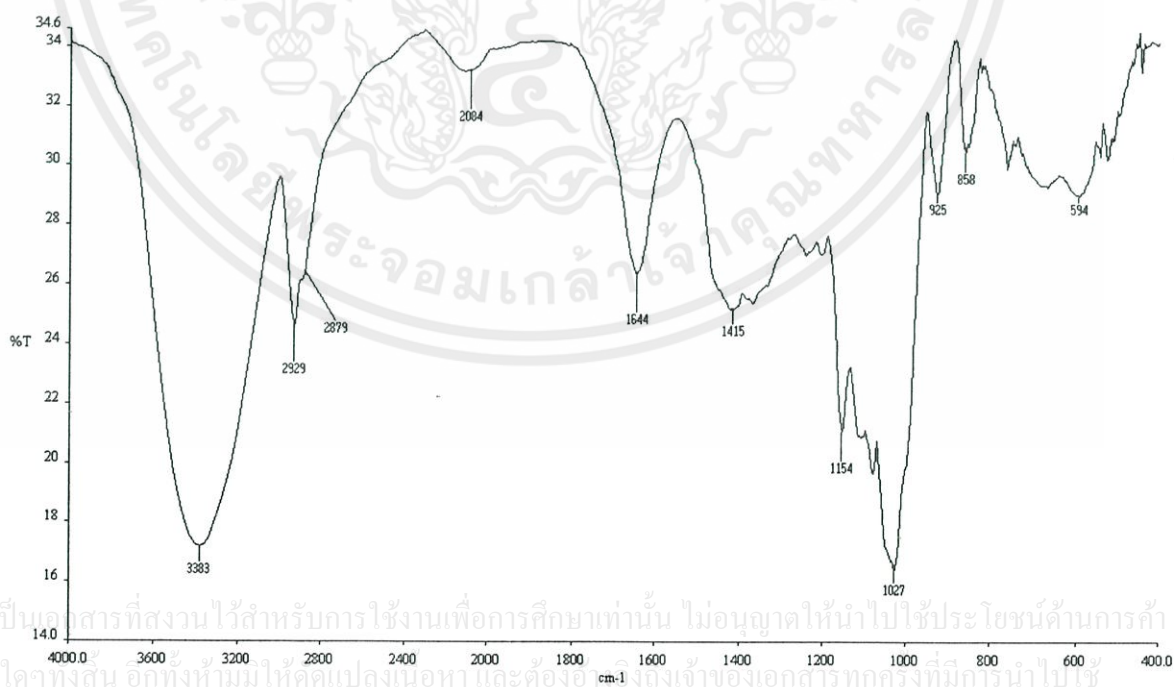


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 5.0%

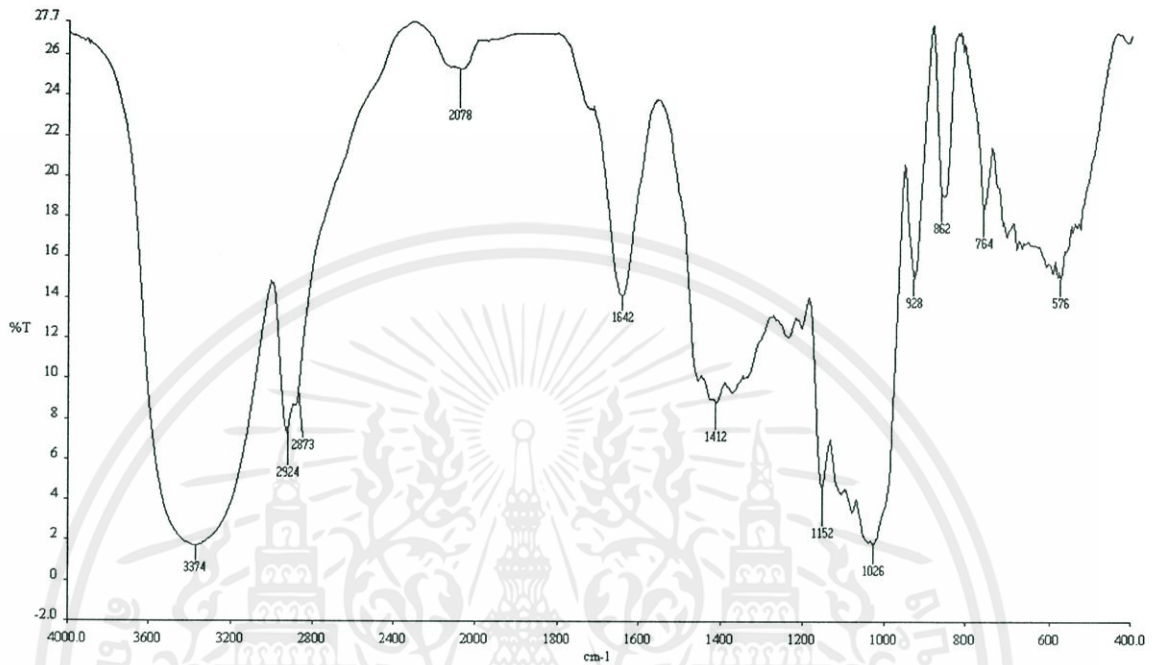


(ง) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 7.5%

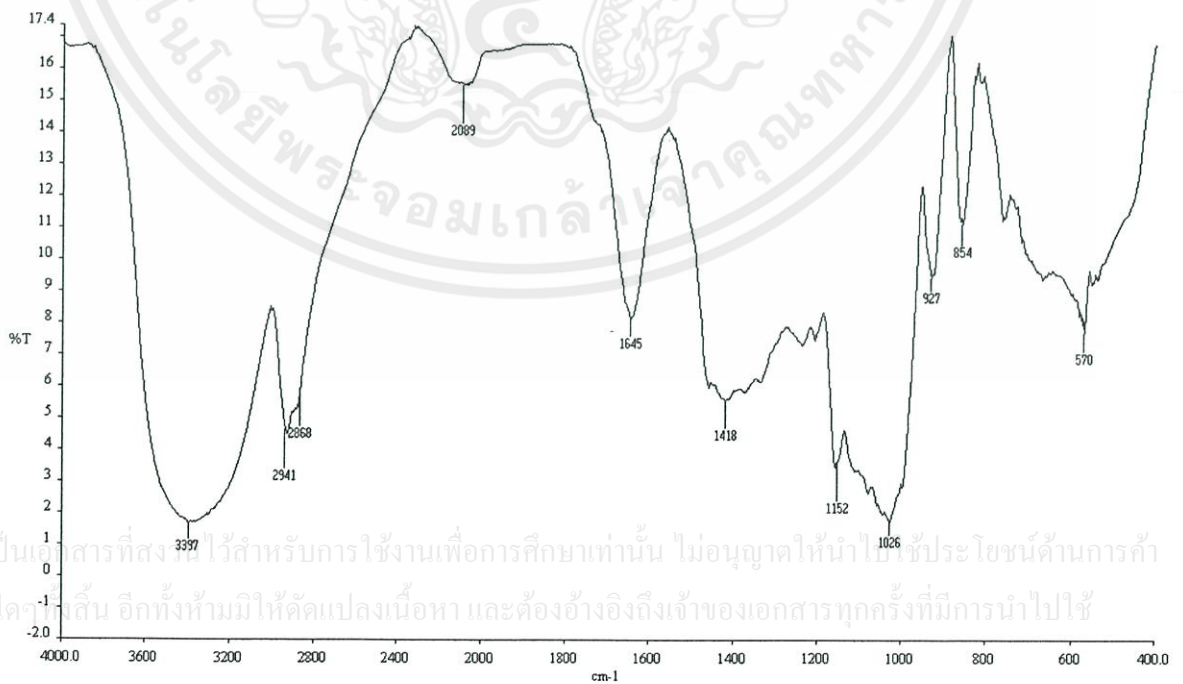


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

(จ) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมขนาด 100-200 mesh ปริมาณ 10%

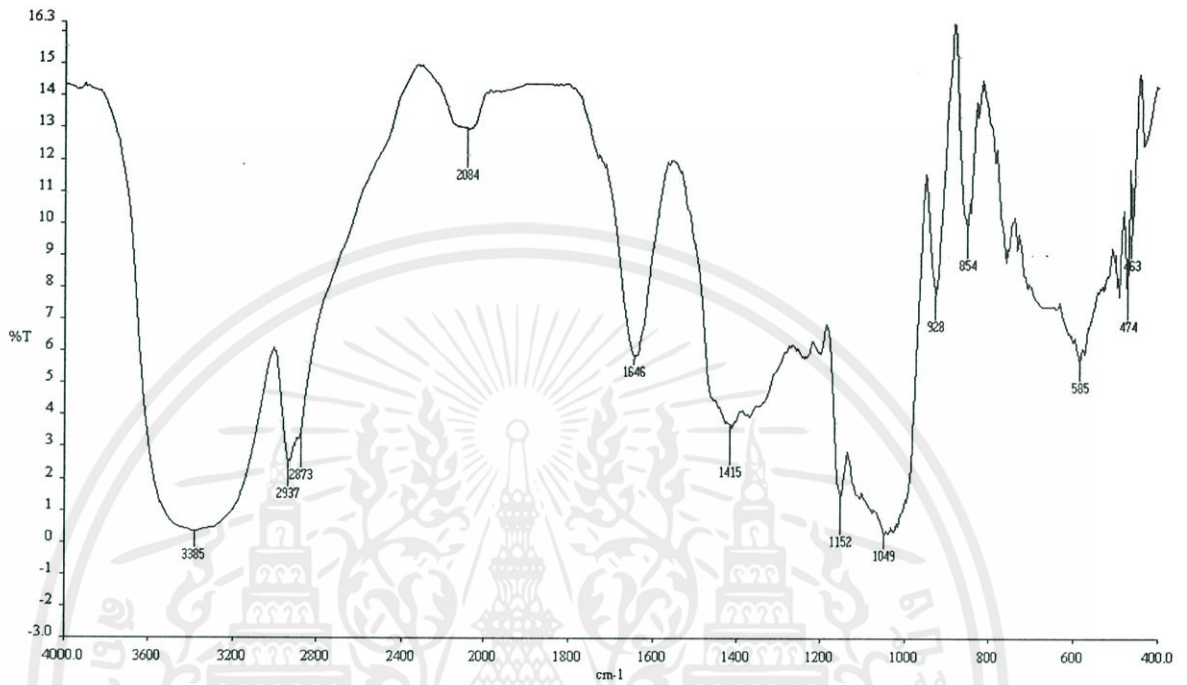


(ข) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเนียมขนาด >50 mesh ปริมาณ 7.5%

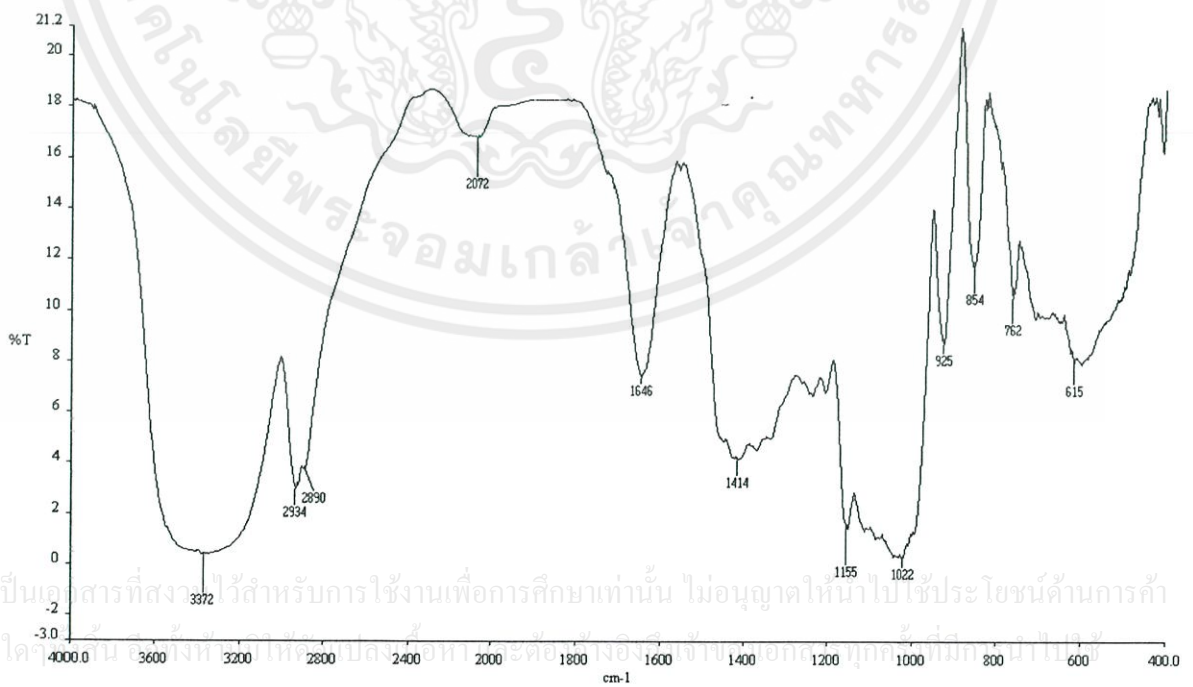


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ช) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเยอขนาด 50-100 mesh ปริมาณ 7.5%



(ซ) อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยซีลีเยอขนาด <200 mesh ปริมาณ 7.5%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2329-1000

ภาคผนวก ข

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำจากการทดสอบโดยการแช่ในน้ำกลั่นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียมจากไม้แอซ

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น (%)							
	0%	2.5% 100-200mesh	5% 100-200mesh	7.5% 100-200mesh	10% 100-200mesh	7.5% >50mesh	7.5% 50-100mesh	7.5% <200mesh
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	256.07	253.33	218.86	210.39	175.37	187.02	196.50	182.29
2	304.16	314.66	274.26	258.39	205.14	237.68	223.66	220.04
3	308.22	315.214	279.01	260.94	207.30	229.67	210.77	217.54
4	291.39	316.13	279.09	255.69	189.84	226.76	195.86	210.25
5	289.59	306.66	271.92	261.64	194.41	221.56	200.89	217.23
6	284.60	309.48	267.40	254.71	197.01	229.32	199.81	215.09
7	263.62	311.02	258.69	248.02	201.18	232.87	200.83	217.87
8	243.45	266.86	243.17	214.33	173.02	205.55	172.24	195.56
9	193.30	270.20	238.42	214.26	173.76	205.76	171.52	190.81
10	184.95	267.61	231.93	220.48	173.70	206.00	171.03	186.47
13	184.10	272.14	233.26	221.91	175.96	205.84	175.01	193.29
16	186.02	274.07	224.23	215.59	169.66	205.85	175.41	185.71
18	188.60	272.12	215.96	211.93	171.03	205.54	175.04	184.08
21	185.79	256.04	200.82	189.86	161.42	187.85	153.66	168.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำจากการทดสอบโดยการแช่ดูดซับความชื้นจากบรรยากาศอิมิตัว
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99% ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติ
ด้วยซีลีเนียมจากไม้แอส

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น (%)							
	0%	2.5% 100-200mesh	5% 100-200mesh	7.5% 100-200mesh	10% 100-200mesh	7.5% >50mesh	7.5% 50-100mesh	7.5% <200mesh
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	11.84	7.105	12.055	10.59	7.78	7.70	8.89	7.25
2	18.81	15.15	19.36	16.81	16.11	17.43	17.04	15.32
3	23.87	21.82	24.52	22.01	21.05	22.68	22.96	21.68
4	29.10	28.17	29.69	26.82	25.63	27.99	28.04	28.66
5	34.01	33.72	34.25	30.89	29.80	32.33	32.94	33.08
6	38.45	35.70	37.97	34.33	33.40	35.78	36.73	37.16
7	41.03	41.23	39.75	36.28	35.80	37.94	39.12	39.38
8	42.91	43.64	41.57	38.90	37.95	40.60	41.21	40.98
9	44.62	44.25	43.90	41.51	38.89	42.84	43.19	43.06
10	45.57	46.62	43.82	42.65	40.83	44.35	44.94	44.09
12	46.02	47.16	44.12	43.37	43.02	44.78	45.04	44.71
14	50.46	51.56	49.65	47.23	46.15	48.41	48.64	46.99
16	56.41	54.86	54.92	51.73	50.63	53.45	53.34	52.55
19	58.91	57.99	57.04	54.47	52.76	57.74	55.13	55.68
22	63.96	61.54	59.06	57.74	54.23	60.54	56.82	58.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล

(ก) ตารางแสดงค่าแรงดึง กับปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยต่าง ๆ กัน

สูตร	แรงดึง (ค่าเฉลี่ย)				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			
	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh
0.0%	57.85	57.85	57.85	57.85	1.05	1.05	1.05	1.05
2.5%	82.90	103.23	115.99	85.70	1.83	3.03	5.65	2.65
5.0%	94.07	109.86	186.55	87.31	5.60	5.34	9.63	4.06
7.5%	195.96	216.38	256.53	128.23	4.70	5.84	13.25	8.36
10.0%	141.89	205.47	205.88	99.07	1.03	0.61	9.80	7.78

(ข) ตารางแสดงความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยต่าง ๆ กัน

สูตร	ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			
	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh
0.0%	4.80	4.80	4.80	4.80	0.02	0.02	0.02	0.02
2.5%	6.01	6.86	8.20	5.66	0.30	0.54	0.52	0.22
5.0%	6.96	7.92	13.16	6.27	0.40	0.56	0.50	0.23
7.5%	13.57	14.73	17.02	9.16	0.21	0.54	0.52	0.69
10.0%	10.27	14.01	13.66	6.88	0.15	0.13	0.70	1.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ตารางมอดูลัส กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีเมนต์ต่างๆกัน

สูตร	มอดูลัส				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			
	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh
0.0%	107.71	107.71	107.71	107.71	0.60	0.60	0.60	0.60
2.5%	190.81	228.13	231.47	181.33	12.54	21.17	12.67	2.34
5.0%	257.76	323.38	334.19	250.07	9.41	9.95	11.17	3.02
7.5%	287.04	333.42	343.00	266.34	18.96	5.32	10.00	9.43
10.0%	292.47	345.69	347.94	272.25	5.10	4.32	5.37	4.95

(ง) ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การยึดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีเมนต์ต่างๆกัน

สูตร	เปอร์เซ็นต์การยึดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			
	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh
0.0%	39.60	39.60	39.60	39.60	0.52	0.52	0.52	0.52
2.5%	36.42	35.71	32.76	37.93	2.62	0.12	0.99	0.74
5.0%	30.86	29.89	27.74	33.10	1.49	0.68	0.98	0.80
7.5%	27.24	26.90	26.56	27.44	0.07	0.72	0.22	1.17
10.0%	27.06	27.15	26.78	29.75	1.70	0.53	0.18	1.25

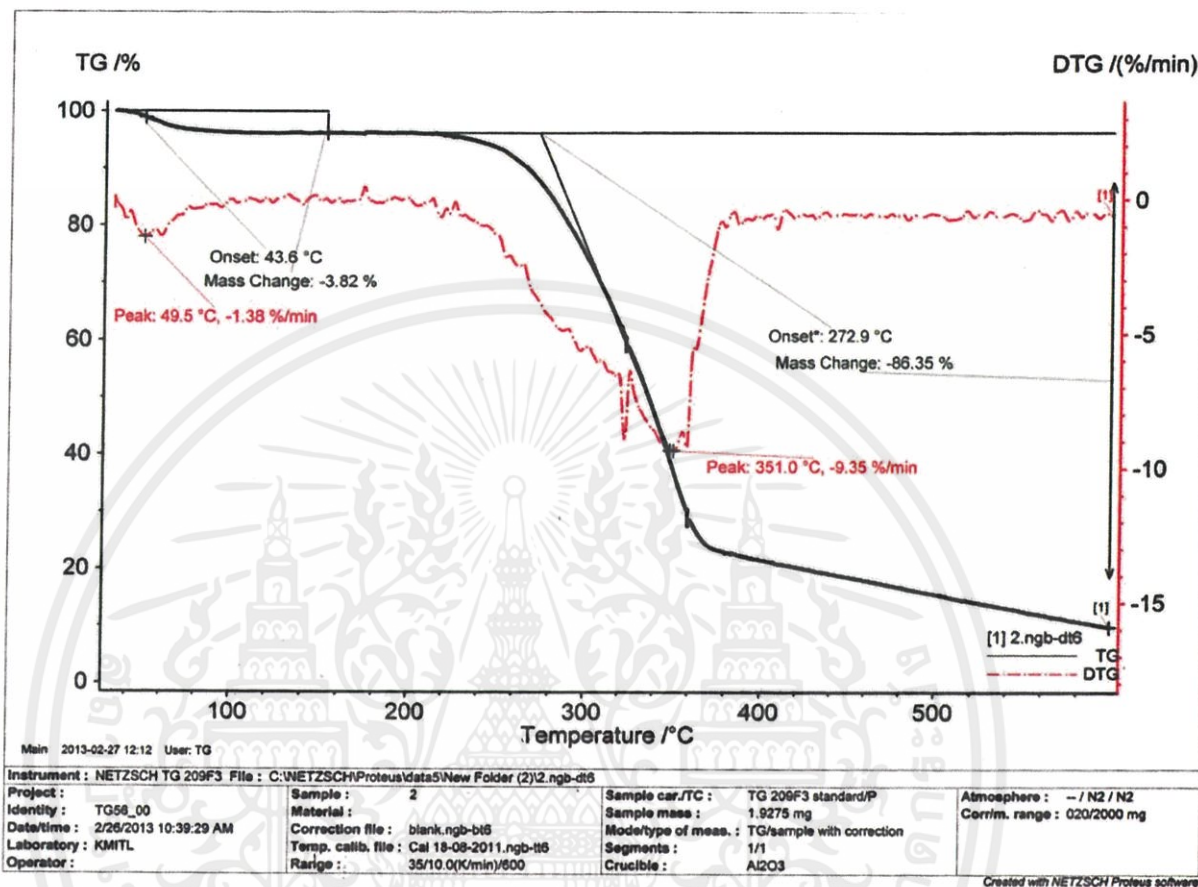
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ) ตารางเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด กับปริมาณและขนาดอนุภาคของซีลีเนียม
ต่างๆกัน

สูตร	เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			
	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 mesh	<200 mesh	>50 mesh	50-100 mesh	100-200 Mesh	<200 mesh
0.0%	58.40	58.40	58.40	58.40	0.52	0.52	0.52	0.52
2.5%	45.67	42.82	31.03	51.74	2.62	0.11	0.99	0.74
5.0%	23.45	19.54	10.97	32.41	1.49	0.68	0.98	0.80
7.5%	8.96	7.61	6.24	9.76	0.07	0.72	0.22	1.17
10.0%	8.22	8.61	7.13	18.99	1.70	0.53	0.18	1.25

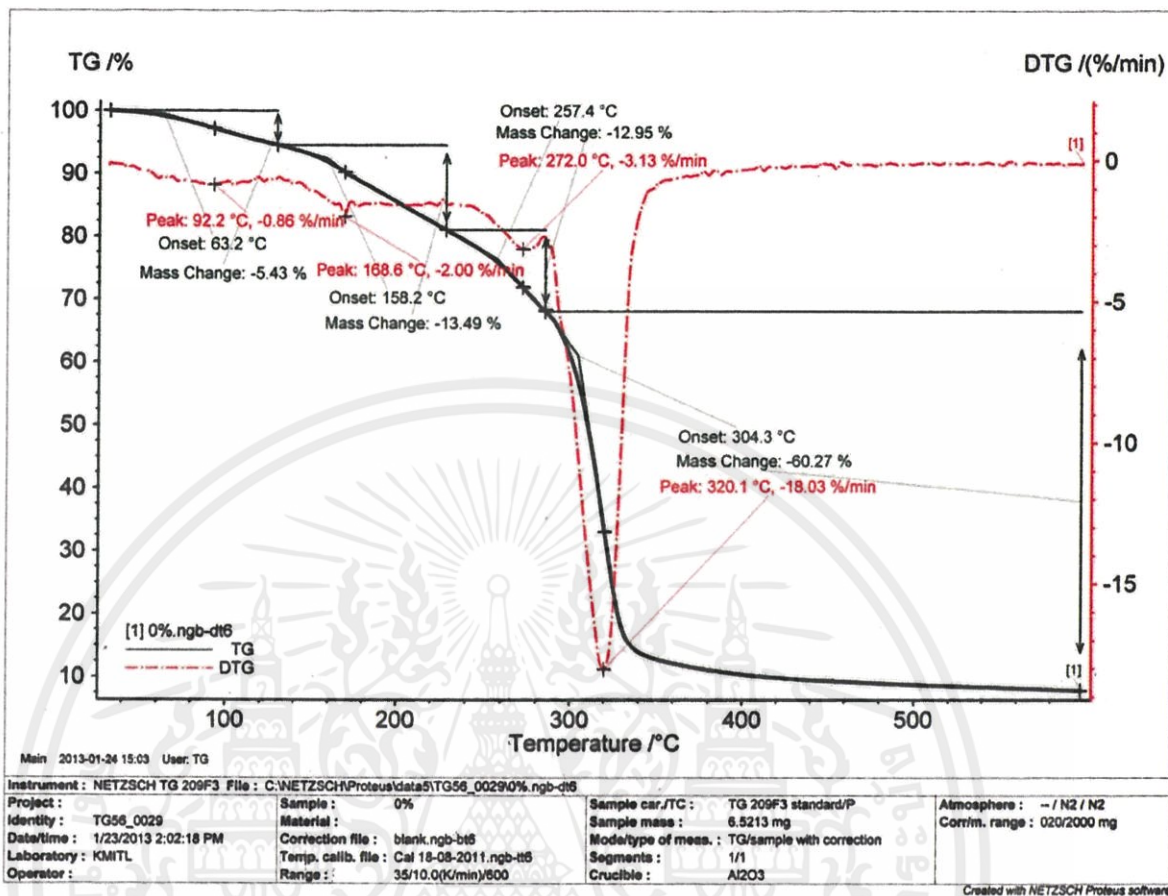
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



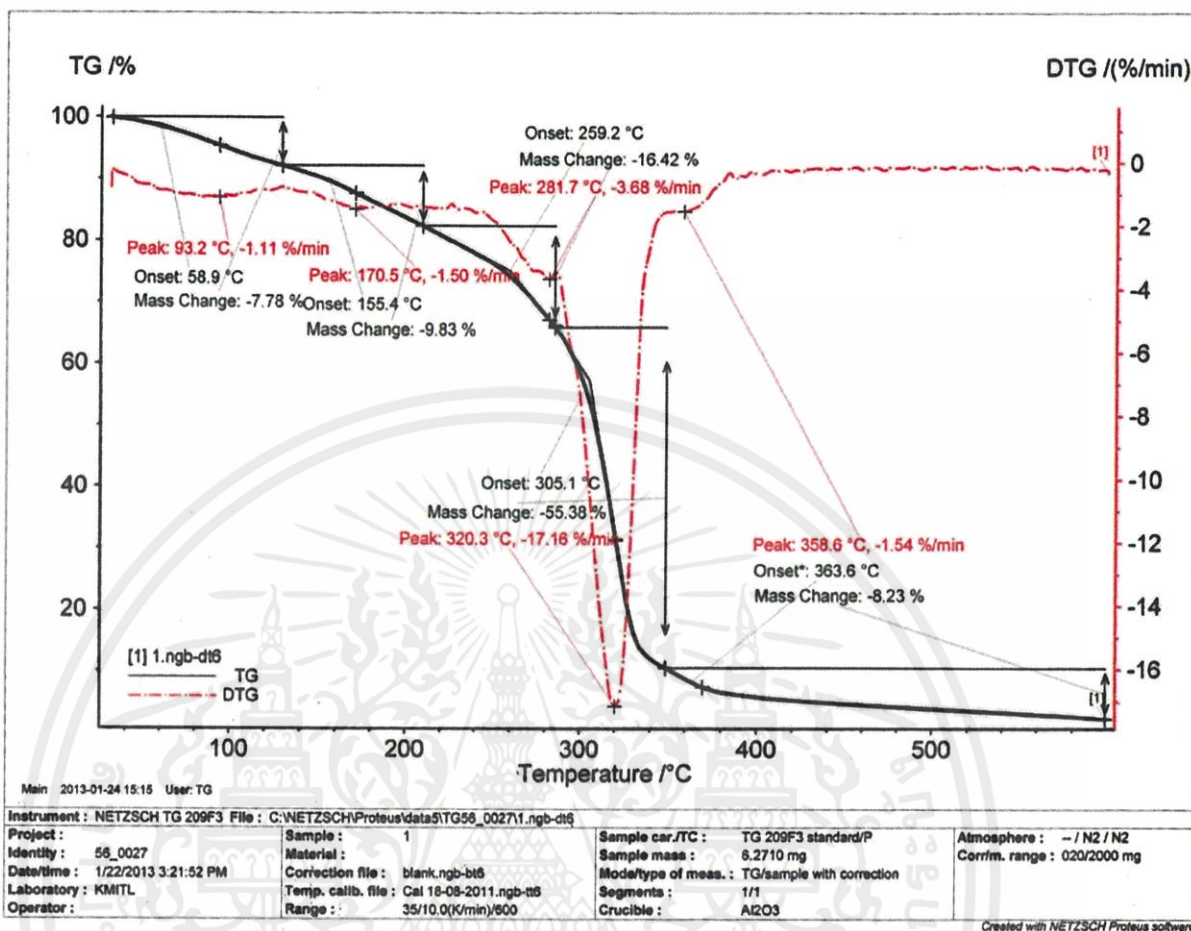
TGA และ DTG ขี้เลื่อยจากไม้แอซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



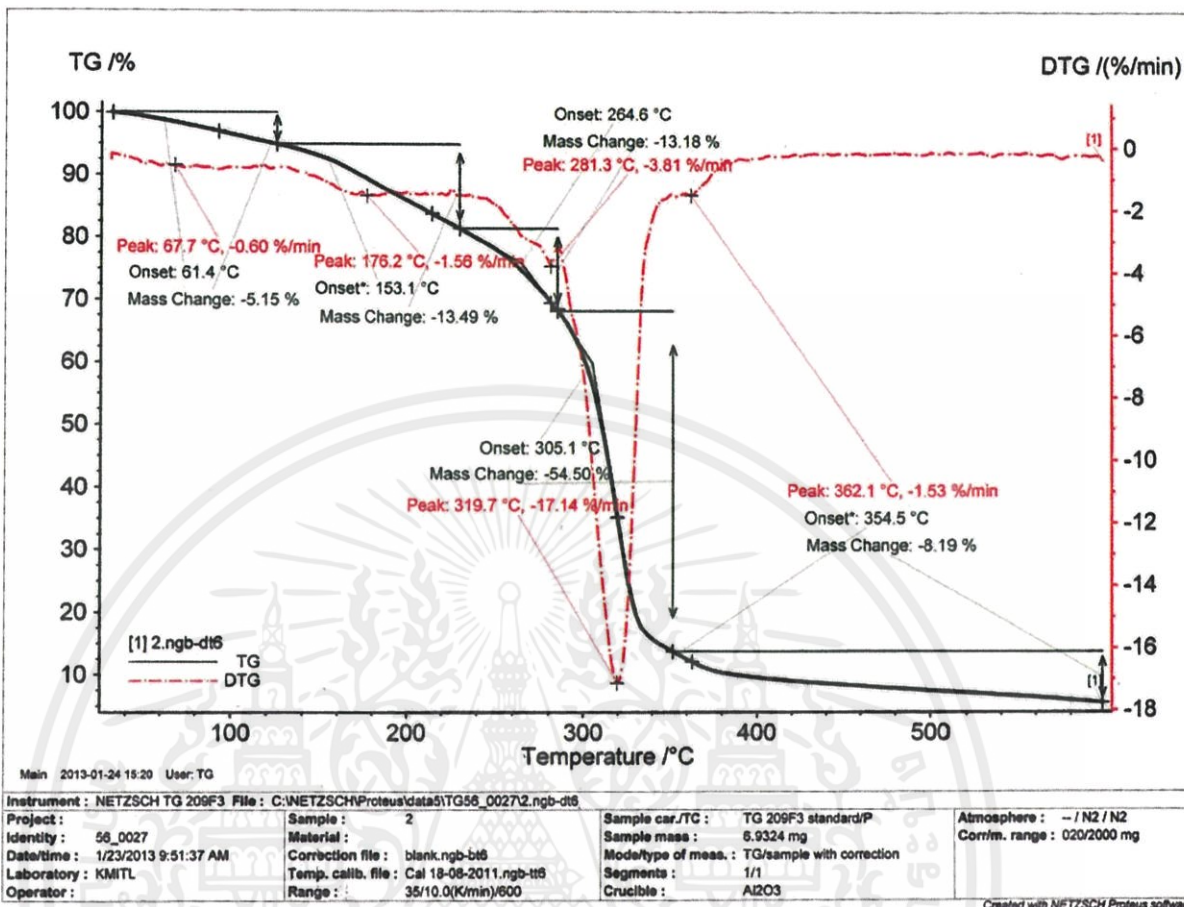
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีสารปรับปรุงสมบัติด้วย
 ขี้เถ้าจากไม้แอส (ปริมาณขี้เถ้า 0%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



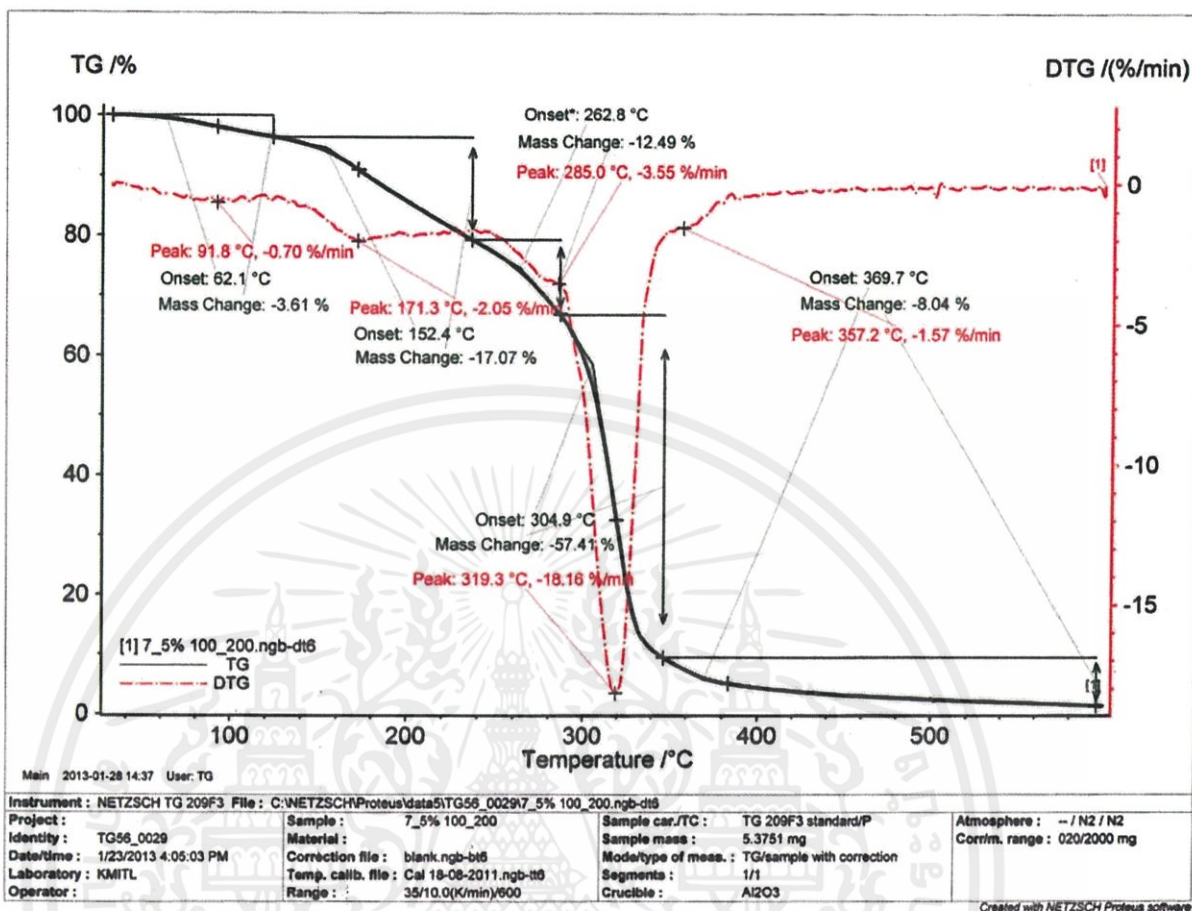
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม
 ไนโอซ ปริมาณ 7.5% ขนาด >50 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



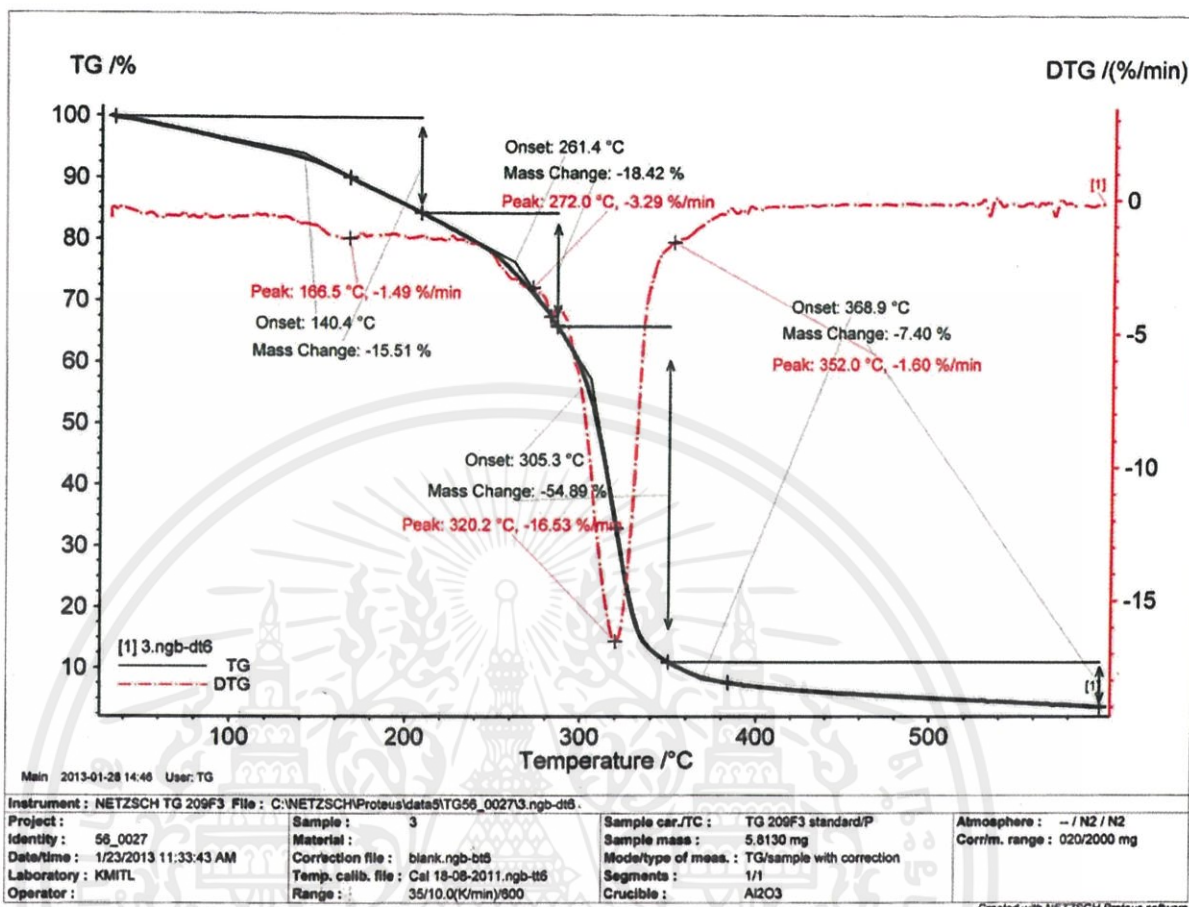
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม
 ไม่เอช ปริมาณ 7.5% ขนาด 50-100 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจาก
ไม้แอส ปริมาณ 7.5% ขนาด 100-200 mesh

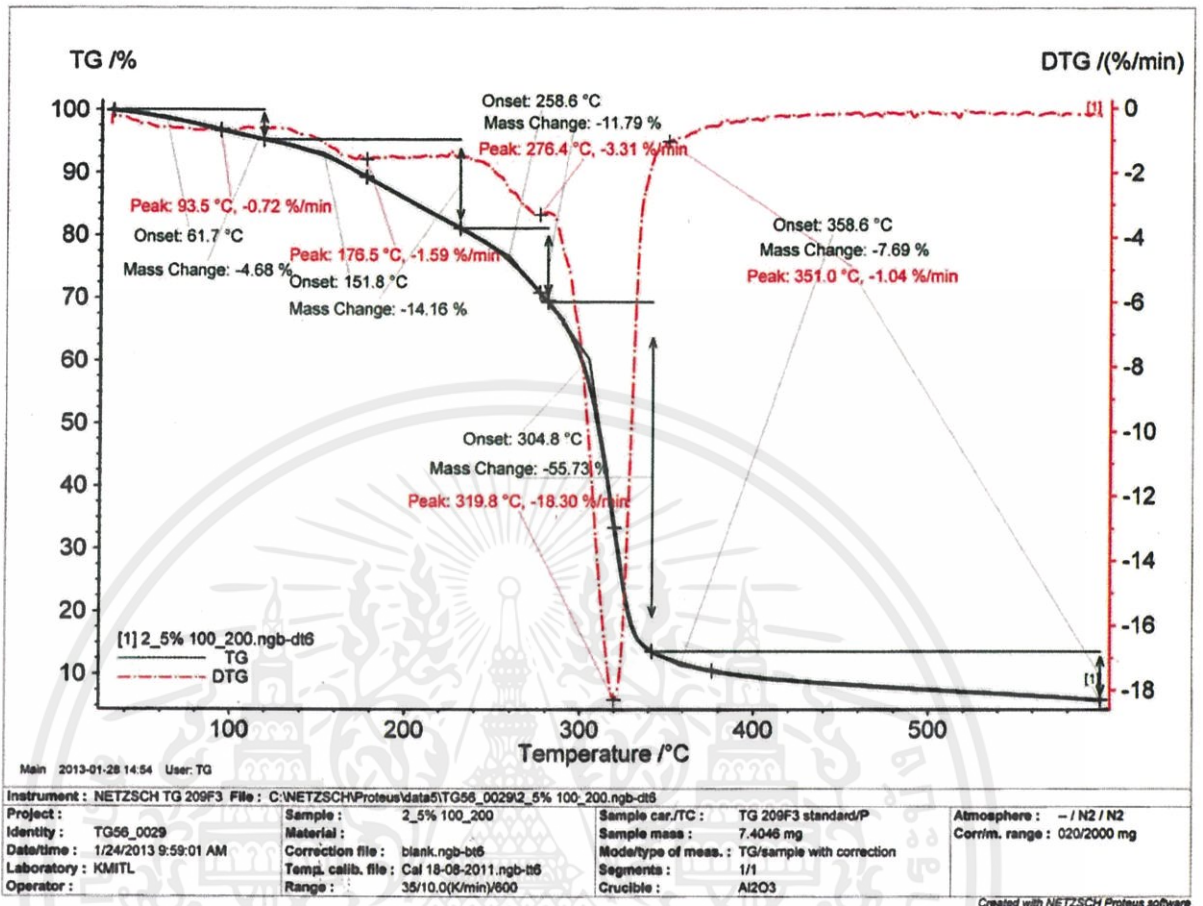
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม

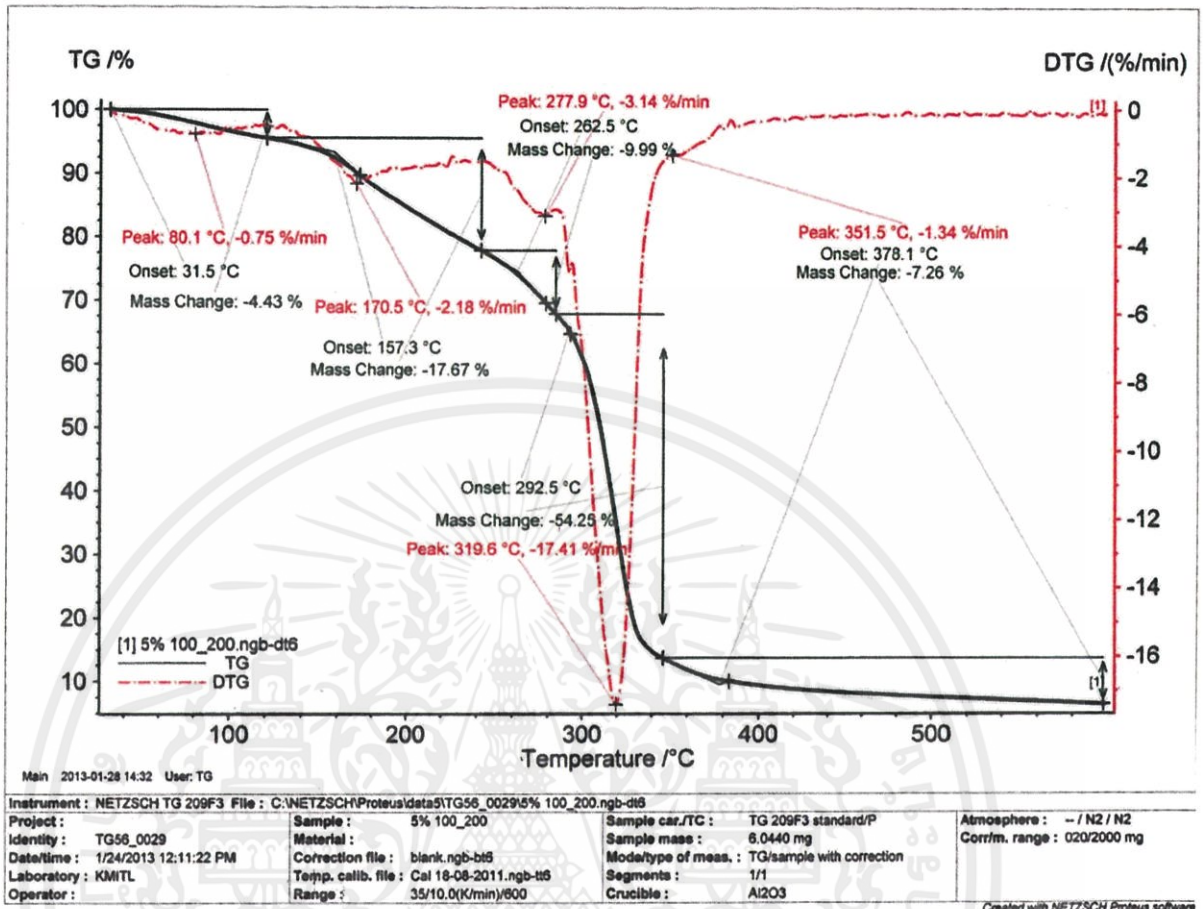
ไม้แชน ปริมาณ 7.5% ขนาด <200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



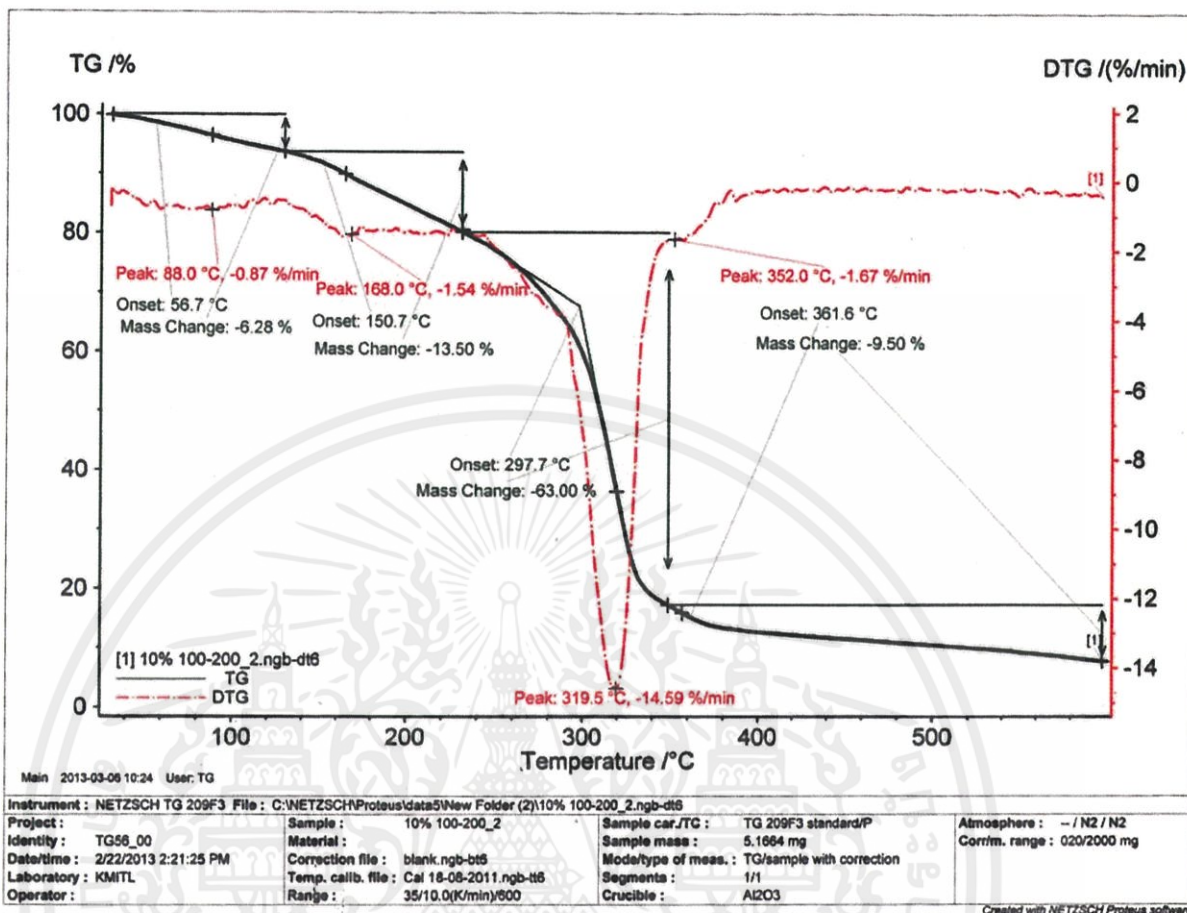
TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม
 ไม้แอส ปริมาณ 2.5% ขนาด 100-200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม
ไม้อะซ ปริมาณ 5% ขนาด 100-200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TGA และ DTG เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยซีลีเนียม
 ไม้อะซง ปริมาณ 10% ขนาด 100-200 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยขี้เถ้าจากไม้แอชในอัตราส่วนต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการย่อยสลายโดยการฝังดิน

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%)							
	0%	2.5% 100-200mesh	5% 100-200mesh	7.5% 100-200mesh	10% 100-200mesh	7.5% >50mesh	7.5% 50-100mesh	7.5% <200mesh
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	63.40	70.36	61.68	71.43	50.03	64.11	65.43	56.98
2	111.61	129.74	110.67	120.37	97.12	114.19	112.42	106.11
3	129.94	152.36	129.00	139.53	113.69	133.44	128.63	125.02
4	143.43	171.36	140.42	155.93	122.64	145.22	142.37	129.69
5	147.78	172.65	140.73	153.58	125.16	147.55	142.47	130.44
6	117.04	160.59	142.32	151.98	120.22	138.21	136.72	127.75
7	115.65	157.82	141.01	149.14	117.73	133.80	133.97	125.60
8	110.82	135.71	119.36	128.49	103.27	118.28	115.61	100.28
9	106.05	128.08	113.98	127.47	98.25	115.84	111.01	90.74
10	99.89	123.06	108.54	118.92	96.70	109.69	105.08	89.45
13	93.48	99.28	97.53	111.53	90.07	100.96	96.03	87.33
16	87.66	94.39	89.09	102.48	84.45	97.16	87.05	82.52
18	83.42	86.01	84.08	95.76	84.04	92.81	82.26	78.66
21	60.47	62.26	60.29	66.69	71.73	77.23	70.63	66.85
25	42.80	51.69	51.12	37.60	60.97	63.68	55.65	56.72
27	29.64	43.78	39.85	30.32	51.81	50.70	45.22	46.11
30	19.01	28.22	32.60	23.43	48.51	44.89	37.86	40.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้