

ผลของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช  
จากแป้งท้าวยายม่อม

EFFECT OF GLUTARALDEHYDE ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC FROM ARROWROOT STARCH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-022

ผลของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช  
จากแป้งท้าวยายม่อม

EFFECT OF GLUTARALDEHYDE ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC FROM ARROWROOT STARCH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF GLUTARALDEHYDE ON PROPERTIES OF  
THERMOPLASTIC FROM ARROWROOT STARCH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-SC-M-014-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “ผลของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งท้าวยายม่อม”  
“EFFECT OF GLUTARALDEHYDE ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC FROM  
ARROWROOT STARCH”  
ชื่อนักศึกษา นางสาวอัจฉิมา สุทธิชุติต  
รหัสประจำตัว 57605055  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ประธานกรรมการ	
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ จันทร์ที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 09.30-12.30 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬารัตน์วลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี รัตนปริพัตน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน 10 พ.ศ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของกลูตาธิโอนต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติก-  
สตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม

ชื่อนักศึกษา

นางสาวอัจฉิมา สุทธิชูจิต

รหัสประจำตัว

57605055

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)

ภาควิชา

เคมี

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาธิโอน โดยการศึกษาทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้สารเชื่อมโยงที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงที่ 0.25 และ 4 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ตามลำดับ ขึ้นรูปชิ้นงานโดยเครื่องกดอัดขึ้นรูป จากผลทดสอบการบวมตัวและการดูดซับความชื้นพบว่า ชิ้นงานแป้งที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมโยงมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและการดูดซับความชื้นสูงกว่าแป้งที่มีการใช้สารเชื่อมโยง โดยเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณที่มากขึ้นหรือมีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ปริมาณผลึกของแป้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่พบว่า การใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณมากขึ้นหรือมีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้นนั้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของแป้งลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้นเล็กน้อย จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณมากขึ้น และปริมาณของสารเชื่อมโยงยังส่งผลต่อการหลอมในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปของแป้ง โดยจากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อมีการใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงหรือสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น รูปจากภาคตัดขวางพบลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและพบเม็ดแป้งที่เกิดการหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่มากขึ้นยังส่งผลทำให้เกิดการย่อยสลายโดยการฝังดินของชิ้นงานแป้งที่ซ้าลง

**คำสำคัญ :** กลูตาธิโอน, การย่อยสลายทางชีวภาพ, เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, แป้งเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Effect of glutaraldehyde on properties of thermoplastic from arrowroot starch
<b>Student Name</b>	Autjima Suthichujit
<b>Student ID</b>	57605055
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

### Abstract

This study aims to investigate properties of thermoplastic starch from arrowroot starch crosslinked by glutaraldehyde. There are two main experiments in this research. Firstly, arrowroot starch was modified using different contents of glutaraldehyde, i.e. 0, 0.25, 0.5, 1, 2 and 4 phr. Secondly, the arrowroot starch crosslinked at 0.25 and 4 phr of glutaraldehyde contents was mixed with native arrowroot starch at a ratio of 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 and 100/0, respectively, and shaped by compression molding. It was found that percentage of swelling and moisture absorption of the crosslinked starch was significantly lower than that of the native starch. Moreover, the percentage of swelling and moisture absorption of crosslinked starch decreased with increasing glutaraldehyde contents. X-ray diffraction patterns of crosslinked starch showed lower crystallinity by increasing content of glutaraldehyde. This result confirmed to the result of mechanical properties that the stress at maximum load and Young's modulus decreased. On the contrary, the strain at maximum load slightly increased with increasing glutaraldehyde contents. For thermal property, the result showed the improved thermal decomposition temperature of the crosslinked starch. In addition, the glutaraldehyde contents also affected in rough surface and incomplete melting observed by cross-section morphology and in prolonged biodegradation of thermoplastic starch.

**Keywords :** Biodegradation, Crosslinked starch, Glutataldehyde, Thermoplastic starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้บรรลุผลสำเร็จได้ก็เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และเป็นประสบการณ์ที่ต่ออย่างยิ่งกับตัวของข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และเอาใจใส่ข้าพเจ้ามาโดยตลอดในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และผศ.ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา และตรวจทานแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด นักเคมีและเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกทั้งทางด้านของสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีทุกคน ที่เป็นกำลังใจสำคัญ คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และสนับสนุนให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่มีส่วนช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวอัจฉิมา สุทธิชูจิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	4
2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) .....	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ .....	4
2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ .....	5
2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) .....	6
2.1.3.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	7
2.1.3.2 แนวโน้มการเติบโตของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	8
2.1.3.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	8
2.1.3.4 ผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	9
2.1.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ .....	10
2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย .....	11
2.1.4.1 การทดสอบโดยการฝังดิน .....	11
2.1.4.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ .....	11
2.1.4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป .....	11
2.2 แป้ง (Starch).....	12
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง .....	12
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง .....	13
2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose).....	13
2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin) .....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 สารตัวกลาง .....	15
2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง .....	16
2.2.3 สมบัติของแป้ง.....	16
2.2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย .....	16
2.2.3.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization).....	18
2.2.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation).....	19
2.2.3.4 ความหนืด .....	19
2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch).....	20
2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร.....	20
2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification).....	20
2.3.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification) .....	22
2.3.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification) .....	22
2.4 แป้งทำยายม่อม.....	23
2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้งทำยายม่อม .....	23
2.4.2 สมบัติของแป้งทำยายม่อม .....	24
2.4.3 การผลิตแป้งจากหัวทำยายม่อม .....	24
2.5 กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde).....	24
2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	27
2.6.1 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของพลาสติไซเซอร์.....	27
2.6.2 กลีเซอรอล (Glycerol) .....	28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>34</b>
3.1 สารเคมี .....	34
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.3 การทดลอง.....	37
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งทำยายม่อม.....	37
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งทำ- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งทำยายม่อมบริสุทธิ์.....	38
3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป .....	38
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	38
3.4.1 การทดสอบการบวมตัว (Swelling).....	38
3.4.2 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption).....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) .....	39
3.4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) .....	39
3.4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	40
3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	40
3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	41
3.4.8 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์เจล (Gel fraction) .....	41
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>42</b>
4.1 การทดสอบการบวมตัว .....	43
4.1.1 การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม .....	44
4.1.2 การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์.....	46
4.2 การหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น.....	47
4.2.1 เปอร์เซ็นต์ดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม	47
4.2.2 เปอร์เซ็นต์ดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	48
4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	50
4.3.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม	50
4.3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	52
4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน.....	53
4.4.1 สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม .....	53
4.4.2 สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	56
4.5 สัณฐานวิทยา.....	59
4.5.1 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม .....	59
4.5.2 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	60
4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	63
4.6.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม .....	63
4.6.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	65
4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม ภายหลังกการ	
ฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน .....	68
4.7.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงและแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังกการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน .....	71
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>76</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	77
เอกสารอ้างอิง .....	78
ภาคผนวก .....	82
ภาคผนวก ก .....	83
ภาคผนวก ข .....	84
ภาคผนวก ค .....	85
ภาคผนวก ง .....	87
ภาคผนวก จ .....	88
ภาคผนวก ฉ .....	94
ประวัติผู้เขียน .....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกชนิดต่างๆ.....	9
2.2	ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพลาสติกชนิดต่างๆ .....	10
2.3	สมบัติสำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน .....	13
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ.....	16
2.5	การพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95 องศาเซลเซียส ..	17
2.6	ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ .....	18
2.7	ส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักของหัวทำวยายม่อมสด .....	23
2.8	ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลูตาร์ลดีไฮด์ .....	25
2.9	สมบัติทั่วไปของกลูตาร์ลดีไฮด์ .....	26
2.10	สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล .....	28
2.11	ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลีเซอรอล.....	29
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทำวยายม่อม ตราปลาไทย 5 ดาว.....	34
3.2	สมบัติทั่วไปของกลูตาร์ลดีไฮด์ เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka analytical.....	34
3.3	อัตราส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียม .....	37
3.4	สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียม .....	38
4.1	อักษรย่อของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	42
4.2	ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อมสูตรต่างๆ.....	51
4.3	ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งทำวยายม่อม บริสุทธิ์.....	53
4.4	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อมสูตรต่างๆ .....	55
4.5	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของ กลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธิ์ .....	58
4.6	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำ วยายม่อมสูตรต่างๆ หลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน .....	70
4.7	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิ- เมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์หลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน .....	74
ก.1	เปอร์เซ็นต์เจลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ .....	83
ข.1	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง .....	84
ข.2	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง .....	84
ค.1	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1% เป็นระยะเวลา 15 วัน .....	85
ค.2	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1% เป็นระยะเวลา 15 วัน .....	86
ง.1	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ .....	87
ง.2	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ .....	87
ฉ.1	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน .....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างสัญลักษณ์บ่งบอกผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของประเทศต่างๆ.....	7
2.2	วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.3	โครงสร้างของอะไมโลส.....	14
2.4	โครงสร้างปิดเกลียวของอะไมโลส.....	14
2.5	ภาพจำลองการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับสารประกอบอินทรีย์.....	15
2.6	โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	15
2.7	กราฟแสดงการเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้ง.....	19
2.8	โครงสร้างทางเคมีของกลูตารัลดีไฮด์.....	26
2.9	การเชื่อมโยงระหว่างหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่เอมีนของเซลล์ลูลินทรีย์.....	27
2.10	โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล.....	29
3.1	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน....	40
3.2	เครื่องทดสอบเนกประสงค์.....	41
4.1	ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์.....	43
4.2	โครงสร้างเชื่อมโยงทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์.....	44
4.3	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งทำวยายม่อม.....	45
4.4	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธิ์.....	46
4.5	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธิ์.....	46
4.6	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งทำวยายม่อม.....	47
4.7	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธิ์.....	49
4.8	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธิ์.....	49
4.9	ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งทำวยายม่อมสูตรต่างๆ.	50
4.10	ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งทำว	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ณ

	ยายม่อมบริสุทธิ์ .....	52
4.11	ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง ท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าว- ยายม่อมบริสุทธิ์ .....	52
4.12	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม .....	54
4.13	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์	56
4.14	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์....	57
4.15	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าว- ยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างกัน .....	59
4.16	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์	61
4.17	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์....	62
4.18	ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ..	63
4.19	มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ .....	63
4.20	เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ .....	64
4.21	ความแข็งแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ .....	65
4.22	มอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูก เชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์.....	65
4.23	เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ .....	66
4.24	ความแข็งแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ .....	66
4.25	มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์....	67
4.26	เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์.....	67
4.27	ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	68
4.28	มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลัง การฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน .....	69
4.29	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร ต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน .....	69
4.30	ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	71
4.31	มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	72
4.32	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 0.25 phr กับแป้งท้าว- ยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน .....	72
4.33	ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว- ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	73
4.34	มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อม ที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	73
4.35	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาธัลไฮต์ 4 phr กับแป้งท้าว- ยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน .....	74
จ.1	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0TPCAS .....	88
จ.2	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS.....	88
จ.3	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.5TPCAS.....	89
จ.4	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 1TPCAS .....	89
จ.5	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 2TPCAS .....	90
จ.6	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS .....	90
จ.7	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS30 .	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.8	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS50 .	91
จ.9	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS70 .	92
จ.10	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS30.....	92
จ.11	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS50.....	93
จ.12	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS70.....	93
ฉ.1	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน .....	94
ฉ.2	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน.....	95
ฉ.3	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน .....	96
ฉ.4	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน.....	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากภายในแต่ละปี ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะ ไม้ กระจก หรือแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเด่นที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรงสูง แต่น้ำหนักเบา สามารถปรับปรุงให้มีสมบัติตรงตามการใช้งาน จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ดี ข้อเสียที่สำคัญที่สุดของพลาสติก คือ วิธีการกำจัดหรือย่อยสลายทำได้ยาก หากนำไปฝังดินจะต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนานและทำให้ดินเสื่อมสภาพ หากนำไปทิ้งในทะเลก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ หรือหากทำการเผาก็ทำให้เกิดควันพิษที่เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสุขภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ในขณะที่ปริมาณการใช้พลาสติกเพิ่มมากขึ้น ปัญหาขยะพลาสติกที่ยากต่อการกำจัดก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ในปัจจุบันที่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมถูกหยิบยกขึ้นมาให้ความสำคัญ แนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก คือ การใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทดแทน

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มักผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ ที่นิยมที่สุด คือ แป้ง โดยแป้งนั้นได้มาจากการเพาะปลูกพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง มันเทศ มันสำปะหลัง มันฝรั่ง และหัวท้าวายม่อม เป็นต้น โดยพืชผลทางการเกษตรเหล่านี้จัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถทดแทนใหม่ได้ (Renewable resources) ดังนั้นพลาสติกที่ผลิตจากผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้จึงมีใช้ไม่มีวันหมด หากแต่การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพนั้น มีข้อจำกัดที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึง นั่นคือ โดยส่วนมากจะให้สมบัติเชิงกลต่ำ และมีความว่องไวต่อความชื้นสูง [1] จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ด้วยข้อจำกัดนี้เองทำให้เกิดการค้นคว้าวิจัยมากมาย ที่มุ่งเน้นด้านการปรับปรุงสมบัติด้อยของพลาสติกจากแป้งนี้ให้ดีขึ้นทัดเทียมพลาสติกจากปิโตรเคมี เพื่อให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้โดยไม่มีข้อจำกัด

แป้งที่ถูกนำมาปรับปรุงสมบัติบางประการด้วยความร้อน เอนไซม์ หรือสารเคมีต่างๆ เรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch) หนึ่งในกระบวนการแปรรูปแป้งที่เป็นที่นิยม ได้แก่ การเชื่อมโยงแป้ง โดยใช้สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้ง แป้งที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วจะมีความหนืดขณะร้อนสูงขึ้น มีความแข็งแรงและความเสถียรมากขึ้น มีการละลายและการดูดซับน้ำที่ลดลง ด้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือนได้ดี [1]

แป้งท้าวายม่อม เป็นแป้งที่ผลิตจากหัวท้าวายม่อม (*Tacca Leontopetaloides*) ซึ่งเป็นพืชพื้นบ้านที่สามารถปลูกได้ง่าย ไม่มีปัญหาเรื่องโรคและศัตรูพืช นิยมนำมาใช้ในการทำขนมหรืออาหารประเภทที่ต้องการความข้นหนืด เนื่องจากมีสมบัติเด่นในด้านการทำให้อาหารมีความหนืดสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ใช้ในปริมาณน้อย นอกจากนี้แป้งท้าวยายม่อมยังมีคุณสมบัติย่อยง่าย จึงมักใช้เป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยพักฟื้น หรือผู้มีปัญหาเกี่ยวกับระบบย่อยอาหาร [2]

กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) จัดเป็นสารฆ่าเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูง จึงนิยมใช้ในโรงพยาบาลสำหรับเช็ดล้างเครื่องมือแพทย์บางชนิดที่ฆ่าเชื้อด้วยด้วยความร้อนไม่ได้ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมการชุบเจาะน้ำมัน ไขฟอกหนัง และใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ แต่สำหรับในงานวิจัยนั้น กลูตารัลดีไฮด์นิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงที่ใส่ลงไปเพื่อปรับแต่งสมบัติของสารบางชนิด เช่น แป้ง [3] โปรตีน [4] คอลลาเจน [5] และโคโตซาน [6] เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง ที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ [3] ใช้กลีเซอรอล 40 phr น้ำ 100 phr และเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้ปริมาณของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลส 0.02 phr เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) โดยงานวิจัยทำการศึกษาค่าสมบัติของแป้งตัดแปรที่ใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน คือ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของแป้งที่ได้ตัดแปรมีค่าสูงกว่าแป้งตัดแปร โดยค่าความแข็งแรงดึงของแป้งตัดแปรนั้นลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.5 – 28.7 MPa ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.9 – 7.8% สำหรับในด้านของการศึกษาปริมาณความชื้น พบว่า แป้งที่ไม่ได้ตัดแปรมีปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content) สูงกว่าแป้งตัดแปร และความชื้นที่วัดได้ของแป้งตัดแปรมีค่าลดลง เมื่อใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของชิ้นงานแป้งตัดแปรที่เตรียมได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณต่างๆ เพื่อให้ได้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยง (Thermoplastic crosslinked arrowroot starch, TPCAS) และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่เตรียมได้ เช่น การบวมตัว การดูดซับความชื้น การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินของแป้งตัดแปรที่ใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (TPCAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่แตกต่างกัน

2) วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่างๆ ได้แก่ การบวมตัว การดูดซับความชื้น การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

3) วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่างๆ เมื่อทำการนำแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงมาผสมกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการดูดซับความชื้น และสามารถนำผลของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลให้สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางในอนาคต ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการช่วยแปรรูปแป้งท้าวยายม่อมให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกมีปริมาณการบริโภคเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทุกปี โดยเฉลี่ยแล้วจะมีพลาสติกบนโลกกว่า 100 ล้านตัน และพลาสติกโดยส่วนมากที่ใช้ในชีวิตประจำวันมักเป็นพลาสติกจากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายและกำจัดได้ยาก ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา จึงได้เกิดแนวความคิดในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทน เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยแบ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ง่าย และมีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (Cellulose) นอกจากนี้ยังสามารถนำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ทั้งยังมีราคาถูก จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง ในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมีในบางการใช้งาน ซึ่งนอกจากจะมีข้อดีที่เหนือกว่าในด้านของการย่อยสลายทางชีวภาพได้แล้ว ยังจัดเป็นวัตถุดิบจากทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถทดแทนใหม่ได้อีกด้วย

### 2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic)

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ในปัจจุบันมีหลายองค์กรได้ให้คำนิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ไว้มากมาย เช่น International organization for standardization (ISO) ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน [7]

American society for testing and materials (ASTM) ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากการสูญเสียคุณสมบัติบางประการ [7]

โดยทั่วไปพลาสติกย่อยสลายได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic)
4. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastic) พลาสติกที่เกิดการย่อยสลายโดยแสง มักถูกเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงไป หรือทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง สามารถแตกหักง่ายภายใต้แสง เช่น การมีหมู่คีโตนอยู่ในโครงสร้าง เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสงจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ แต่การย่อยสลายของพลาสติกแบบนี้มีข้อจำกัดในการทำงานเฉพาะพลาสติกที่ต้องสัมผัสกับแสงโดยตรงเท่านั้น [1, 7]

2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) พลาสติกที่เกิดการย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน มักเกิดในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) โดยมีหลักการ คือ ปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์จะสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสงและความร้อนจะทำให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ [1, 7]

3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic) พลาสติกที่เกิดการย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มักเกิดกับพลาสติกที่มีหมู่เอสเทอร์ (Ester groups) หรือเอไมด์ (Amide groups) อยู่ในโครงสร้าง เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) หรือพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis)

ซึ่งประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น เอนไซม์ไลเปส (Lipase) และเอนไซม์เอสเทอร์เรส (Esterase) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น โลหะแอสคาไลต์ (Alkali metals) เบส และกรด ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ

แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl groups) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [1, 7]

4. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) พลาสติกที่เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ มักเกิดการย่อยสลายจากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้น

แรกจะเป็นการย่อยสลายให้โครงสร้างของโมเลกุลแตกออก หรือเรียกว่าขั้น Depolymerization เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มักจะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิตจำพวกแบคทีเรีย หรือเชื้อรา จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งทำหน้าที่ตัดสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งแบบไม่เป็นระเบียบ และแบบเป็นระเบียบโดยตัดพันธะจากปลายสุดก่อนตามลำดับ จนได้สารประกอบที่เล็กจนสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ จากนั้นจึงจะเข้าสู่ชั้นที่ 2 คือ สารประกอบที่ได้จากการย่อยในขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ และถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ ชีวมวล (Biomass) และก๊าซต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนโตรเจน โดยประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์ และสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ออกซิเจน ความชื้น หรืออุณหภูมิ [1, 7]

### 2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) หรือ พลาสติกชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายกลายเป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต โดยการย่อยสลายและการดูดซึมน้ำต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกเรียกในอีกหลายชื่อ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally degradable plastics, EDP) พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือในชื่อที่มีความหมายคล้ายคลึงกัน เช่น พลาสติกสีเขียว (Green plastics) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน [8]

ซึ่งในปัจจุบันองค์กรในต่างประเทศหลายๆองค์กร ได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานวิธีการทดสอบและการรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น International organization for standardization (ISO), American society for testing and materials (ASTM), German institute for standardization (DIN) และ Japanese industrial standards (JIS) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับการรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นมีรายละเอียดที่ใกล้เคียงกัน หากแต่จะแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องขององค์ประกอบ วิธีการทดสอบ และคุณสมบัติเพื่อผ่านการรับรอง [8]

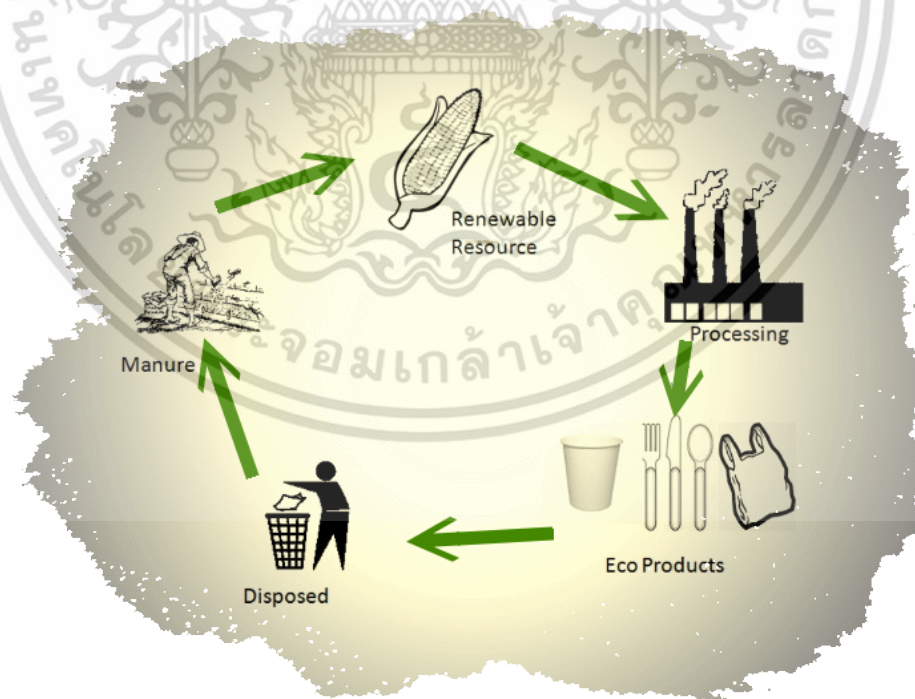
การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดว่า พลาสติกที่ประกอบโดยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด ภายใต้การย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์แบบมีออกซิเจน จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% ไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารชีวมวล ภายใน 6 เดือน สำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายจะต้องนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงสภาพในดินได้ โดยไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะถือว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อผ่านการรับรองแล้วก็จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นวัสดุที่มีสมบัติย่อยสลายได้ เช่น OK Compost ของประเทศเบลเยียม Compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี หรือ GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น [8-9]



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสัญลักษณ์บ่งบอกผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของประเทศต่างๆ [8]

### 2.1.3.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Candle-to-grave concept เป็นแนวคิดในการจัดการกับวัสดุเหลือใช้ต่างๆ โดยจะพิจารณาว่าวัสดุเหล่านั้นมีวิธีการจัดการที่เหมาะสมอย่างไร เช่น ในกรณีของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพพืชเมื่อโตเต็มที่แล้วจะถูกเก็บเกี่ยวนำไปทำเป็นแป้ง ก่อนจะแปรรูปเป็นพลาสติก เมื่อนำไปใช้แล้วจึงทำการกำจัดด้วยวิธีการฝังลงในดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดิน และถูกย่อยสลายได้สารอาหารสำหรับพืชต่อไป ววนเวียนเช่นนี้เป็นวัฏจักรโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1]



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.2 แนวโน้มการเติบโตทางการตลาดของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ธุรกิจของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นขึ้นเมื่อประมาณ ค.ศ. 1990 จนมาถึงปัจจุบัน เรียกได้ว่าเป็นธุรกิจที่ประสบความสำเร็จในระดับอุตสาหกรรม จากข้อมูลพบว่าส่วนแบ่งทางการตลาดของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมีนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้กำลังการผลิตทั่วโลกในปี ค.ศ. 2005 มีประมาณ 360,000 ตัน และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [9]

### 2.1.3.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น

#### 1. ด้านบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

สำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันพลาสติกได้รับความนิยมมากที่สุด ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันพลาสติกถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่นๆ หลายชนิด เช่น แก้ว กระดาษ โลหะ หรือไม้ ทั้งทำเป็นถุงสำหรับใส่ของ พลาสติกห่ออาหาร ขวด หรือกระป๋องไว้สำหรับใส่ของใช้ต่างๆ ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีสัดส่วนขยับอยู่ในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนักกลับมาใช้เคลมมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีศักยภาพเพียงพอในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป [7]

#### 2. พลาสติกคลุมดินและวัสดุสำหรับการเกษตร

พลาสติกคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เนื่องจากแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช ทั้งยังช่วยรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน สามารถกำจัดได้โดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ติวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า [7]

#### 3. การใช้งานทางการแพทย์

ในปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวหนังเทียม ไหมละลาย ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อุปกรณ์ประเภทสกรูและแผ่นตามกระดูก ที่เมื่อได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายจะสามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย ช่วยลดค่าใช้จ่ายและการเจ็บป่วยลง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.4 ผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

#### 1. ผลกระทบด้านบวกต่อสภาวะแวดล้อม

- ผลกระทบที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของแร่ธาตุ

- ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้นเนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

- การใช้พลังงานในการสังเคราะห์และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมีทั่วไป [7]

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกชนิดต่างๆ [7]

ชนิดพลาสติก	พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ (MJ/kg)
LDPE	81
HDPE	80
PCL	77
PVOH	58
PLA	57
TPS	25

- พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพลาสติกจากปิโตรเคมี เห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็พลาสติกที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ [7]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพลาสติกชนิดต่างๆ [7]

ชนิดพลาสติก	ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก *10 (kg CO <sub>2</sub> eq./kg)
PCL	53
LDPE	50
HDPE	49
PVOH	42
TPS	11

## 2. ผลกระทบด้านลบต่อสภาวะแวดล้อม

- เกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในสภาวะแวดล้อม โดยมาจากสารเติมแต่งต่างๆ ที่เติมลงในพอลิเมอร์ เช่น สี พลาสติกไซเซออร์ตก้าง รั่วไหลและปนเปื้อนไปกับแหล่งน้ำใต้ดินและบนดิน ซึ่งสารบางชนิดอาจมีความเป็นพิษต่อระบบ นิเวศน์ [7]

### 2.1.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

ในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพนั้น มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย อาจหนาวหรือแรงทำให้เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญ อันได้แก่

#### 1. โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้นั้นจะต้องมีโครงสร้างทางเคมีที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มักต้องมีพันธะที่ง่ายต่อการเกิดไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ขาดและน้ำหนักโมเลกุลลดลงเรื่อยๆ จนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นกึ่งก้านจะย่อยสลายได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง เนื่องจากกึ่งก้านจะขัดขวางการสัมผัสของเอนไซม์ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะย่อยสลายได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นต้น [10]

#### 2. ชนิดของจุลินทรีย์

ในธรรมชาติมีความหลากหลายของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะที่ให้ความแตกต่างในการย่อยสลายพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยปกติแล้วการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์มากกว่า 1 ชนิด และในสภาวะที่ไม่มีจุลินทรีย์นั้น การย่อยสลายทางชีวภาพนั้นแทบไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย [10]

#### 3. สภาวะแวดล้อม

สภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจาก

การปรับสภาวะแวดล้อมให้เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการย่อยสลายได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส จัดเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ
- ปริมาณก๊าซออกซิเจน ช่วยให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้การย่อยสลายเกิดได้อย่างรวดเร็วสมบูรณ์
- ความชื้น น้ำและความชื้นช่วยให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ [10]

4. ขนาดของวัตถุทดสอบ พบว่าหากขนาดเล็กจะทำให้การย่อยสลายเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่ทำให้จุลินทรีย์เข้าไปเกาะได้มาก [10]

## 2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

### 2.1.4.1 การทดสอบโดยการฝังดิน

โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา เก็บตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป เป็นต้น [1]

### 2.1.4.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้

วัดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา เช่น ความขรุขระ รู หรือรอยฉีกขาดบนผิวของพลาสติก การแตกหัก การเปลี่ยนแปลงของสี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเกิดผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของพลาสติก ทำการทดสอบได้โดย

- การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากทำการส่องจะพบว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป เกิดรอยฉีกขาด รอยแตกหัก และมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

- วิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine สมบัติเชิงกลจะต่ำลงอันเนื่องมาจากการย่อยสลายทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง

- วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ศึกษาโดยใช้ Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะ อสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานจะถูกย่อยโดนจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก [10]

### 2.1.4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของพลาสติกเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ให้ผลไม่ถูกต้องนัก ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบเป็นระยะเวลาานาน มักจะมีกลุ่มของจุลินทรีย์สะสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ เป็นผลให้ค่าน้ำหนักที่วัดได้มีค่าสูงเกินจริง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปนั้น มีปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญ คือ การย่อยสลายมักเกิดบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ น้ำหนักที่หายไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว ดังนั้นเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้น ในการรายงานผลควรรายงานค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ต่อพื้นที่ผิวทดสอบมากกว่ารายงานค่าน้ำหนักที่หายไปเท่านั้น [10]

## 2.2 แป้ง (Starch)

### 2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืช พบได้ในส่วนต่างๆ เช่น คลอโรพลาสต์ในใบ และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งสะสมอาหาร เช่น เมล็ด ราก ลำต้น และหัว แป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 – 100 ไมโครเมตร หรืออาจจะมากกว่านี้ขึ้นกับแหล่งที่มาของแป้งมนุษย์จะได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก เช่น ทวีปอเมริกาเหนือและอเมริกากลางจะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชียมีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แป้งจัดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่บนโลกมักจะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า [11]

ถึงแม้ว่าบทบาทที่สำคัญที่สุดของแป้ง คือ การใช้เป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ แต่จากคุณสมบัติเฉพาะของแป้งจึงได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัส ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) สภาวะกรด การทำพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) และสเตอริไลเซชัน (Sterilization) เป็นต้น นอกจากนี้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว ยังมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมแป้งตัดแปร เป็นต้น [1]

แป้ง โดยทั่วไปหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ นอกเหนือจากนี้ยังมีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน หรือเกลือแร่ ซึ่งโดยปกติสิ่งเจือปนอื่นๆ นั้นจะมีอยู่น้อยมาก แป้งที่ผลิตแล้วยังมีสิ่งเจือปนอื่นๆ อยู่จะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) เช่น แป้งข้าวโพดหรือแป้งข้าวสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูงก็จะจัดอยู่ในประเภท ฟลาวัวร์ แต่เมื่อสิ่งเจือปนอื่นๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือเพียงแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงจะเรียกว่าสตาร์ช (Starch) [1]

อุตสาหกรรมแป้งมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรชาวโลกเป็นอย่างมาก เนื่องจากแป้งจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถทดแทนได้ (Renewable resources) ทำให้ถึงแม้ประชากรมนุษย์จะเพิ่มมากขึ้นทุกวัน ส่งผลให้ปริมาณความต้องการแหล่งพลังงานเพิ่มสูงขึ้น แต่แหล่งพลังงานแป้งก็ไม่มีวันหมดไป และเนื่องจากแป้งสามารถตัดแปรรูปแบบทางเคมี ทำให้มีสมบัติแตกต่างไปจาก

เดิมเป็นสมบัติตามที่อยู่สสารที่ต้องการได้ เพราะฉะนั้นการพัฒนาสมบัติของแป้งเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ต่างๆ จึงสามารถทำออกมาได้อย่างไม่จำกัด

### 2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 4) โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ที่เป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่ง โดยทั่วไปแป้งจะมีองค์ประกอบของอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส แป้งต่างชนิดกันจะมีปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกันไปด้วย [1, 12]

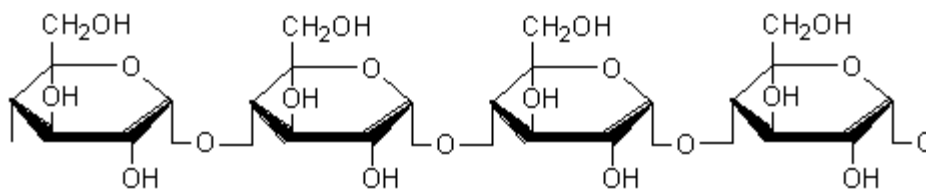
ตารางที่ 2.3 สมบัติสำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [1]

คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง	โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	200 – 2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่ อะไมโลส อะไมโลเพคติน สารตัวกลาง (Intermediate material) และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส

#### 2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

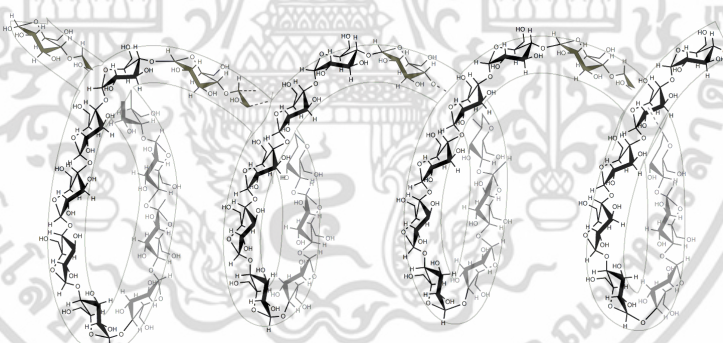
อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิด  $\alpha - 1, 4$  ขนาดของโมเลกุลขึ้นกับแหล่งที่มาของวัตถุดิบและกระบวนการแปรรูปของแป้ง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส [13]

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาคุมีปริมาณอะไมโลสประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียวไม่มีอะไมโลสเลย ในขณะที่แป้งข้าวโพดอะไมโลแมส (Amylomaize) เป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก [12]

จากโครงสร้างของอะไมโลสพบว่าหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำและสามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำ อะไมโลสสามารถดูดซับน้ำและเกิดเป็นไมเซลล์ในน้ำได้ โดยที่สายโซ่พอลิแซคคาไรด์ของอะไมโลสจะบิดเป็นเกลียว (Helical conformation) [1]

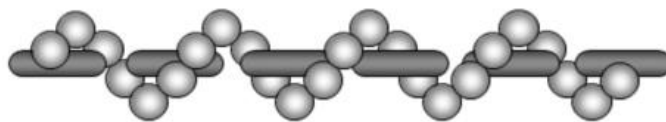


รูปที่ 2.4 โครงสร้างบิดเกลียวของอะไมโลส [14]

สมบัติอีกประการหนึ่งของอะไมโลส คือ ความชอบไอโอดีน รวมถึงสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล (Butanol) กรดไขมัน (Fatty acid) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ฟีนอล (Phenol) และไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) อะไมโลสจะจัดเรียงตัวบิดเป็นเกลียวล้อมรอบโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น โดยที่สารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจะให้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งใช้ในการตรวจพิสูจน์แป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และยังสามารถใช้หาปริมาณของอะไมโลสในแป้งได้ โดยใช้วิธีการวัดความเข้มของสีหรือวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้า ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับบิวทานอลและสารอินทรีย์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

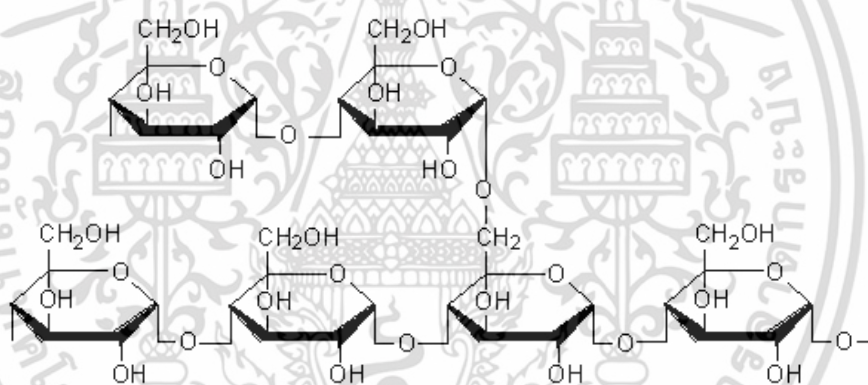
มีส่วนที่ชอบน้ำประเภทอื่น สามารถนำมาใช้เป็นวิธีในการแยกอะไมโลสออกจากอะไมโลเปคตินโดยผ่านกระบวนการเลือกตกตะกอน [1]



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับสารประกอบอินทรีย์ [15]

### 2.2.2.2 อะไมโลเปคติน (Amylopectin)

อะไมโลเปคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha - 1, 4$  และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha - 1, 6$  โดยทั่วไปทุกๆ 6 ถึง 12 หน่วยจะพบสายโซ่กิ่งหนึ่งสาย [1]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเปคติน [13]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha - 1, 6$  มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเปคตินทั้งหมด อะไมโลเปคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส ข้อมูลจากการตรวจวัดด้วย Light Scattering พบว่าอะไมโลเปคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน [12]

เนื่องจากอะไมโลเปคตินมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่และมีโซ่กิ่งจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเปคตินมีโครงสร้างเป็นกิ่ง นอกจากนี้ในส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนพบว่าได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดงม่วง [1]

### 2.2.2.3 สารตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตัวกลางมีอยู่เพียงน้อยนิดในแป้งบางชนิดเท่านั้น องค์ประกอบส่วนนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเปคติน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส มีการรายงานว่าสารตัวกลางในแป้งข้าวโอตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะไมโลส แต่มีค่าสัมพรรคภาพไอโอดีน (Iodine affinity) และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน (Blue value) ต่ำกว่าอะไมโลส แต่มีค่ามากกว่าอะไมโลเปคติน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเปคติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช [1]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ [2]

ชนิดของแป้ง	% ความชื้น	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	13	0.60	0.35	0.10	0.015
แป้งมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.40	0.080
แป้งสาลี	14	0.80	0.40	0.15	0.060
แป้งมันสำปะหลัง	13	0.10	0.10	0.20	0.010
แป้งข้าวฟ่าง	13	0.70	0.30	0.08	-
แป้งข้าวเจ้า	-	0.80	0.45	0.50	0.100
แป้งสาकु	-	0.10	0.10	0.20	0.020
แป้งมันเทศ	13	0.40	-	0.20	0.070
แป้งข้าวโพดอะไมโลเมส	13	-	-	0.10	-
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	13	0.20	0.25	0.07	0.007

#### 2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นๆ นอกเหนือจาก 3 องค์ประกอบที่กล่าวไปในข้างต้น แป้งได้ดังนี้

1. ส่วนประกอบที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) เช่น โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์ (Amyloplast)
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

#### 2.2.3 สมบัติของแป้ง

##### 2.2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แบ่งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% [1]

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [1]

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในโมเลกุลในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีหายไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (Molecular sieve) รูพรุนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจจะมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิต

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรทางเคมี [1]

ตารางที่ 2.5 การพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95 องศาเซลเซียส [2]

ชนิดของแป้ง	การพองตัว (%)	ความสามารถในการละลาย (%)
แป้งมันฝรั่ง	> 1,000	82
แป้งสาคู	97	39
แป้งมันสำปะหลัง	71	48
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	64	23
แป้งท้าวยายม่อม	54	28
แป้งมันเทศ	46	18
แป้งข้าวโพด	24	25
แป้งข้าวฟ่าง	22	22
แป้งข้าวสาลี	21	41
แป้งข้าวเจ้า	19	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.2 การเกิดเจลาทีนในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของไมเซลล์ ดังนั้นเม็ดแป้งจึงละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ของแป้งแต่ละชนิด พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ทำให้ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดและความใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลาทีนในเซชัน อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาทีนในเซชัน นอกจากนี้ยังมีวิธีการวัดค่าอุณหภูมิเกิดเจลาทีนในเซชันได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยแสงโพลาไรซ์ โดยวัดค่าอุณหภูมิที่ทำให้การบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ของเม็ดแป้งเริ่มหายไป โดยจุดสิ้นสุดของการเกิดเจลาตูกำหนดให้เมื่อ Birefringence หายไป 98% ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแป้งแต่ละชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทีนในเซชันต่ำกว่าแป้งธัญพืช เป็นต้น [1, 16]

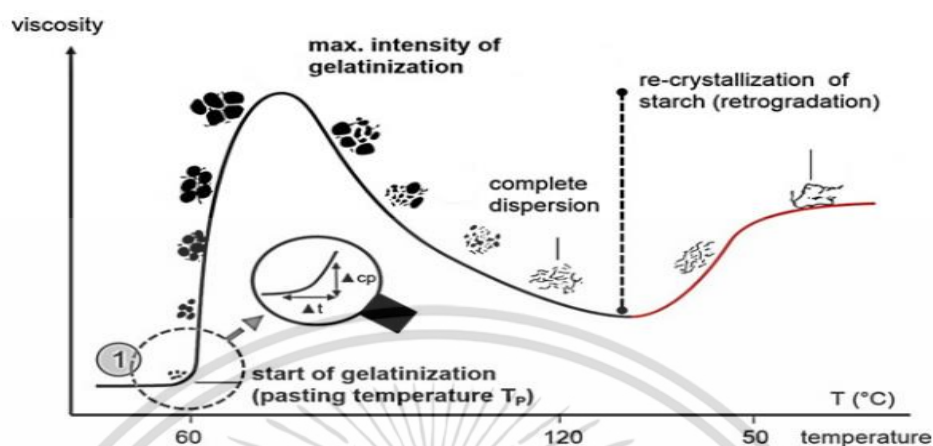
ตารางที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ [2]

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนในเซชัน
แป้งข้าวโพด	62 – 73
แป้งมันฝรั่ง	56 – 67
แป้งมันสำปะหลัง	58 – 70
แป้งข้าวสาลี	58 – 64
แป้งข้าวเจ้า	68 – 78
แป้งข้าวฟ่าง	68 – 78
แป้งมันเทศ	58 – 72
แป้งท้าวยาย่ม่อม	62 - 70

การเกิดเจลาทีนในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนสังเกตเห็นได้ เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งขึ้นจนถึงอุณหภูมิเริ่มเจลาทีนในเซชัน จะเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 คือ เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์จะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากขึ้นและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาทีนในเซชัน ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อมีผู้ใดเห็นเป็นอันควรจะขอสงวนสิทธิ์ในว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่ 3 รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจล [1, 16]



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการเกิดเจลที่ในเซชันของแป้ง [16]

### 2.2.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลที่ในเซชันแล้วยังคงให้ความร้อนต่อไปอีก จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือ การคืนตัว (Setback) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจับเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาจนเจล ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น [1, 16]

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดเบสของสารละลาย โดยพบว่าแป้งจะเกิดการคืนตัวได้เร็วที่สุดในช่วง pH 5 – 7 หากช่วง pH สูงหรือต่ำกว่านี้ การคืนตัวจะช้าลง นอกจากนี้ยังมีผลจากปริมาณและขนาดของอะไมโลสและอะไมโลเปคติน กล่าวคือ แป้งที่มีปริมาณของอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณของอะไมโลเปคตินสูง จากการวิจัยพบว่า อะไมโลเปคตินจะเกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดที่มีปริมาณของอะไมโลเปคตินต่างกันก็จะเกิดการคืนตัวที่แตกต่างกันตามไปด้วย [1]

### 2.2.3.4 ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดที่สูงที่สุดในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีความหนืดต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆอีก ได้แก่ ขนาดของเม็ดแป้ง ปริมาณของอะไมโลส และการตัดแปรรูปแป้งด้วยวิธีต่างๆ [1]

## 2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดัดแปร หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการทางเคมี หรือทางกายภาพ โดยใช้สารเคมี ความร้อน หรือเอนไซม์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการดัดแปรแป้ง คือ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ความหนืด ความคงทนต่อแรงเฉือนเมื่อผ่านกระบวนการผลิต ความคงทนต่อความร้อน ความคงทนต่อกรดเบส ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้ง เพิ่มหรือลดเวลาในการเกิดเจล สมบัติการยึดติด และความสามารถในการละลายน้ำหรือตัวทำละลายอื่นๆ [1]

### 2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

การดัดแปรรูปแบบของแป้งนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายรูปแบบ แต่ที่ได้รับความนิยมที่สุด คือ BeMiller ซึ่งเสนอไว้ดังนี้

#### 2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

แป้งออกได้เป็น

1. การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีบางประเภทในสภาวะเบส โดยทั่วไปแป้งอนุพันธ์มักมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งปกติ เช่น อุณหภูมิเกิดเจลต่ำลง การพองตัวมากขึ้น การละลายมากขึ้น ความหนืดมากขึ้นหรือน้อยลง ทนต่อการคั้นรูปมากขึ้น เป็นต้น แป้งอนุพันธ์สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อีเทอร์ คุณสมบัติของแป้งที่ได้จะมีการคั้นตัวน้อยลง อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันลดต่ำลง แป้งสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น แป้งเปียกมีความเหนียว คงตัว และยึดติดได้ดี มีความคงทนต่อกรดและเบส หากนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความใส มันเงา และยืดหยุ่นมากขึ้น [17-18]

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification) สามารถเตรียมได้โดยตรงจากการทำปฏิกิริยาของแป้งกับกรดคาร์บอกซิลิกชนิดต่างๆ หรือเตรียมโดยอ้อมโดยการทำปฏิกิริยาของแป้งกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น แอนไฮไดรด์ (Anhydrides) เอซิลคลอไรด์ (Acyl chlorides) เอสเทอร์ ทำให้ได้แป้งที่มีสมบัติเด่น คือ มีความหนืดที่สูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส ความอ่อนตัวและยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แป้งเชื่อมโยง (Cross-linked starch) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกสารเคมีนั้นว่าสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) อาจเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหรืออีเทอร์ฟิเคชันขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแป้งในสภาพแขวนลอย พันธะที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น อัตราการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันสูงขึ้น เพิ่มความต้านทานของแป้งต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน เพิ่มความหนืดของแป้งเปียกที่ร้อน มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นที่มีความหนืดสูง โดยที่ลักษณะโครงสร้างภายนอกของเม็ดแป้งจะไม่เปลี่ยนแปลงไป [1]

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมนำแป้งเชื่อมโยงมาใช้เป็นสารข้นสำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดสูง เช่น ซอส น้ำสลัด อาศัยคุณสมบัติของแป้งที่มีการพองตัวและเกิดเจลที่ในเซชันที่อุณหภูมิสูง นำมาใช้กับอาหารกระป๋อง ที่ต้องการความร้อนสูงและความหนืดต่ำในช่วงแรก ซึ่งทำให้การนำความร้อนในกระป๋องเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อน้อยลง และยังใช้เป็นสารให้ความคงตัวในซอสมะเขือเทศ ทำให้ซอสมะเขือเทศมีความหนืดและคุณภาพทางประสาทสัมผัสเหมาะสม ทั้งยังรักษาความคงตัวในซอสมะเขือเทศได้เป็นระยะเวลานาน [17]

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สิ่งทอ และกาว มักใช้แป้งเชื่อมโยงเคลือบกระดาษ กระดาษและสิ่งทอ ผลิตภัณฑ์ที่ทนน้ำ เป็นต้น

2. แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยกรด (Acid-modified starch) ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ หรือกรดกำมะถัน เพื่อให้โมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลง ผลผลิตทันทีที่ได้เมื่อละลายในน้ำร้อนจะมีความหนืดน้อยกว่าแป้งปกติ ทำให้สามารถใช้แป้งได้ในปริมาณที่มากขึ้น เมื่อเกิดการคั้นตัวจะได้เจลที่แข็งและทึบแสง สามารถยืดเกาะกันได้ดี [1]

3. แป้งออกซิเดชัน (Oxidized starch) ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีของแป้งกับสารออกซิไดซ์ ได้แก่ สารในกลุ่มคลอรีน โบรมีน ไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite) ไฮโปโบรมิท์ (Hypobromite) เปอร์ซัลเฟต (Persulfate) และเปอร์แมงกาเนต (Permanganate) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดแบบสุ่มที่ 4 ตำแหน่ง ได้แก่

- ออกซิไดซ์ที่ตำแหน่ง Aldehydic reducing end groups เปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล
- ออกซิไดซ์ที่หมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) ได้หมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde) และถูกออกซิไดซ์ต่อได้หมู่คาร์บอกซิล
- ออกซิไดซ์ที่ตำแหน่งไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) ได้หมู่คีโตน (Ketone)
- ออกซิไดซ์ที่หมู่ไกลคอล (Glycol groups) ได้หมู่อัลดีไฮด์ และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นหมู่คาร์บอกซิล [18]

สมบัติของแป้งออกซิไดซ์ คือ อัตราการคั้นตัวของแป้งเปียกลดลง แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง มีความใสมากขึ้น [1]

4. เดกซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการให้ความร้อนแก่ผงแป้งแห้ง ทำให้เกิดแป้งตัดแปรที่มีสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น มีความหนืดในขณะร้อนลดลง สามารถใช้แทนสารประเภทกัม (Gum) ได้ [18]

5. การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ชนิดต่างๆ จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้มีหลายชนิด เช่น กลูโคอะไมเลส (Glucosylase) เบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) จะเกิดการย่อยเฉพาะบริเวณที่เป็นโซ่ตรงเท่านั้น จึงนิยมใช้เป็นดัชนีบอกปริมาณของหน่วยกลูโคสที่มีสายโซ่ตรงในแป้งได้ อัลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) เป็นการย่อยโดยการตัดพันธะแบบสุ่ม และไอโซอะไมเลส (Isoamylase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายเฉพาะตำแหน่งของกิ่งเท่านั้น [17-18]

### 2.3.1.2 การตัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

1. แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch) หรือทางการค้าเรียกว่าอัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นการตัดแปรแป้งโดยการให้ความร้อนกับแป้งจนเกิดเจลลาทีไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที ก่อนนำไปบดละเอียด แป้งพรีเจลที่ได้จะมีสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น สามารถใช้เป็นสารให้ความหนืดโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน จึงมักนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งกับอาหารที่ไม่ต้องการให้ความร้อน เช่น ซอส ชุปผง ในทางเภสัชกรรมใช้เป็นสารยึดเกาะในเม็ดยา หรือในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เป็นสารเคลือบกระดาษ เป็นต้น [1]

2. แป้งละลายน้ำเย็น (Granular cold water soluble starch, GCWSS) เป็นการแปรรูปโดยใช้แอลกอฮอล์และเบส จะได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลลาทีไนเซชัน ลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล [1, 17]

3. การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล เนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งมีผลต่อสมบัติบางประการ เช่น การพองตัว และการละลาย เป็นต้น

4. การให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดเจลลาทีไนเซชัน

5. การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงและจำกัดปริมาณน้ำ มีผลทำให้สมบัติด้านความร้อนและความหนืดเปลี่ยนไป

### 2.3.1.3 การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ได้แก่

- Waxy starch คือ แป้งที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย ทำให้มีสมบัติที่ไม่เกิดการคืนตัว มีความมันเงาสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกาวและสิ่งทอ [1]

- High-amylose starch คือ แป้งที่มีอะไมโลสสูง ทำให้มีสมบัติพองตัวได้ยาก มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีไนเซชันสูงขึ้น สามารถผลิตแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี [1]

## 2.4 แป้งทำพายม่อม

### 2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้งทำพายม่อม

แป้งทำพายม่อมเป็นแป้งที่ผลิตได้จากหัวทำพายม่อม ซึ่งเป็นพืชในวงศ์ Taccaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Tacca Leontopetaloides* หัวทำพายม่อมมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมาเลเซียที่จัดเป็นประเทศที่มีพื้นที่ปลูกพืชตระกูลนี้มากที่สุด ส่วนในประเทศไทยมีการสำรวจพบว่ามีอยู่ค่อนข้างหนาแน่นในบริเวณชายทะเลฝั่งตะวันออก บริเวณจังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด [2]

หัวทำพายม่อม เป็นไม้ล้มลุกอายุยืน มีระบบรากเป็นแบบรากฝอย ไม่มีลำต้น มีเพียงเหง้าใต้ดินเป็นหัวรูปร่างกลมแบน ซึ่งเกิดจากส่วนของลำต้นที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อสะสมอาหาร เปลือกหัวบาง ผิวเรียบ เมื่ออ่อนจะเป็นสีขาว แก่แล้วจะเป็นสีเทาหรือสีน้ำตาล มีใบเป็นแฉกหยาบสีเขียวหรือม่วงมน้ำตาล ออกดอกเป็นช่อสีเหลืองหรือเขียวแกมม่วงเข้ม เจริญเติบโตได้ดีในร่มเงาไม้ยืนต้นในดินร่วนปนทราย มีความต้านทานโรคและแมลงศัตรูพืชสูง ในการขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดจะต้องใช้เวลา 2 ปี จึงจะได้หัวทำพายม่อมที่มีน้ำหนักมากพอที่จะนำไปสกัดเป็นแป้งได้ การเก็บเกี่ยวผลผลิตนิยมเก็บเกี่ยวช่วงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงระยะพักตัวที่ต้นหัวทำพายม่อมจะเหี่ยวแห้งและตายไปเหลือเพียงหัวที่สะสมอาหารเอาไว้ หากเก็บเกี่ยวช่วงก่อนที่มีการพักตัวจะได้ปริมาณของแป้งที่สกัดได้น้อยลง [2]

### ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักของหัวทำพายม่อมสด [2]

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
โปรตีน	5.1%
ไขมัน	0.2%
อะไมโลส	24.5%
อะไมโลเปคติน	75.5%
เซลลูโลส	2.1%
เถ้า	3.2%
แคลเซียม	0.2%
ฟอสฟอรัส	0.2%
สารให้รสขมอื่นๆ	2.2%

เนื่องจากหัวทำพายม่อมเป็นพืชเก็บหัวได้ปีละครั้ง จึงทำให้เป็นแป้งที่มีราคาแพงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ ลักษณะของเม็ดแป้งเป็นผงสีขาวสีเหลืองเล็กน้อย เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-5 มิลลิเมตร เนื้อค่อนข้างหยาบ ไม่ละเอียดนุ่มเหมือนแป้งมันสำปะหลัง เมื่อทำให้แป้งสุกด้วยการกวนกับน้ำด้วยไฟ

อ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย เมื่อสุกจะเริ่มใส มีเงาในเนื้อแป้ง เนื้อเหนียวปานกลาง เมื่อเย็นแล้วแป้งจะรวมตัวเป็นก้อน [2]

#### 2.4.2 สมบัติของแป้งทำว้ายม่อม

แป้งทำว้ายม่อมจะมีความใสและความหนืดสูง ทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนได้ดี อดทนต่อการเกิดเจลลาทีในเซชันประมาณ 72 องศาเซลเซียส มีปริมาณของอะไมโลสประมาณ 24.53% อะไมโลเพคติน 75.47% หากนำแป้งทำว้ายม่อมไปประกอบอาหารจะให้ความชื้นเหนียวกว่าแป้งมันสำปะหลังและใสเช่นเดียวกับแป้งถั่ว มีความคงตัว ไม่แยกชั้น นอกจากนี้แป้งทำว้ายม่อมยังมีคุณสมบัติย่อยง่าย จึงนิยมใช้เป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยพักฟื้น เด็กเล็ก หรือคนป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบย่อยอาหาร [2]

#### 2.4.3 การผลิตแป้งจากหัวทำว้ายม่อม

การผลิตแป้งจากหัวทำว้ายม่อมมีขั้นตอนดังนี้ [19]

1. นำหัวทำว้ายม่อมมาปอกเปลือก ล้างทำความสะอาด
2. ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำไปปั่นรวมกับน้ำจนเข้ากันดี
3. จากนั้นทำการกรองด้วยผ้าขาวบาง นำไปตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนจนเกิดการตกตะกอน โดยตะกอนของแป้งจะตกอยู่ด้านล่างของภาชนะ
4. ทำการถ่ายน้ำออกแล้วใส่น้ำลงไปใหม่ก่อนจะตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเช่นเดิม ทำแบบนี้ซ้ำหลายๆ รอบจนกว่าน้ำด้านบนจะใสสะอาด
5. นำแป้งที่ได้มาตากแดดจนแห้ง จากนั้นนำไปบดก่อนนำไปใช้งานได้ทันที


### 2.5 กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

กลูตารัลดีไฮด์ ได้รับการขึ้นทะเบียนจากสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S environmental protection agency, EPA) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2504 ว่าจัดอยู่ในกลุ่มน้ำยาฆ่าเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูง ออกฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อได้อย่างครอบคลุม ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ เชื้อรา ไวรัส โปรโตซัว รวมถึงสปอร์ต่างๆ และยังได้รับการยอมรับจากองค์การอนามัยโลก (World health organization, WHO) ว่าสามารถฆ่าเชื้อไข้หวัดนก (Avian influenza H5N1) ได้ [20]

นอกจากนี้กลูตารัลดีไฮด์ ยังมีฤทธิ์ไม่กัดกร่อนโลหะ ยาง และพลาสติกทุกชนิด ด้วยเหตุนี้เอง จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้ออย่างแพร่หลายทั้งในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โรงงาน และโรงพยาบาล อีกทั้งกลูตารัลดีไฮด์ยังไม่ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็ง จึงมีความปลอดภัยอย่างยิ่งในการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยพบว่าไม่เหมาะสำหรับใช้ฆ่าเชื้อกับมนุษย์หรือสัตว์เลี้ยง เนื่องจากมีฤทธิ์ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเนื้อเยื่อ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์ [21]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	1,5-Pentanedione
ชื่อเคมีทั่วไป	Glutaric dialdehyde
รหัส IMO	 <p>ประเภท 6.1 วัตถุพิษ ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต เจ็บป่วยอย่างรุนแรงเมื่อสัมผัส</p>
CAS No.	111-30-8
UN/ID No.	2811
รหัส RTECS	MA 2450000
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารไม่เกิดการติดไฟ เมื่อสัมผัสกับ ความร้อนอุณหภูมิสูง 815.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารมีความเสถียรทั้งใน สภาวะปกติและเกิดเพลิงไหม้ อันตรายต่อสุขภาพ (สีน้ำเงิน) ระดับ 2 คือ สารที่อาจก่อการบาดเจ็บ เมื่อมีการสัมผัสในระยะสั้น</p>

จากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Material Safety Data Sheet, MSDS) ระบุถึงผลกระทบของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสุขภาพไว้ว่า

- หากสัมผัสโดนผิวหนังจะบวมแดง เกิดผื่นแดง และอาการคันบริเวณที่สัมผัส แก้ไขได้โดยการล้างด้วยน้ำเย็นและสบู่ปริมาณมากๆ สำหรับในการป้องกันอันตราย ควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล ได้แก่ ฝักันเปื้อน และถุงมือชนิดที่กลูตารัลดีไฮด์ซึมผ่านไม่ได้ เช่น ถุงมือจากยางไนไตรหรือยางบิวทิล เป็นต้น

- หากสัมผัสสูดดม กลูตารัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 5% ไม่มีอันตรายรุนแรงต่อดวงตา แต่หากมีความเข้มข้นสูงอาจทำให้เยื่อตาบวมแดง มีสารคัดหลั่งจากตา จนถึงทำให้สูญเสียการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มองเห็นอย่างถาวรได้ ดังนั้นในการปฏิบัติงานจึงควรสวมแว่นตานิรภัย และติดตั้งฝักบัวล้างตาไว้ในระยะที่สามารถเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว

- หากกลืนกินเข้าไป อาจทำให้เกิดการระคายเคือง หรือแสบร้อนในช่องปากและทางเดินอาหาร คลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน ถ่ายเหลว อ่อนแรง และหมดสติจนถึงโคม่าได้

- หากหายใจเอาไอระเหยเข้าไป ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ ไอ หอบหืด อาเจียน ปวดศีรษะ และหายใจติดขัด ดังนั้น พื้นที่ปฏิบัติงานจะต้องมีอากาศถ่ายเทอย่างเพียงพอ หรือติดตั้งตู้ดูดไอสารเคมี [22]

ตารางที่ 2.9 สมบัติทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์ [20]

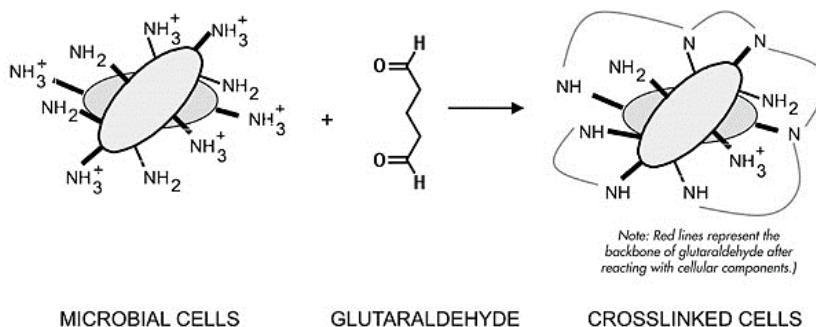
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	ฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	100.12
จุดเดือด	187-189 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	0.7
ความสามารถในการละลาย	ละลายน้ำได้

โครงสร้างของกลูตารัลดีไฮด์ จัดอยู่ในกลุ่มไดอัลดีไฮด์ (Dialdehyde) โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม ต่อกับหมู่อัลดีไฮด์ ( $\text{H}-\text{C}=\text{O}$ )



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของกลูตารัลดีไฮด์ [6]

สำหรับในด้านของความสามารถในการฆ่าเชื้อ หมู่อัลดีไฮด์นี้เองที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยเกิดการเชื่อมโยงเป็นร่างแหสามมิติ การเชื่อมโยงนี้เองที่จะเป็นการรบกวนการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ จึงส่งผลกระทบต่อระบบทางกายภาพและชีวเคมีภายในเซลล์ ทำให้จุลินทรีย์ตายในที่สุด [20]



รูปที่ 2.9 การเชื่อมโยงระหว่างหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่เอมีนของเซลล์จุลินทรีย์ [20]

กลูตารัลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงอย่างทีกล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ในปัจจุบันมีผู้ผลิตบางรายได้ผลิตกลูตารัลดีไฮด์ปลอม โดยปลอมปนฟอร์มาลดีไฮด์ออกสู่ตลาดอย่างแพร่หลาย ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่ลดลงแล้ว ฟอร์มาลดีไฮด์ยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย โดยผู้ใช้บางรายหากขาดความรู้ก็อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ และข้อจำกัดสำคัญคือการวิเคราะห์กลูตารัลดีไฮด์ที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปลอมปนนั้นต้องทำการวิเคราะห์แยกในห้องปฏิบัติการเท่านั้น [20]

สำหรับในงานวิจัยทางเคมีนั้น นิยมใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอื่นๆ เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างร่างแห เพื่อปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ ตัวอย่างสารที่นิยมนำมาทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เช่น ไคโตซาน โปรตีน แั่ง คอลลาเจน เป็นต้น

## 2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปพลาสติไซเซอร์มักเป็นของเหลวที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ ใช้เติมลงไปในช่วงกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์เพื่อทำให้เกิดการอ่อนตัวและยืดหยุ่นได้ดีขึ้น ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลและช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการแปรรูปทำได้ง่ายขึ้น

สำหรับในเทอร์โมพลาสติกสตา์ชนั้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกของแั่งมีความแข็งแรงมาก แั่งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก หากให้ความร้อนแก่แั่งที่ปราศจากความชื้น แั่งจะเกิดการไหม้และสลายไปแทนที่จะเกิดการหลอม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป แั่งจึงจะสามารถเกิดการหลอมได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงเชิงกล ได้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่สามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ

### 2.6.1 สมบัติทางอุณหคคิตของพลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ที่ดีควรมีสมบัติ ดังนี้ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ที่ดีกับพอลิเมอร์
2. มีความเสถียร
3. ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี และไม่มีรส
4. มีความสามารถในการระเหยต่ำ
5. ไม่สามารถติดไฟได้
6. หาได้ง่าย
7. ง่ายต่อการจัดเก็บและการจัดการ

### 2.6.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

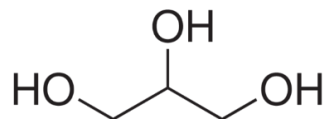
กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกในอีกชื่อว่า กลีเซอริน (Glycerine) ในปัจจุบันเป็นสารที่มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางในหลากหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติเด่น คือ ไม่มีพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย และละลายน้ำได้ดี [24]

ตารางที่ 2.10 สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล [25]

สมบัติ	ข้อมูล
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะ	ของเหลวหนืด
สี	ไม่มีสี
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	290 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	ละลายได้ดี
การละลายในแอลกอฮอล์	ละลายได้ดี
การละลายในอีเทอร์	ไม่ละลาย
จุดวาบไฟ	199 องศาเซลเซียส
ค่า pH ที่ 20 องศาเซลเซียส	5


กลีเซอรอลมักถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอรินในพลาสติก เป็นสารอิมัลชันและสารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภท มาการีน น้ำสลัด และลูกกวาด ใช้ผสมในเครื่องสำอางประเภทครีมและโลชั่น เพื่อทำให้ผิวนุ่มและชุ่มชื้น หรือใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแห้งแข็งตัวในหลอด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล [26]

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลีเซอรอล [25]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	Propane-1,2,3-Triol
ชื่อเคมีทั่วไป	Glycerol, Glycerin
CAS No.	56-81-5
รหัส RTECS	MA 8050000
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 1 คือ สารที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิ 815.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หรือน้อยกว่าจึงจะลุกติดไฟ            การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 1 คือ สารซึ่งปกติจะมีความเสถียร แต่จะเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัว เมื่อสัมผัสกับอากาศ แสง หรือความชื้น            อันตรายต่อสุขภาพ (สีน้ำเงิน) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย แม้ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้</p>

จากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Material Safety Data Sheet, MSDS) ระบุถึงผลกระทบของกลีเซอรอลต่อสุขภาพในระยะสั้นไว้ว่า

- หากสัมผัสโดนผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย
- หากสัมผัสถูกตา จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา
- หากกลืนกินเข้าไป เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำจึงไม่เป็นอันตราย แต่อาจทำให้คลื่นไส้ ปวดศีรษะ หรือท้องร่วง
- หากหายใจเอาไอระเหยเข้าไปเป็นระยะเวลานานๆ อาจเกิดการทำลายไต และระบบทางเดินอาหาร [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**อภิสรุ ศรีสายหยุด และอภิรัตน์ สุทธิธรรวัช [27]** ทำการพัฒนาแป้งสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการกักเก็บสารเพื่อควบคุมการปลดปล่อยสาร โดยการเชื่อมโยงโมเลกุลของแป้งด้วยสารเชื่อมโยง เพื่อให้แป้งที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นร่างแหก็มีคุณสมบัติด้านการละลายน้ำที่ลดลง ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ยาวนานขึ้น โดยแป้งที่นำมาทดลองนี้ ได้แก่ แป้งมอลโตเดกซ์ทริน DE 17 ใช้สารเชื่อมโยง คือ กลูตารัลดีไฮด์ โดยใช้ที่ปริมาณตั้งแต่ 0.1 – 5% โดยน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง ทำการดัดแปรแป้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เป็นผงแห้งโดยผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อได้แป้งที่เชื่อมโยงเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งที่เตรียมได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบสมบัติด้านการละลายน้ำ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์มากขึ้น ขนาดของผงแป้งที่เตรียมได้โดยเฉลี่ยมากขึ้น และความสามารถในการละลายน้ำของแป้งลดลง

**รัตเกล้า ภูติวรรณ [28]** ทำการศึกษาการเชื่อมโยงโครงสร้างร่างแหของแผ่นฟิล์มไคโตซานโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง เพื่อปรับปรุงสมบัติของความแข็งแรงเมื่อเปียกที่ไม่ดีนักของฟิล์มไคโตซาน ทำการทดลองโดยศึกษาการใช้สารเชื่อมโยงที่ปริมาณต่างๆ กัน และค่า pH ของสายละลายไคโตซานที่แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพความเป็นกรด – ด่างมีผลต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การละลายในกรดอะซิติก การดูดซับน้ำ และสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาการเกิดร่างแหของแผ่นฟิล์มไคโตซานที่สถานะ pH เท่ากับ 4 เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์มากขึ้น ฟิล์มไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และไม่เกิดการละลายในกรดอะซิติกแต่เกิดการบวมตัวเนื่องจากฟิล์มไคโตซานมีความหนาแน่นเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายมาก เกิดการขีดขวางทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายแพร่เข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานได้ยากขึ้น ส่วนในด้านของสมบัติเชิงกล เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์มากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงในขณะแห้งและเปียกเพิ่มขึ้น แต่หากใช้มากเกินไป  $3 \times 10^{-8}$  โมล ต่อไคโตซาน 1 กรัม ทำให้ฟิล์มเปราะแตกและสมบัติเชิงกลต่างๆ ลดต่ำลง

**ชวนชม อ่วมเนตร [16]** ทำการทดลองดัดแปรโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีน โดยทำการดัดแปรผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างแป้งและออกตะโนอิลคลอไรด์ โดยใช้ไพริดีนเป็นตัวทำละลาย ทำการทดลองภายใต้สถานะไนโตรเจน ได้เป็นแป้งออกตะโนเอต (Octanoated starch) ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป (Blown film extrusion) โดยใช้อุณหภูมิ 150 – 180 องศาเซลเซียส ได้เป็นฟิล์มที่มีความหนา 100 – 150 ไมโครเมตร สำหรับใช้เป็นพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงที่สูงเพียงพอต่อความต้องการของพืช จากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับน้ำ สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งตัดแปรกับพอลิเอทิลีน มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งบริสุทธิ์กับพอลิเอทิลีน ทั้งนี้เนื่องจากการตัดแปรแป้งส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้มีปริมาณลดลง และจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งบริสุทธิ์มีช่องว่าง (Void) ที่แสดงถึงการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งตัดแปร พบว่า การแยกวัฏภาคนั้นลดลง มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ในส่วนของค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของแป้งตัดแปรที่ผสมพอลิเอทิลีน มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับบริสุทธิ์ผสมกับพอลิเอทิลีน อันเนื่องมาจากความเข้ากันที่ดีมากกว่า

**นพร แซ่เบ๊ [29]** ศึกษาการตัดแปรสตาร์ชจากไทยและสตาร์ชจากจีน ผ่านปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยหมู่ฟอสเฟต โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่างๆ กัน คือ 0.05, 0.10 และ 0.15% และศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 1, 2.5 และ 4 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ผลของความเข้มข้นและเวลาในการทำปฏิกิริยาไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นหรือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มากขึ้น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีอัตราการละลายและอัตราการเกิด Retrogradation ที่ลดต่ำลง และมีเสถียรภาพของความหนืด ความทนทานต่อแรงเฉือน ความร้อน กรด และด่างเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาเชื่อมโยงไม่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความเสถียรต่อการแช่แข็งและการละลายน้ำแข็ง

**J.T. Yeh และคณะ [3]** ทำการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ โดยใช้กลีเซอรอล 40 phr น้ำ 100 phr และเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้ปริมาณของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลส 0.02 phr เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) โดยงานวิจัยทำการศึกษาศสมบัติของแป้งตัดแปรที่ใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน คือ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรมีค่าสูงกว่าแป้งตัดแปร โดยค่าความแข็งแรงดึงของแป้งตัดแปรนั้นลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.5 – 28.7 MPa ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.9 – 7.8% สำหรับในด้านของการศึกษาปริมาณความชื้น พบว่า แป้งที่ไม่ได้ตัดแปรมีปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content) สูงกว่าแป้งตัดแปร และความชื้นที่วัดได้ของแป้งตัดแปรมีค่าลดลง เมื่อใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**K. Kaewtatip และ J. Thongmee [30]** ทำการศึกษาผลของการเชื่อมโยงแป้งที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้แป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ที่ยังไม่ได้ดัดแปร ผสมกับ Distarch phosphate ซึ่งเป็นแป้งดัดแปรชนิดเชื่อมโยง และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ศึกษาโดยใช้แป้ง ดัดแปรที่สัดส่วนต่างๆ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ ทำการขึ้นรูปโดยวิธีกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ไปศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวโดยเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ศึกษาสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำ จากผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับแป้งดัดแปร มีค่าอุณหภูมิในการสลายตัวสูงกว่าแป้งบริสุทธิ์ และผลของการดูดซับน้ำ เมื่อทำการทดสอบที่ 7 และ 45 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งดัดแปรมากขึ้น ค่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงในทุกช่วงเวลาทดสอบ สำหรับในส่วน of สมบัติเชิงกลนั้น ทำการทิ้งชิ้นงานไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% เป็นเวลา 12 วัน ก่อนทำการทดสอบ พบว่า ความแข็งแรงดึงของแป้งมีค่าสูงขึ้น เมื่อพอลิเมอร์ผสมมีสัดส่วนของแป้งดัดแปรมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ 1.48 MPa เมื่อใช้ปริมาณของแป้งดัดแปรมากที่สุด คือ 20% นอกจากนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของแป้งสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของแป้งดัดแปรมากขึ้นจนถึง 5% แต่เมื่อปริมาณของแป้งดัดแปรมากกว่านี้ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง

**J.Q. Mei และคณะ [31]** ทำการศึกษาผลของสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก โดยผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทำการทดลองที่ปริมาณของกรดซิตริก 10% 20% 30% 40% 50% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้งแห้ง จากนั้นนำแป้งที่ดัดแปรแล้วไปอบและบดให้เป็นผง ก่อนนำไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การบวมตัว (Swelling) โดยศึกษาการบวมตัวที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ได้แก่ 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส ศึกษาการละลาย และการเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) จากผลการทดลองพบว่า แป้งดัดแปรมีการบวมตัวมากขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการทดสอบมากขึ้น และแป้งที่มีการดัดแปรด้วยกรดซิตริกมากมีการบวมตัวลดลง อันเนื่องมาจากความหนาแน่นเชื่อมโยงของโมเลกุลแป้ง ผลเป็นไปในทางเดียวกันกับความสามารถในการละลายของแป้งดัดแปรที่ลดลง เมื่อมีการใช้สัดส่วนของกรดซิตริกมากขึ้น นอกจากนี้ การเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกยังทำให้แป้งมีการเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็งลดลงอีกด้วย

**K. Pornsuksomboon และคณะ [32]** ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมแป้ง จากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรด้วยกรดซิตริก โดยใช้กรดซิตริก 0.21 โมล ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ให้เท่ากับ 4 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำมาผสมกับแป้ง 100 กรัม ปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศา เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น 3 – 4 ครั้ง เพื่อกำจัดกรดซิตริกที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกไป แล้วจึงบดและอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสอีกครั้งจนแป้งมีน้ำหนักที่คงที่ เก็บแป้งที่ตัดแปรแล้วในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปใช้ โดยในการทดลองนี้ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ตัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังที่ถูกตัดแปรด้วยกรดซิตริก ในสัดส่วนต่างๆ คือ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 โดยใช้ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และแมกนีเซียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น ทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สันฐานวิทยา และการดูดซับน้ำ ผลการทดลองพบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ไม่มีผลต่อสันฐานวิทยา โดยโพลีเมอร์แป้งที่ได้มีลักษณะเป็น 2 ชั้น ชั้นนอกประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีความหนาแน่น ส่วนชั้นในเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่า ส่วนในด้านของผลการดูดซับน้ำ พบว่า แป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำถึง 14% และหากสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมากขึ้นส่งผลให้การดูดซับน้ำลดลง โดยที่สัดส่วนระหว่างแป้งบริสุทธิ์กับแป้งตัดแปร 40/60 มีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด คือ 4.67%

S. Garg และ A.K. Jana [33] ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนผสมแป้งข้าวโพดบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนผสมแป้งข้าวโพดที่ตัดแปรโดยใช้อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) เป็นสารเชื่อมโยงในสภาวะต่าง และยังศึกษาผลของการใช้และไม่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) เป็นเวลา 15 นาที ความเร็วรอบ 30 rpm และอุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปด้วยวิธีเป่าขึ้นรูป ใช้อัตราส่วนการดึง 8 เมตรต่อวินาที ได้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร หนา 0.1 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเก็บฟิล์มไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำการศึกษสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง และดัชนีการไหล (Melt flow index) จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์มีค่าสูงที่สุดคือ 16.08 MPa และ 569% ตามลำดับ แต่เมื่อผสมแป้งข้าวโพดบริสุทธิ์และแป้งข้าวโพดตัดแปรลงไปทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดต่ำลง นอกจากนี้ยังทำการทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม ที่อุณหภูมิ 199 องศาเซลเซียส ใช้หัวกดทับหนัก 2.16 กิโลกรัม พบว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์มีดัชนีการไหล 3.84 กรัม/10 นาที ในขณะที่ เมื่อทำการผสมแป้งบริสุทธิ์และแป้งตัดแปรลงไปแล้ว ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์มีค่าลดลง และเมื่อทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปพอลิเมอร์ผสมมีค่าดัชนีการไหลเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า พลาสติกไซเซอร์มีผลอย่างยิ่งต่อความหนืดของพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

1. แป้งท้าวยายม่อม ตราปลาไทย 5 ดาว จากบริษัท อี.ที.ซี เอี๊ยบตงจัน จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อม ตราปลาไทย 5 ดาว

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
อะไมโลส	23.75
อะไมโลเพคติน	71.48
โปรตีน	0.23
ไขมัน	0.10
เถ้า	0.12
ความชื้น	4.30

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde solution 50% in water) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka analytical

ตารางที่ 3.2 สมบัติทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์ เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka analytical

สมบัติ	ข้อมูล
น้ำหนักโมเลกุล	100.12 g/mol
สถานะ	สารละลาย
สี	ใสไม่มีสี
การละลายในน้ำ	ละลายได้ดี
จุดเดือด	187-189 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	0.7

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system
4. กรดซิตริก (Citric acid) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) เกรดการค้า จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
6. น้ำกลั่น (Distilled water)

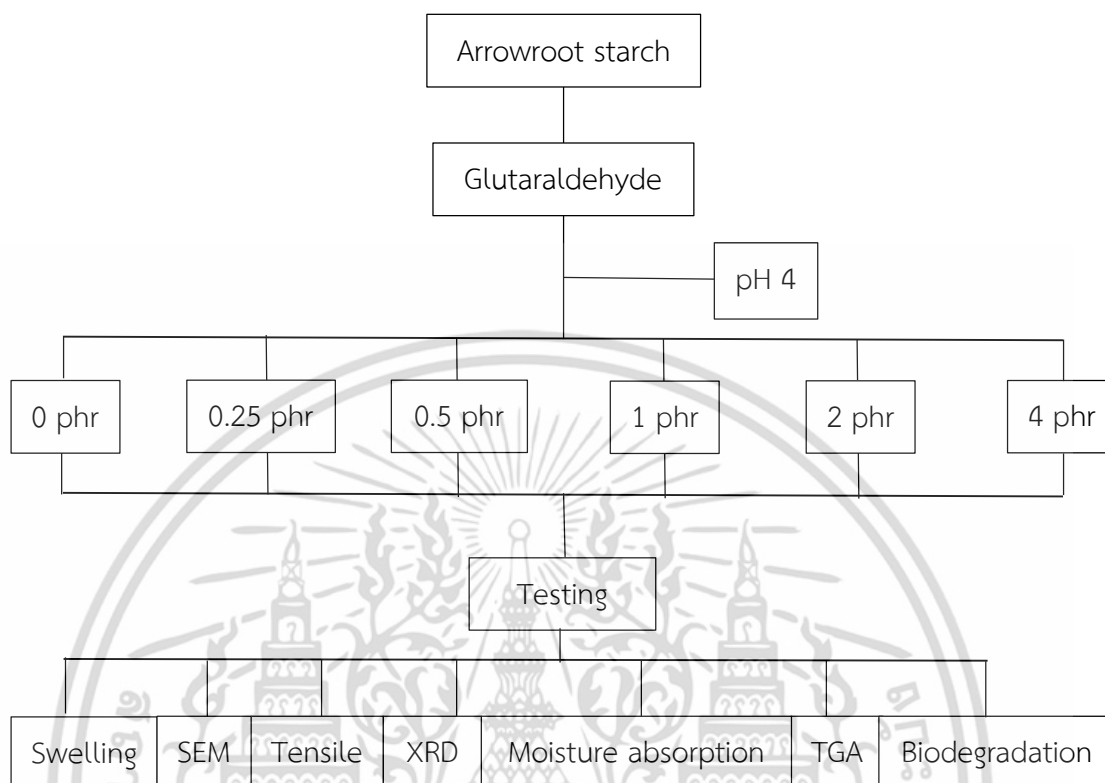
### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เตาให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น C-MAG HS7 5000 จากบริษัท IKA
3. แม่พิมพ์รูปดัมเบลล์ หน้า 2 mm
4. มอเตอร์ใบพัดปั่นกวน รุ่น EURO-STD จากบริษัท IKA
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น ML3002 จากบริษัท Mettler Toledo
6. ตู้อบ (Oven) รุ่น BD 53 จากบริษัท Binder
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 827 จากบริษัท Metrohm
8. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX500-D75L90 จากบริษัท Chareon
9. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น LP-20 จากบริษัท Labtech Engineering
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR5K จากบริษัท LLYOD Instrument
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) รุ่น JSM-5410 จากบริษัท Jeol
12. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Pyris 1 จากบริษัท Perkin Elmer
13. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance จากบริษัท Bruker

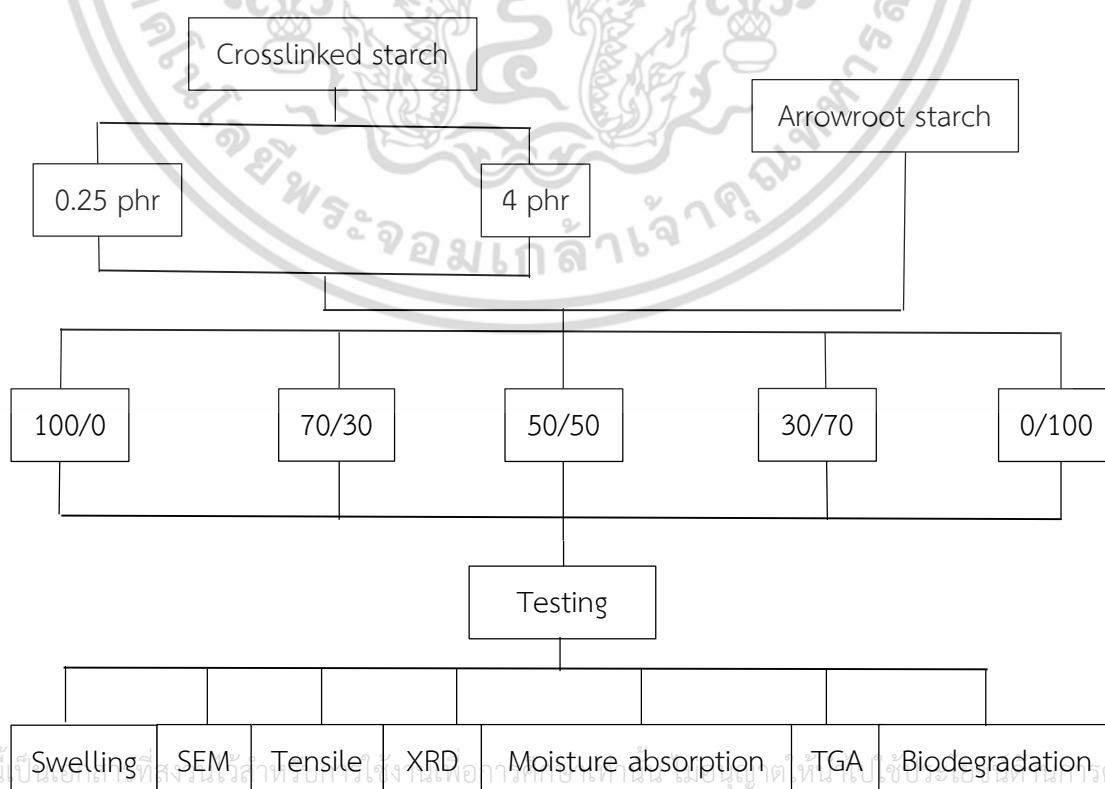
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนการดำเนินงาน

### ตอนที่ 1.



### ตอนที่ 2.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งท้าวยายม่อม

ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง กรดซिटริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ อัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่เตรียม

สูตร	แป้งท้าวยายม่อม (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)	กลูตารัลดีไฮด์	
				(กรัม)	(phr)
1	50	20	50	0	0
2	50	20	50	0.125	0.25
3	50	20	50	0.25	0.5
4	50	20	50	0.5	1
5	50	20	50	1	2
6	50	20	50	2	4

- 1) ชั่งน้ำหนักแป้งท้าวยายม่อม 50 กรัม และกลีเซอรอล 20 กรัม ลงในบีกเกอร์
- 2) ตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ตามลงในบีกเกอร์ จากนั้นใช้มอเตอร์ใบพัดปั่นกวน ทำการปั่นกวนของผสมที่ความเร็วรอบ 300 rpm ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
- 3) หลังจาก 1 ชั่วโมง นำบีกเกอร์ของผสมที่ปั่นกวนเรียบร้อยแล้ว มาเติมกลูตารัลดีไฮด์ลงไป ที่ปริมาณ phr (Parts per hundred parts of resin) ต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง ดังตารางที่ 3.3
- 4) ยกบีกเกอร์ของผสมขึ้นให้ความร้อน ในอ่างบรรจุน้ำที่ตั้งบนเตาให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนตลอดเวลาเพื่อให้เกิดเจลลาทีโนเซชัน
- 5) ระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ทำการปรับ pH ของผสมด้วยกรดซिटริก ความเข้มข้น 0.2 mol/L ให้มีค่า pH เท่ากับ 4
- 6) ปั่นกวนของผสมเป็นเวลา 15 นาที จนเกิดกระบวนการเจลลาทีโนเซชัน จากนั้นยกออกจากเตา เทแป้งเชื่อมโยงที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดจากบีกเกอร์ลงใส่ถาดสแตนเลส
- 7) นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้งสนิทและมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ทำการบดแป้งให้มีขนาดเล็กก่อนนำไปเข้าสู่ขั้นตอนของการผสมต่อไป [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยง  
ด้วยกลูตาไรลไฮดริต กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ สัดส่วนแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียม

แป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกละเชื่อมโยง (กรัม)	แป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ (กรัม)
100	0
70	30
50	50
30	70
0	100

1) นำแป้งท้าวยาย่มอมที่บดเรียบร้อยแล้วกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ ตามสัดส่วนตารางที่  
3.4 มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว  
รอบ 40 รอบต่อนาที โดยใช้แมกนีเซียมสเตียเรต 2% โดยน้ำหนักของแป้ง เป็นสารหล่อลื่น  
(Lubricant)

2) นำพอลิเมอร์ที่ผสมได้พักใส่ถาด ก่อนนำไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปต่อไป

### 3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป

1) นำพอลิเมอร์ที่ผสมแล้ววางลงบนแผ่นใสชนิดพอลิเอสเตอร์ แล้วประกบด้วยแม่พิมพ์  
รูปดัมเบลล์ จากนั้นทำการกดอัดด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา  
7 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 5 นาที

2) นำแผ่นชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

## 3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.4.1 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

ในการศึกษาการบวมตัวทำได้โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด  $1 \times 1$  นิ้ว ความหนา 2  
มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานโดยละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บันทึก  
น้ำหนักที่ชั่งได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่น้ำกลั่นโดยวางในตะแกรงลวดปิดขนาด 200 เมช (mesh) ที่

อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักทุกชั่วโมง ซึ่งเปอร์เซ็นต์การบวมตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%Swelling = (W_e - W_0) / W_0 \times 100$$

เมื่อ  $W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดลอง

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

### 3.4.2 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

การหาปริมาณการดูดซับความชื้น ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด  $2.5 \times 2.5$  เซนติเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นในงานหมดไป คือ มีน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการบันทึกค่าน้ำหนักไว้ แล้วจึงนำชิ้นงานไปวางในภาชนะปิดที่อิมมิดด้วยน้ำกลั่น ซึ่งให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเวลา 15 วัน โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W_a(\%) = (W_e - W_0) / W_0 \times 100$$

เมื่อ  $W_a$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดลอง

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

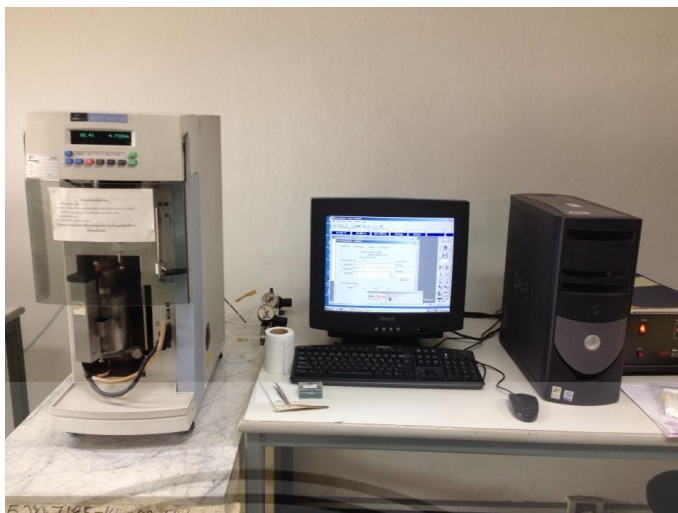
### 3.4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

วิเคราะห์หาปริมาณผลึกของชิ้นงานตัวอย่างขนาด  $4 \times 4$  เซนติเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่างๆ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้  $CuK\alpha$  และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้สำหรับ Net area คือ  $2\theta = 10 - 80^\circ$  สำหรับ Raw area คือ  $2\theta = 10 - 30^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ/C/นาที$

### 3.4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน เตรียมตัวอย่างโดยการบดแบ่งให้เป็นผงละเอียด จากนั้นตักใส่ในพาน (Pan) ที่เชื่อมต่อด้วยเครื่องซึ่งมีความไวและความละเอียดสูง เริ่มการวิเคราะห์โดยทำการให้ความร้อนตั้งแต่ 50 จนถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

### 3.4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานแปงความหนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการนำชิ้นงานมาหักในไนโตรเจนเหลว จากนั้นเคลือบด้วยทองคำก่อนนำเข้าเครื่องทดสอบ เพื่อศึกษาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ทำการตัดแปรด้วยปริมาณของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

### 3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 (type IV) ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60%

โดยกำหนดสภาวะทดสอบดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed)	40 mm/min
ระยะทดสอบ (Gauge length)	25 mm
โหลดเซลล์ (Load cell)	1 kN
จำนวนตัวอย่างทดสอบ	10 ชิ้นต่อ 1 สูตร

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หรือค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง คำนวณจาก

$$\text{Tensile strength (MPa)} = F/A$$

เมื่อ F คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) คำนวณจาก

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times [(L-L_0)/L_0]$$

เมื่อ  $L$  คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (mm)

$L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

### 3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ทำการทดสอบโดยตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ ความหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-15% เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน เมื่อครบกำหนดให้ขุดตัวอย่างออกมา จากนั้นทำการวิเคราะห์หา เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกล โดยเปรียบเทียบค่าของสมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของแต่ละสูตร เพื่อศึกษาถึงการย่อยสลายทางชีวภาพ

### 3.4.8 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์เจล (Gel fraction) [38]

ทำการทดสอบโดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด  $1 \times 1$  นิ้ว ความหนา 2 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นงานโดยละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดฟอร์มิคเข้มข้น 85% ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาเทสารละลายกรดฟอร์มิคและชิ้นงานแป้งลงบนตะแกรงลวด ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

$$\% \text{เจล} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่กรดฟอร์มิค}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่กรดฟอร์มิค}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr (ตารางที่ 4.1) ตอนที่ 2 เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปแล้วจึงนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การบวมตัว การดูดซับความชื้น การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	0TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ไม่ได้ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์
2	0.25TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr
3	0.5TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.5 phr
4	1TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1 phr
5	2TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 2 phr
6	4TPCAS	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr
7	0.25TPCAS30	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 30/70
8	0.25TPCAS50	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 50/50
9	0.25TPCAS70	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 70/30
10	4TPCAS30	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 30/70
11	4TPCAS50	แป้งท้าวยาย่ม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr ผสมกับแป้งท้าวยาย่ม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 50/50

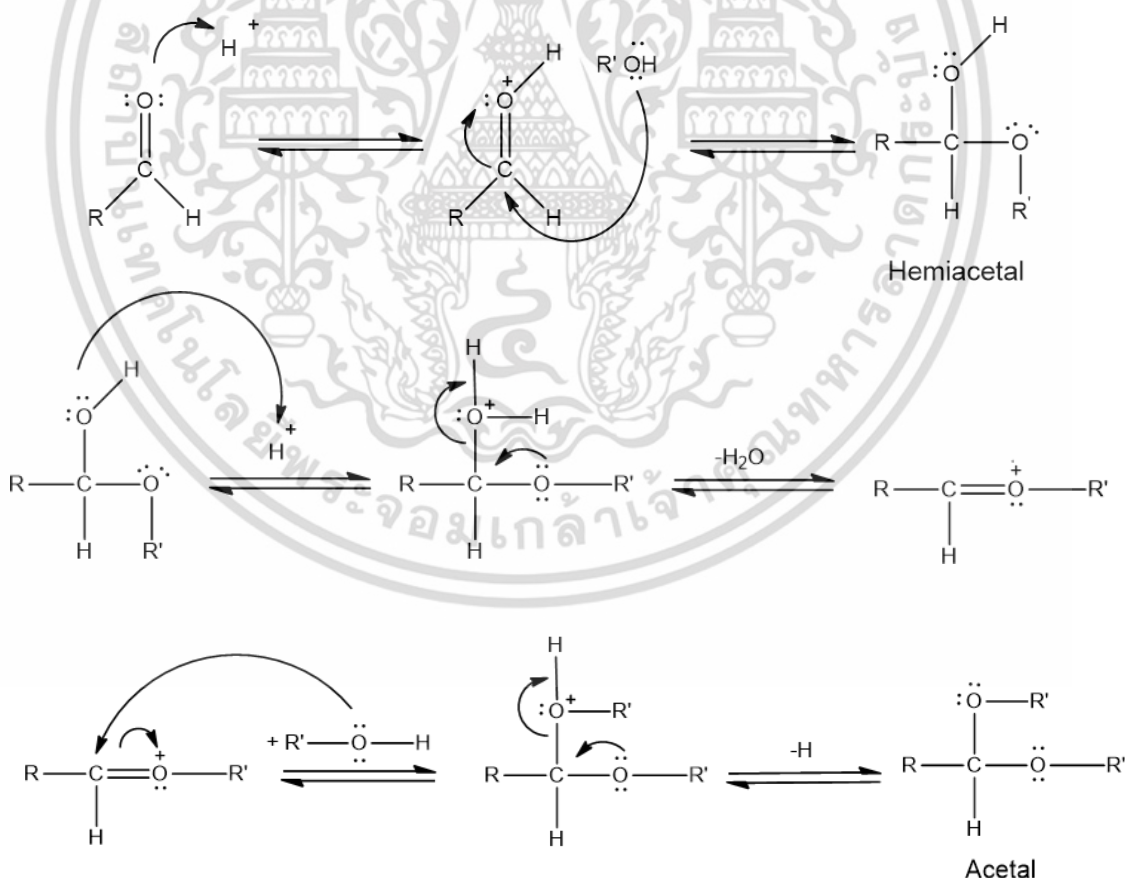
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) อักษรย่อของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ใช้งานวิจัยนี้

12	4TPCAS70	แป้งทำวยายม่อมที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr ผสมกับแป้งทำวยายม่อมบิริสุทรีในอัตราส่วน 70/30
----	----------	--

#### 4.1 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

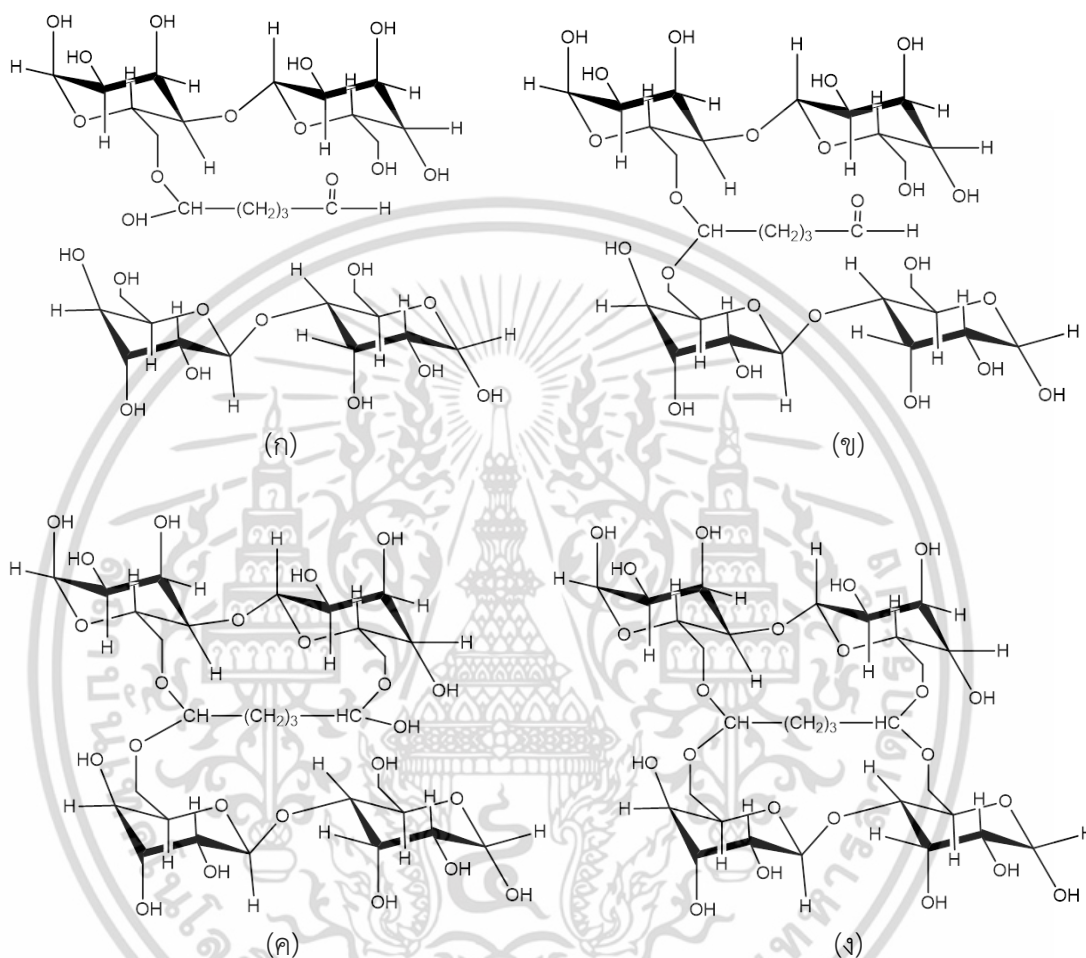
การบวมตัวสามารถบ่งบอกได้ถึงความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของแป้ง โดยปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์จะเกิดผ่านกลไก Nucleophilic addition แบบ  $S_N1$  โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในขั้นตอนแรกเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนคู่ของออกซิเจนในโมเลกุลของกลูตารัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับกรด เกิดเป็นโปรตอนเนตคาร์บอนิลที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก จากนั้นโปรตอนเนตคาร์บอนิลจึงทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง เกิดเป็น Hemiacetal linkage นอกจากนี้ ในสภาวะที่เป็นกรดและมีหมู่ไฮดรอกซิลมากเกินพอ Hemiacetal สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งอีก 1 โมเลกุล เกิดเป็น Acetal linkage เชื่อมระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของแป้ง [3] ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์ [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างเชื่อมโยงทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์ โดยหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์เมื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งจะสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่ 4.2 ก เกิด Hemiacetal linkage รูปที่ 4.2 ข และ ง เกิด Acetal linkage และ รูปที่ 4.2 ค เกิดทั้ง Hemiacetal และ Acetal linkage

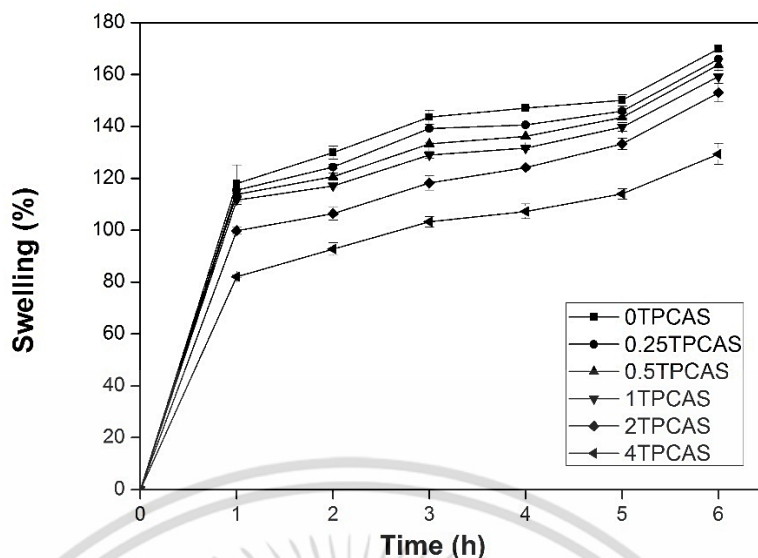


รูปที่ 4.2 โครงสร้างเชื่อมโยงทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับกลูตารัลดีไฮด์ [34]

#### 4.1.1 การทดสอบการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวายม่อม

การทดสอบการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

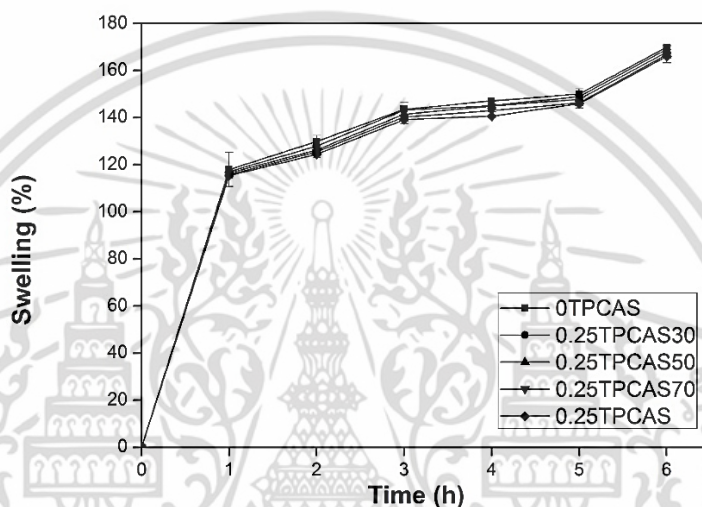
รูปที่ 4.3 และภาคผนวก ข แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ในปริมาณแตกต่างกัน พบว่า ชิ้นงานทุกสูตรมีการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นเปอร์เซ็นต์การบวมตัวจึงมีแนวโน้มเพิ่มช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น การบวมตัวมีแนวโน้มลดลงในทุกช่วงเวลา โดยชิ้นงานสูตร 0TPCAS ซึ่งไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีการบวมตัวมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว แป้งจึงมีสมบัติชอบน้ำและสามารถกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างได้ดี ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณมากที่สุดมีการบวมตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์ทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้นโครงสร้างเชื่อมโยงยิ่งมีความหนาแน่นมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์เจลตามภาคผนวก ก ที่พบว่า แป้งที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีค่าเปอร์เซ็นต์เจลเท่ากับศูนย์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใช้มากขึ้น แป้งมีเปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้นแสดงถึงพันธะเชื่อมโยงที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งพันธะเชื่อมโยงนี้จะทำหน้าที่ขัดขวางทำให้โมเลกุลของน้ำเข้ามาในโครงสร้างของแป้งได้ยาก จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวต่ำ นอกจากนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นยังทำให้ความเป็น Hydrophilicity ของแป้งลดลง เพราะหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมโยง กล่าวคือ เมื่อแป้งมีสมบัติความชอบน้ำที่ลดลง แป้งจึงกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้น้อย ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จินตภา แต้มสีคราม [35] ที่ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดซิตริก กรดแลกติก และกรดมาลิก ที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

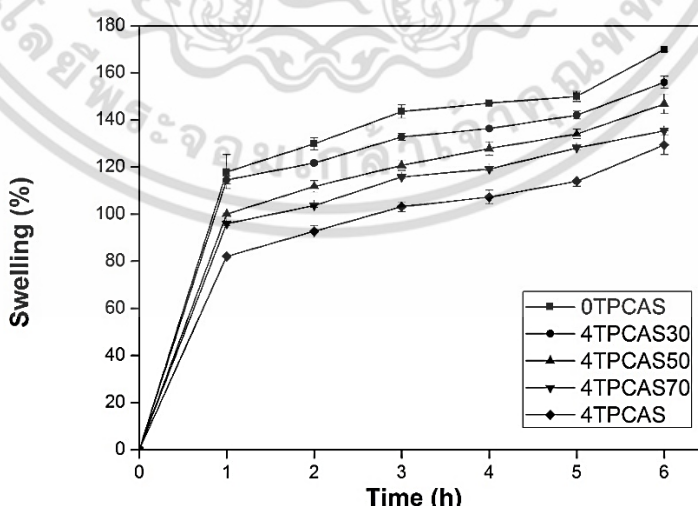
0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของกรดที่ใส่ลงไปเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเกิดมากขึ้น ส่งผลให้การบวมตัวมีแนวโน้มลดต่ำลง

#### 4.1.2 การทดสอบการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

การทดสอบการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

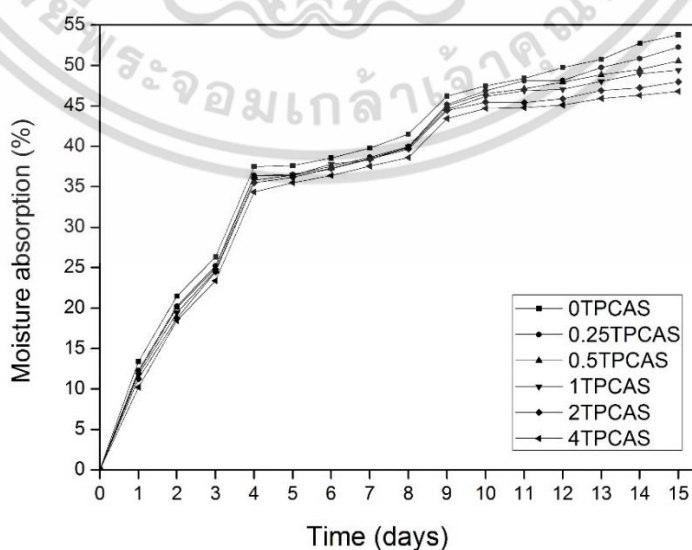
รูปที่ 4.4 – 4.5 และภาคผนวก ข แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ที่ อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ชิ้นงานทุกสูตรมีการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเพิ่ม อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นเปอร์เซ็นต์การบวมตัวจึงมีแนวโน้มเพิ่มช้าลง

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น การบวมตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจาก การที่แป้งเชื่อมโยงมีการใช้กลูตาไรลดีไฮด์ในปริมาณน้อยเพียง 0.25 phr เท่านั้น ในขณะที่เมื่อ พิจารณาจากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น การบวมตัวมีแนวโน้มลดลง โดยชิ้นงานสูตรที่ไม่มีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมีการบวมตัว มากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตรที่มีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากที่สุดมีการบวมตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้ เนื่องมาจาก เมื่อพอลิเมอร์ผสมมีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น นั้นหมายถึงการมีโครงสร้างตาข่าย ที่สามารถบดบังไม่ให้โมเลกุลของน้ำเข้ามาในโครงสร้างของแป้งได้มากขึ้น การบวมตัวจึงต่ำ นอกจากนี้ แป้งที่เชื่อมโยงแล้วยังมีความเป็น Hydrophilicity ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยง ดังนั้นเมื่อมี สัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น สมบัติโดยรวมจึงมีความชอบน้ำลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวม ตัวลดต่ำลง

## 4.2 การหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

### 4.2.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม

ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1\%$  ให้ผลการทดลองดังนี้

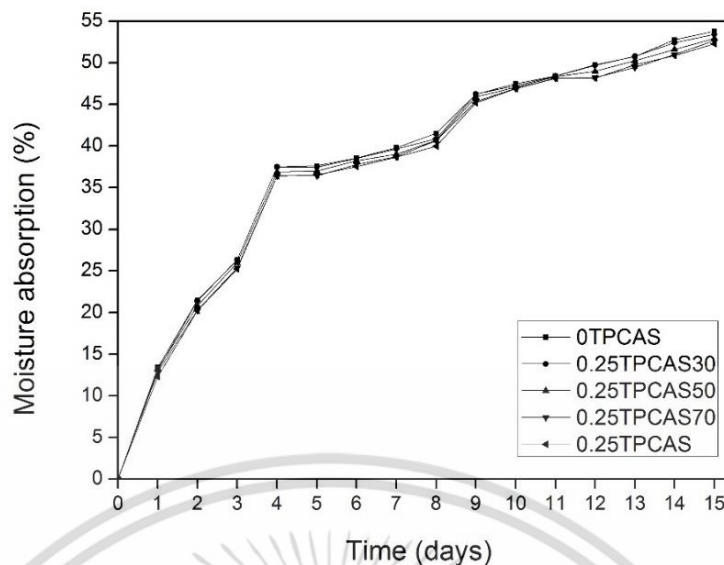


รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

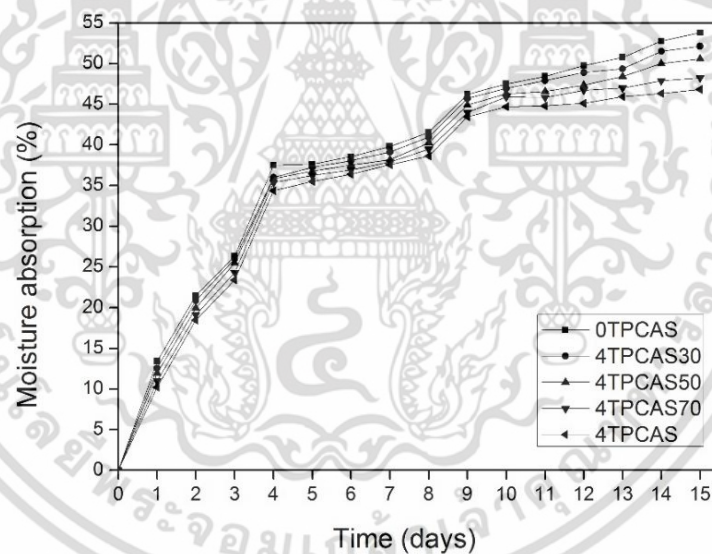
รูปที่ 4.6 และภาคผนวก ค แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงโดยใช้กลูตาไรลดีไฮด์ในปริมาณแตกต่างกัน พบว่า ชิ้นงานทุก สูตรมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ทดสอบมากขึ้น โดยเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรก จากนั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ ของกลูตาไรลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดต่ำลงในทุกช่วงเวลาทดสอบ โดย ชิ้นงานสูตร OTPCAS ที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมโยงมีการดูดซับความชื้นมากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ที่ใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณมากที่สุดมีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก โครงสร้างของแป้งมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้วสูง แป้งจึงมีสมบัติชอบน้ำ สามารถดูดซับ และกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างได้ดี แต่เมื่อทำการใช้สารเชื่อมโยง หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของ โมเลกุลแป้งเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตาไรลดีไฮด์ ทำให้ความเป็น Hydrophilicity ของแป้ง ลดลง นั่นหมายถึงสมบัติความชอบน้ำของแป้งลดลง จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลด ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ El-Tahlawy, K. และคณะ [34] ที่ทำการศึกษาผลของปริมาณ กลูตาไรลดีไฮด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular Foam) จากแป้งข้าวโพด ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณที่มากขึ้น ชิ้นงานโฟมแป้งมีปริมาณความชื้น น้อยลง อันเนื่องมาจากความชอบน้ำที่ลดลงจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลในแป้งถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา กับสารเชื่อมโยง นอกจากนี้ ผลของการดูดซับความชื้นยังให้ผลที่สอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันกับ ผลการทดสอบการบวมตัวในหัวข้อที่ 4.1

#### 4.2.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทจากพอลิเมอร์ผสม ระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง ท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อม บริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.7 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธี



รูปที่ 4.8 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธี

รูปที่ 4.7 – 4.8 และภาคผนวก ค แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานเทอร์โม-พลาสติกสตา์ซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทำวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งทำวยายม่อมบริสุทธีที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ชิ้นงานทุกสูตรมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรก จากนั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มช้าลง

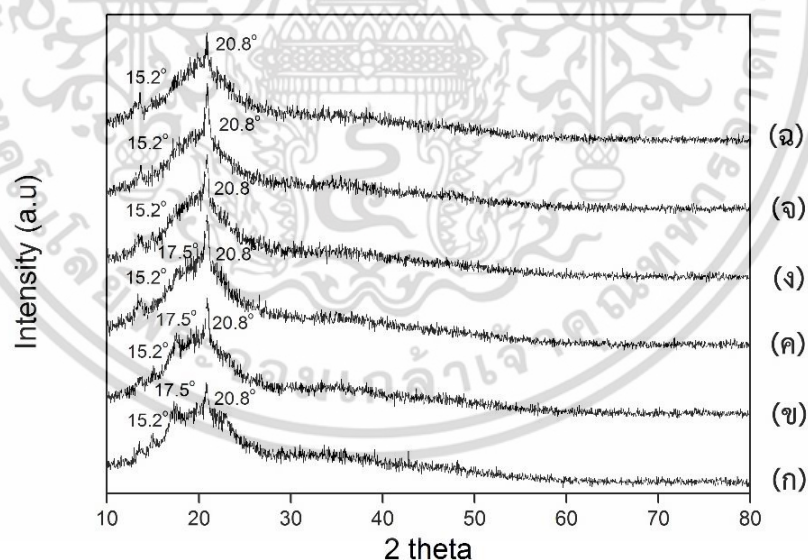
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮต์ 0.25 phr มากขึ้น การดูดซับความชื้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่แป้งเชื่อมโยงใช้กลูตาร์ลดีไฮต์ในปริมาณน้อยเพียง 0.25 phr เท่านั้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮต์ 4 phr มากขึ้น การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลง โดยขึ้นงานสูตรที่ไม่มีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมีการดูดซับความชื้นมากที่สุด ในขณะที่ขึ้นงานสูตรที่มีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากที่สุดมีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก แป้งที่เชื่อมโยงแล้วมีความเป็น Hydrophilicity ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยง ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น สมบัติโดยรวมจึงมีความชอบน้ำลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดต่ำลง

### 4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

#### 4.3.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮต์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งให้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.9 ดิฟแฟรกโตแกรมของขึ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

(ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS (ค) 0.5TPCAS (ง) 1TPCAS (จ) 2TPCAS และ (ฉ) 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

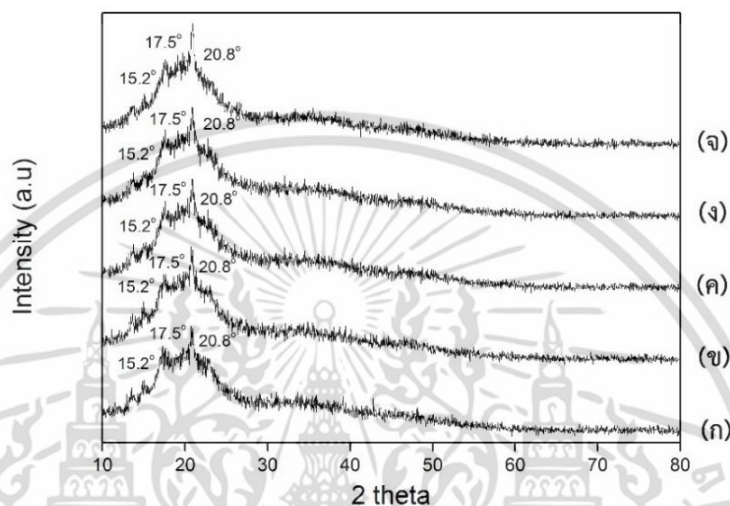
สูตร	ปริมาณผลึก (%)
0TPCAS	42.88
0.25TPCAS	41.15
0.5TPCAS	39.53
1TPCAS	30.68
2TPCAS	28.97
4TPCAS	25.01

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างผลึกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 15.2, 17.5 และ 20.8 อันเนื่องจากการนำแป้งมาเติมพลาสติกไซเซอรและผ่านกระบวนการเจลาทีไนเซชันโดยความร้อนและน้ำทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งท้าวยายม่อมซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากพืชหัว และมีโครงสร้างผลึกแบบ A-type ถูกทำลาย และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ [36] นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น พีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 17.5 มีความเข้มลดน้อยลง อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของแป้งเมื่อเกิดการเชื่อมโยง

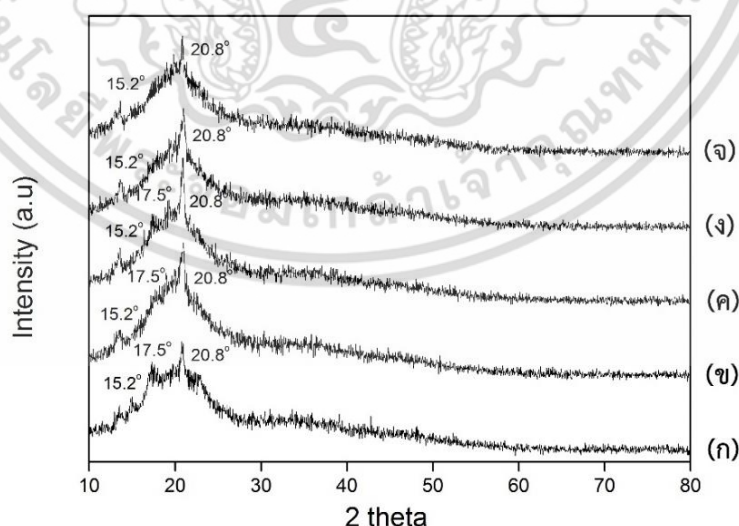
จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใช้มากขึ้น ปริมาณผลึกของแป้งมีแนวโน้มลดต่ำลง โดยชิ้นงานสูตร 0TPCAS ที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีปริมาณผลึกมากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งมีการใช้สารเชื่อมโยงมากที่สุดมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลของแป้งเกิดปฏิกิริยากับกลูตาไรลดีไฮด์นั้น ทำหน้าที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของโมเลกุลแป้ง เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น โครงสร้างตาข่ายยังมีความหนาแน่นและมีประสิทธิภาพในการขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของแป้งมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของผลึกลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการบวมตัวในหัวข้อที่ 4.1 ที่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น การบวมตัวมีแนวโน้มลดลงอันเนื่องมาจากโครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นมากขึ้น และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mei, J.Q. และคณะ [31] ที่ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงที่มากจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้ง แป้งจึงจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยาก

#### 4.3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิ-  
เมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr  
กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ให้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.10 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว-  
ยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์  
(ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS30 (ค) 0.25TPCAS50 (ง) 0.25TPCAS70 และ (จ) 0.25TPCAS



รูปที่ 4.11 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว-  
ยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์

(ก) 0TPCAS (ข) 4TPCAS30 (ค) 4TPCAS50 (ง) 4TPCAS70 และ (จ) 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์

สูตร	ปริมาณผลึก (%)
0TPCAS	42.88
0.25TPCAS30	42.53
0.25TPCAS50	42.07
0.25TPCAS70	41.74
0.25TPCAS	41.15
4TPCAS30	41.55
4TPCAS50	38.04
4TPCAS70	31.08
4TPCAS	25.01

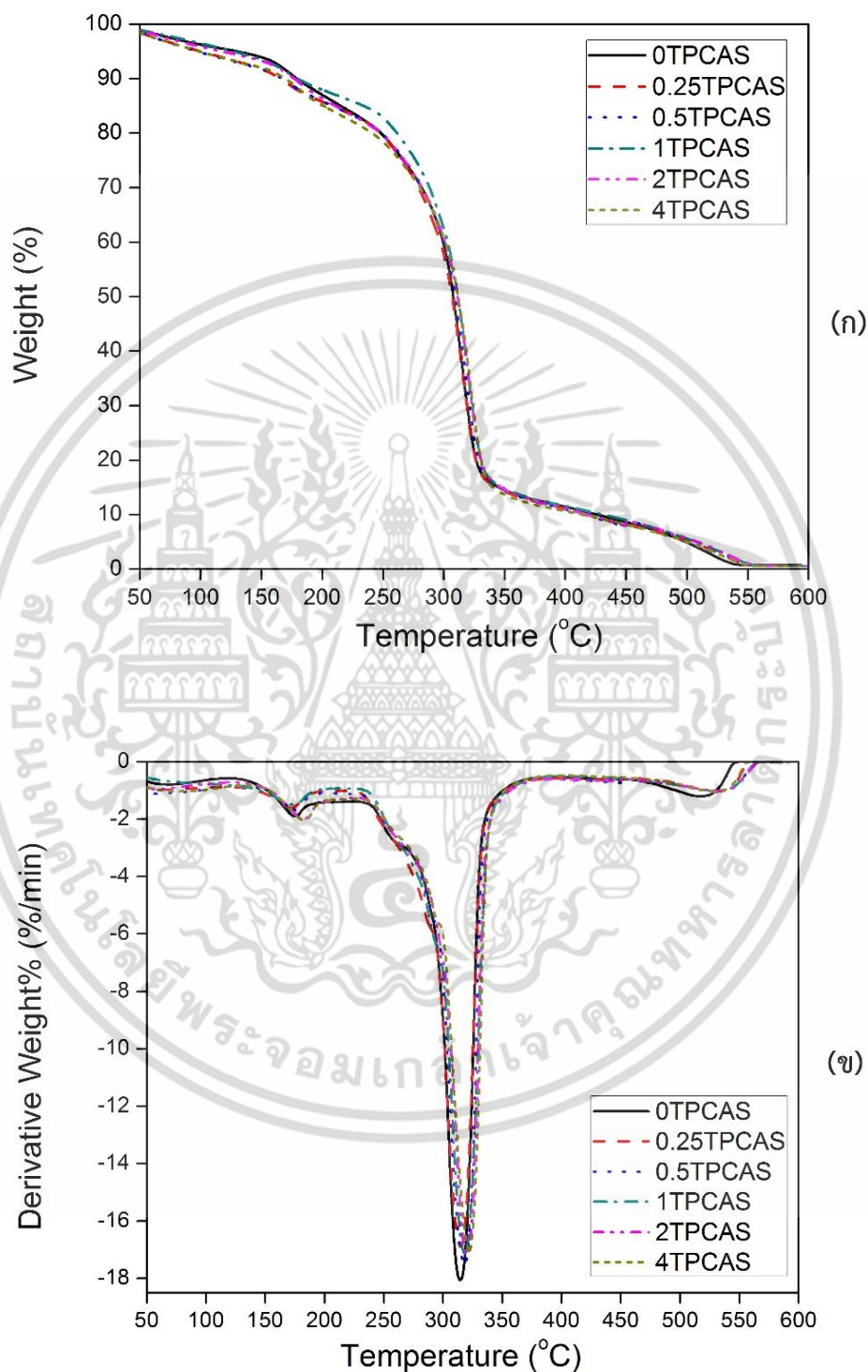
รูปที่ 4.10 – 4.11 แสดงโครงผลึกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้พบพีคที่มุม 2 $\theta$  เท่ากับ 15.2, 17.5 และ 20.8 นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น พีคที่มุม 2 $\theta$  เท่ากับ 17.5 มีความเข้มลดน้อยลง อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงผลึกของแป้งเมื่อเกิดการเชื่อมโยง จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนั้นขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของโมเลกุลแป้ง ดังนั้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่มีความเป็นผลึกต่ำมากขึ้น ความเป็นผลึกโดยรวมของแป้งจึงลดต่ำลงตามไปด้วย

#### 4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

##### 4.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยาย่มอม

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัว ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA)

อุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 50 จนถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งทำว้ายม่อมที่เชื่อมโยงด้วย

กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

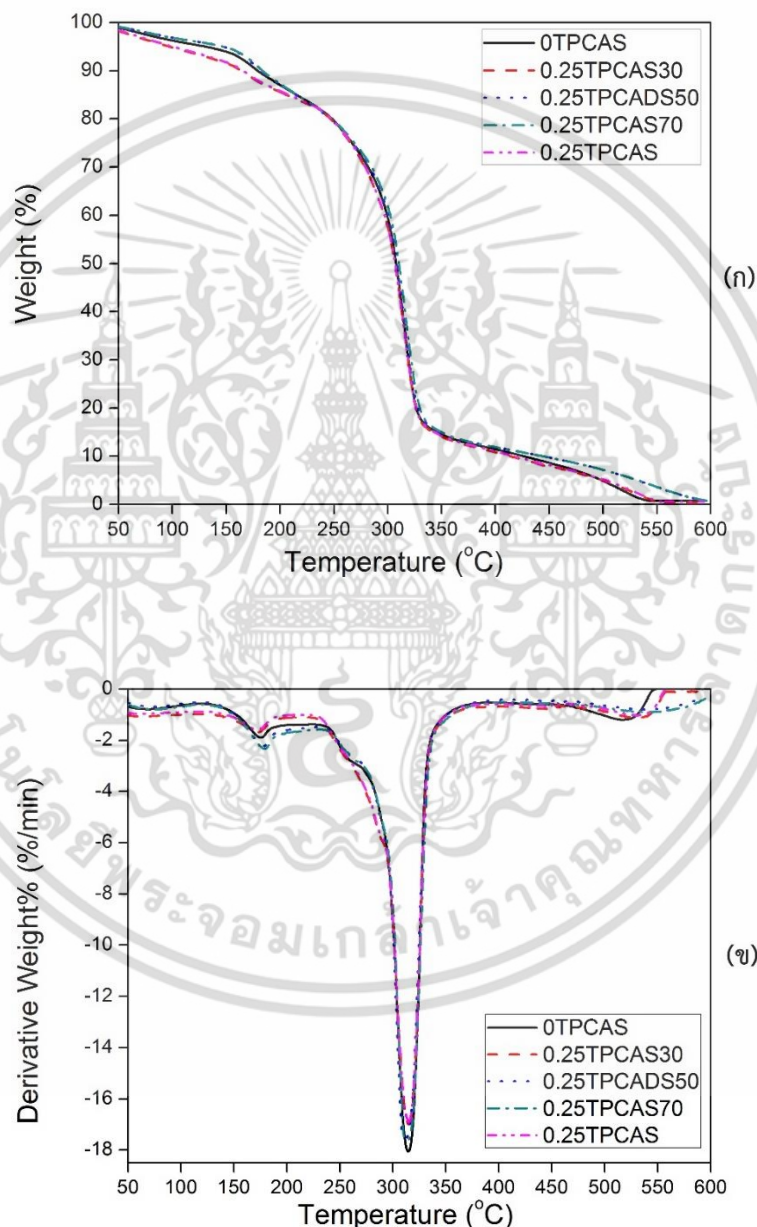
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)			อุณหภูมิในการสลายตัว ของแป้งที่เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไป 50% (°C)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (โมเลกุลแป้งที่เหลือจากการ สลายตัวไปบางส่วนเมื่อผ่าน กระบวนการขึ้นรูป)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	
0TPCAS	176.0	290.7	314.5	307.7
0.25TPCAS	171.3	289.7	315.0	306.1
0.5TPCAS	174.5	291.8	318.0	309.1
1TPCAS	173.0	293.1	318.3	311.6
2TPCAS	181.8	297.4	320.3	311.2
4TPCAS	182.4	296.8	321.9	311.6

รูปที่ 4.12 ตารางที่ 4.4 และภาคผนวก จ แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีอุณหภูมิในการสลายตัวเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 120-220 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นช่วงการสลายตัวของแป้งหลังจากการที่โมเลกุลบางส่วนเกิดการสลายตัวจากสารเคมีหรืออุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้เหลือเป็นสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ ซึ่งสลายตัวที่ 280-300 องศาเซลเซียส [35] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งส่วนใหญ่ที่ 310-325 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทำการหาอุณหภูมิในการสลายตัวเมื่อแป้งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 50% พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งในช่วงที่ 3 และอุณหภูมิในการสลายตัวเมื่อแป้งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 50% นั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อแป้งเกิดปฏิกิริยากับกลูตาไรลดีไฮด์ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้น ยิ่งปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงก็ยิ่งมาก ซึ่งพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewtatip, K และคณะ [30] ที่ทำการศึกษาผลของการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยทำการผสมแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์กับ Distarch phosphate ซึ่งเป็นแป้งดัดแปรชนิดเชื่อมโยง พบว่า แป้งบริสุทธิ์มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำกว่าแป้งเชื่อมโยง ซึ่งจากผลการทดลองทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยงของแป้งช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนให้ดีขึ้น

#### 4.4.2 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์

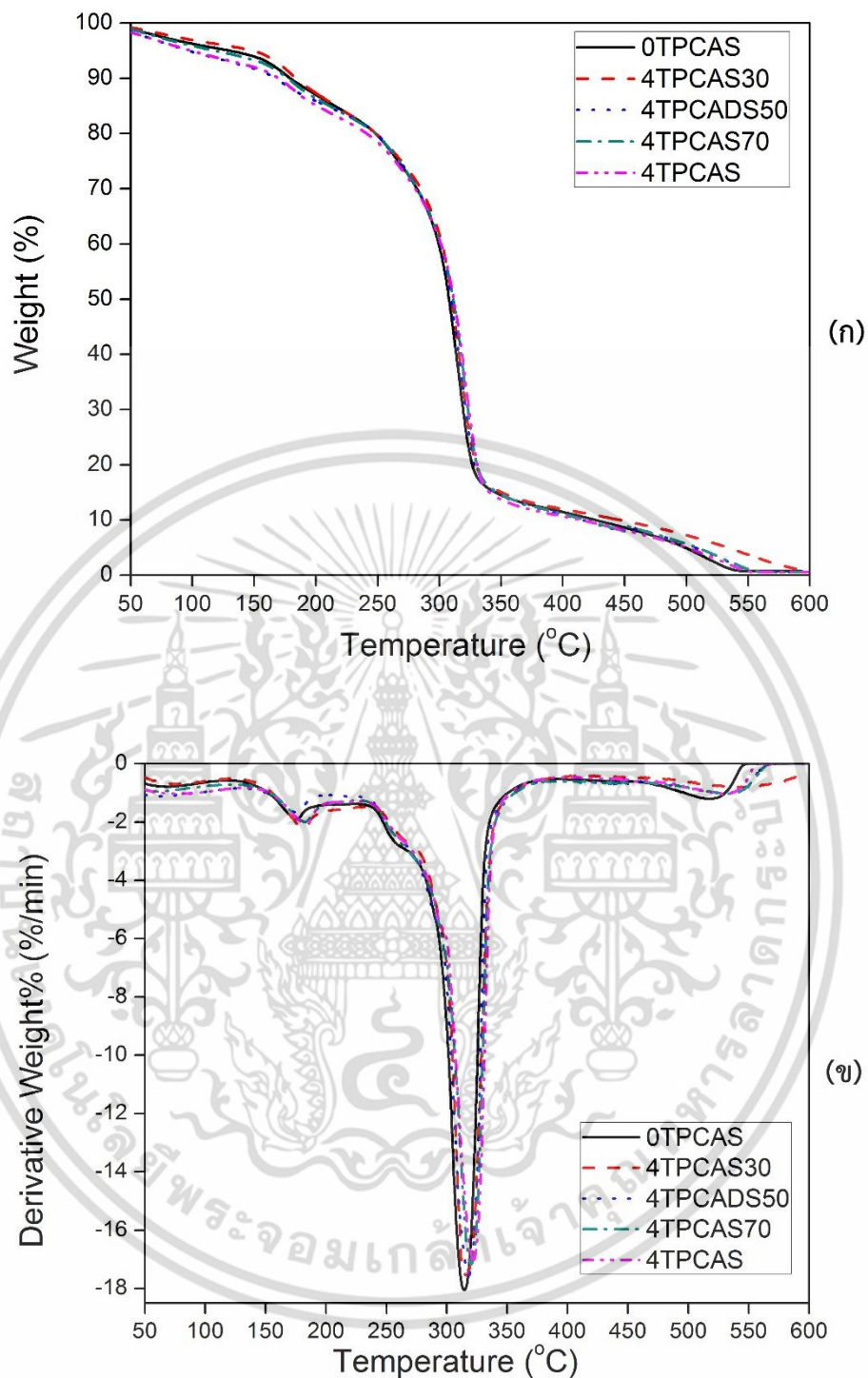
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ

(ก) TGA (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวายม่อมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ (ก) TGA (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
 แป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับ  
 แป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)			อุณหภูมิในการ สลายตัวของแป้งที่ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ หายไป 50% (°C)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (โมเลกุลแป้งที่เหลือจากการ สลายตัวไปบางส่วนเมื่อผ่าน กระบวนการขึ้นรูป)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	
0TPCAS	176.0	290.7	314.5	307.7
0.25TPCAS30	171.59	288.1	314.4	305.9
0.25TPCAS50	181.4	295.7	314.7	308.3
0.25TPCAS70	181.3	295.9	315.8	310.3
0.25TPCAS	171.3	289.7	315.0	306.1
4TPCAS30	181.4	295.6	315.5	310.0
4TPCAS50	181.8	292.9	317.7	307.5
4TPCAS70	180.3	291.8	319.3	311.2
4TPCAS	182.4	296.8	321.9	311.6

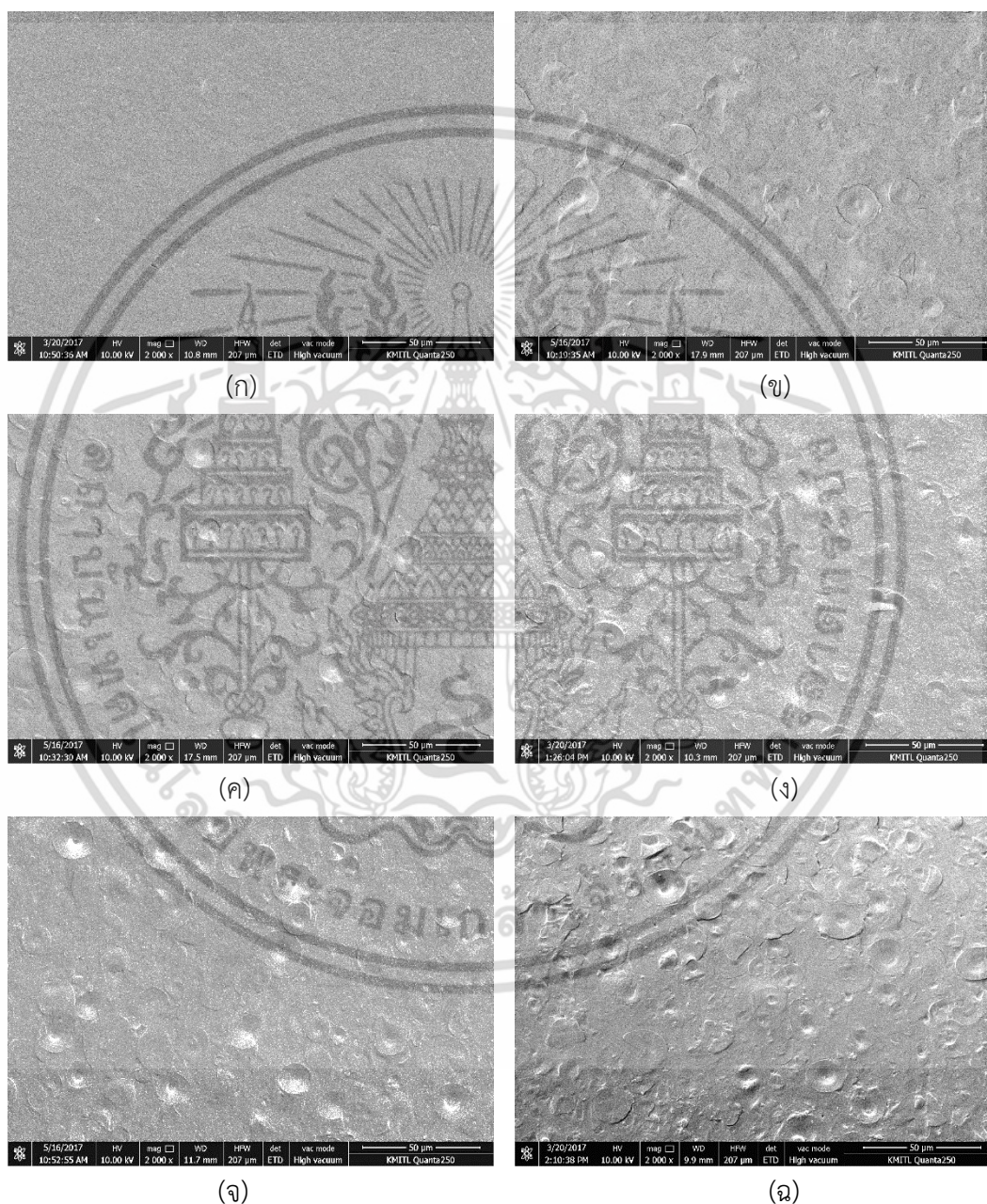
รูปที่ 4.13 – 4.14 ตารางที่ 4.5 และภาคผนวก จ แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีอุณหภูมิในการสลายตัวเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 120-220 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นช่วงการสลายตัวของแป้งหลังจากการที่โมเลกุลบางส่วนเกิดการสลายตัวจากสารเคมีหรืออุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้เหลือเป็นสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ ซึ่งสลายตัวที่ 280-300 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งส่วนใหญ่ที่ 310-325 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทำการหาอุณหภูมิในการสลายตัวเมื่อแป้งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 50% พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งในช่วงที่ 4 นั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การเกิดพันธะเชื่อมโยงของแป้งช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)

### 4.5.1 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2000 เท่า โดยให้ผลการทดลองดังนี้



**รูปที่ 4.15** สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างกัน (ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS (ค) 0.5TPCAS

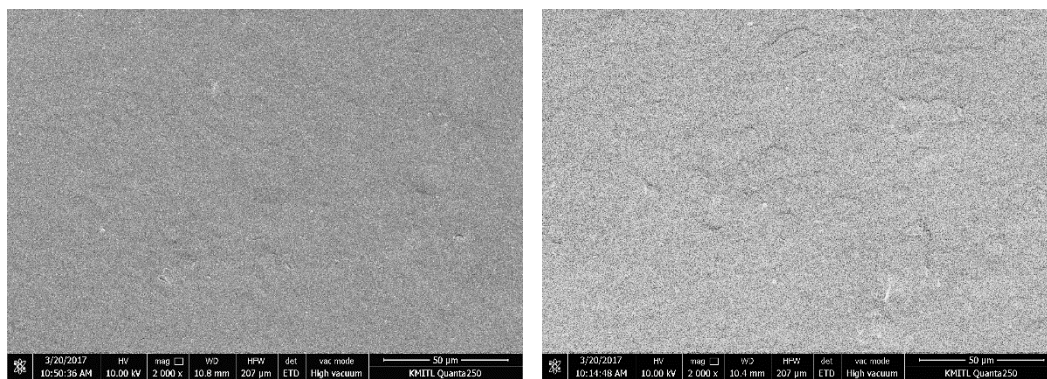
(ง) 1TPCAS (จ) 2TPCAS และ (ฉ) 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ จากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ชิ้นงานสูตร OTPCAS ที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ชิ้นงานมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และพบเม็ดแป้งบางส่วนที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ โดยชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งมีการใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากที่สุด พบเม็ดแป้งที่ไม่หลอมมากที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากผลของสมบัติทางความร้อนในหัวข้อที่ 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น แป้งมีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้น แสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แป้งเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์อย่างเห็นได้ชัดเจนจากภาคตัดขวาง

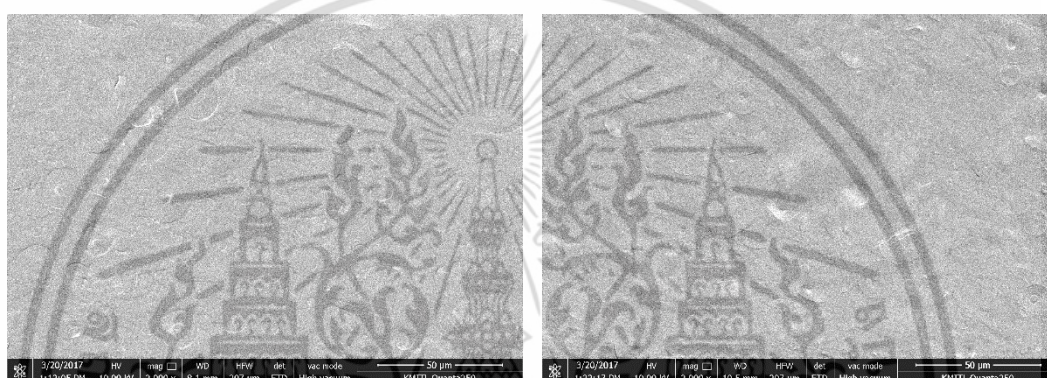
#### 4.5.2 สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

การศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลอง ดังนี้



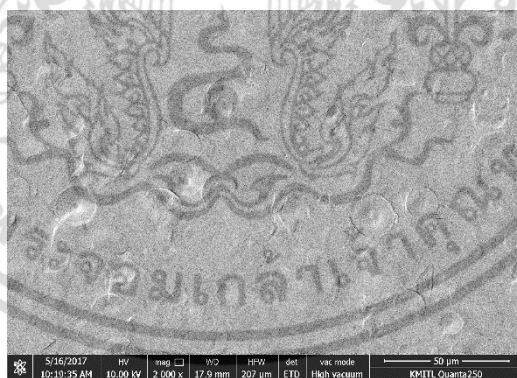
(ก)

(ข)



(ค)

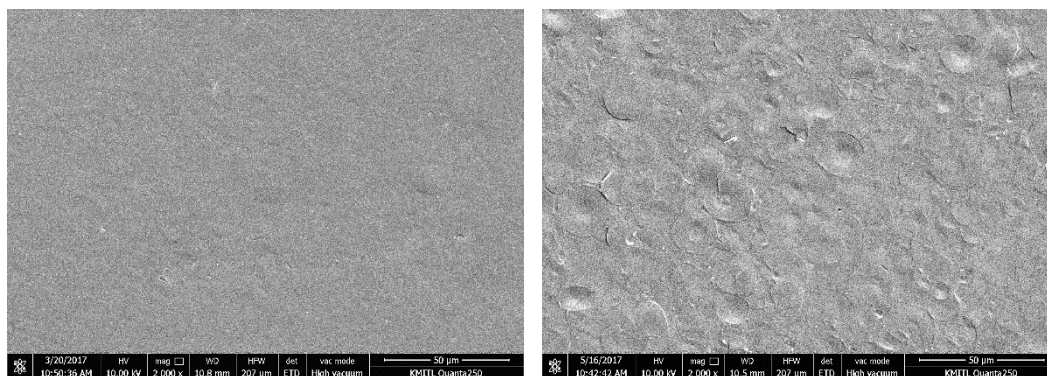
(ง)



(จ)

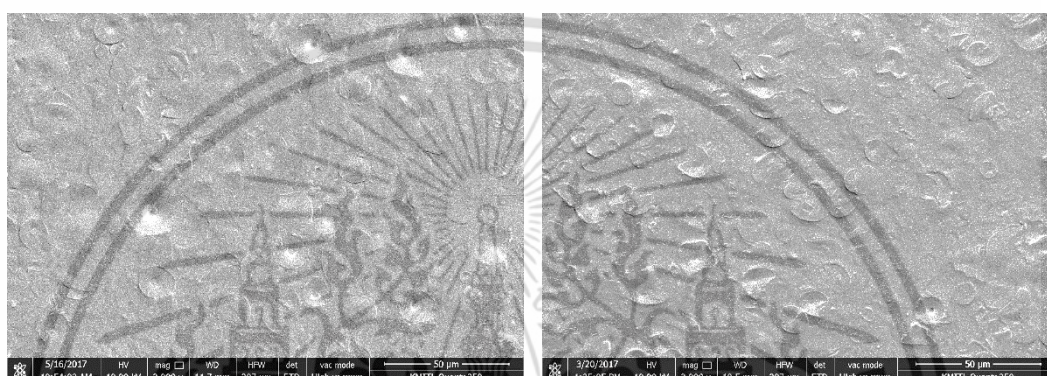
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ (ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS30 (ค) 0.25TPCAS50 (ง) 0.25TPCAS70 และ (จ) 0.25TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว-ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ (ก) 0TPCAS (ข) 4TPCAS30 (ค) 4TPCAS50 (ง) 4TPCAS70 และ (จ) 4TPCAS

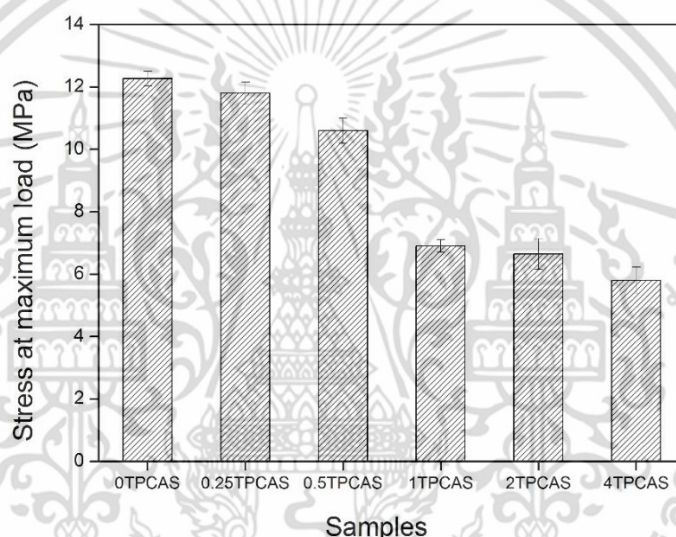
รูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ชิ้นงานสูตร 0TPCAS ที่ไม่มีสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงมากขึ้น ชิ้นงานมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และพบเม็ดแป้งบางส่วนที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น เมื่อมีส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น โดยพิจารณาจากผลของสมบัติทางความร้อนในหัวข้อที่ 4.4

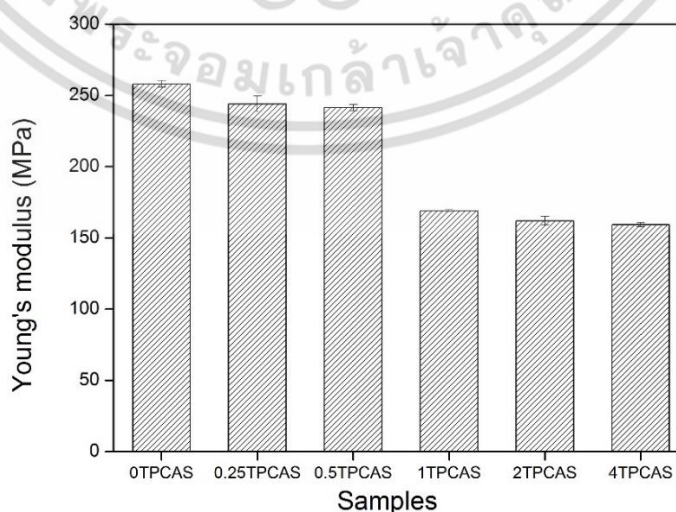
#### 4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

##### 4.6.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr โดยศึกษาจากค่าความแข็งแรงดึงมอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด โดยให้ผลการทดลองดังนี้

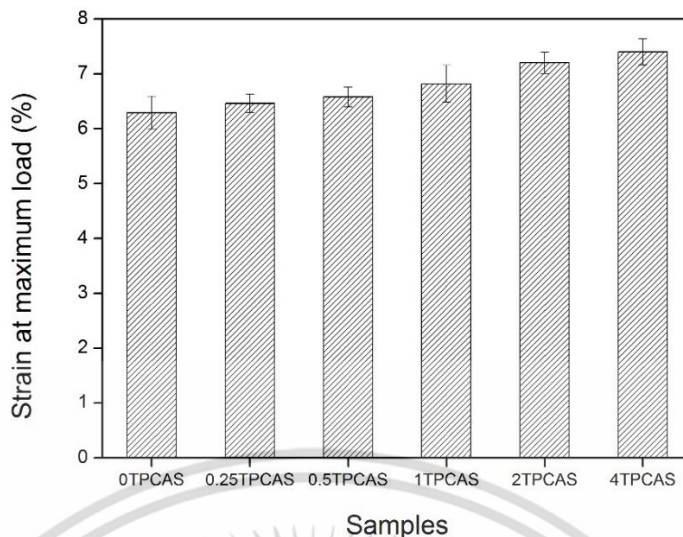


รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.19 มอดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

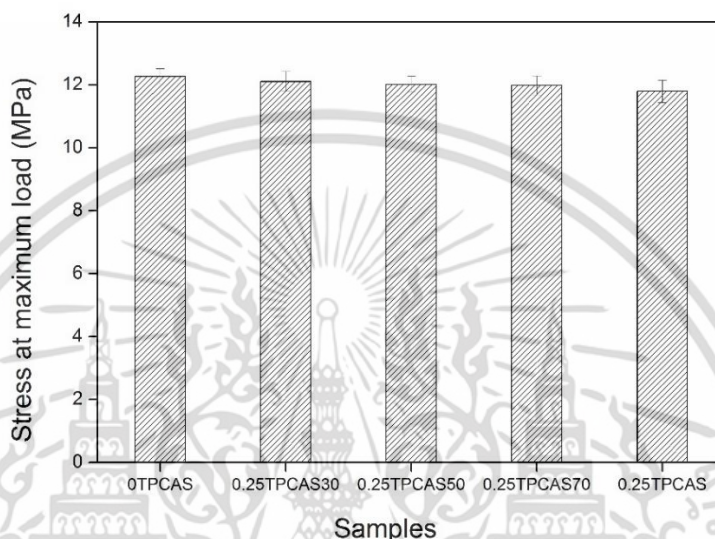


รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

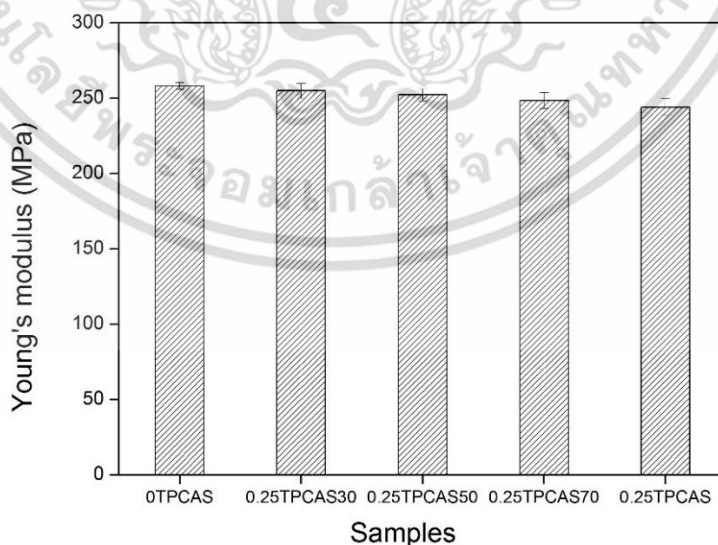
รูปที่ 4.18 – 4.20 และภาคผนวก ง แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ ที่ปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานสูตร 0TPCAS ที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดต่ำที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ที่มีการใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากที่สุด มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสต่ำที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดสูงที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยึดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตาร์ลดีไฮด์ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งพันธะเชื่อมโยงนี้ส่งผลให้โมเลกุลของแป้งสามารถยืดออกและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดจึงสูงขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ใช้มากขึ้น ทำให้พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นมากและทำหน้าที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของแป้ง ทำให้ปริมาณผลึกลดลงดังเห็นได้จากผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งปริมาณผลึกที่ลดลงนี้เองส่งผลทำให้แป้งมีความสามารถในการรับแรงที่น้อยลง ค่าความแข็งแรงดึงของแป้งจึงลดต่ำลง นอกจากนี้ หากพิจารณาจากลักษณะสัณฐานวิทยาในหัวข้อที่ 4.5 นั้น พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ชิ้นงานแป้งมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และพบเม็ดแป้งบางส่วนที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของแป้งลดต่ำลง

#### 4.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลอง ดังนี้



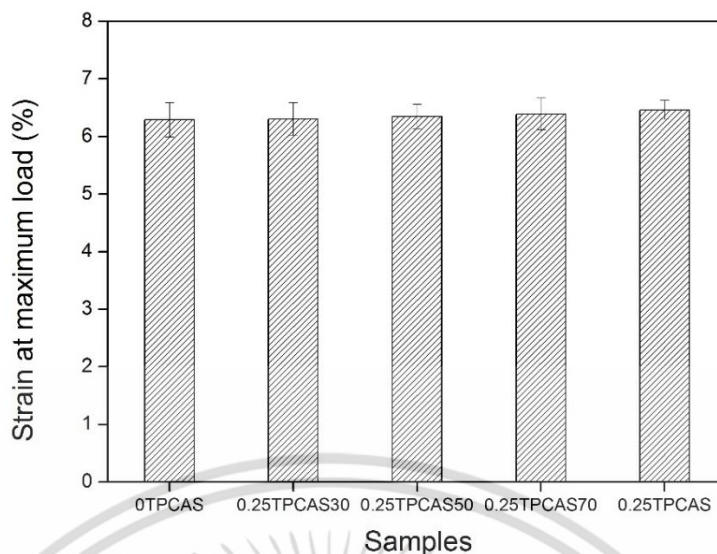
รูปที่ 4.21 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์



รูปที่ 4.22 โมดูลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่

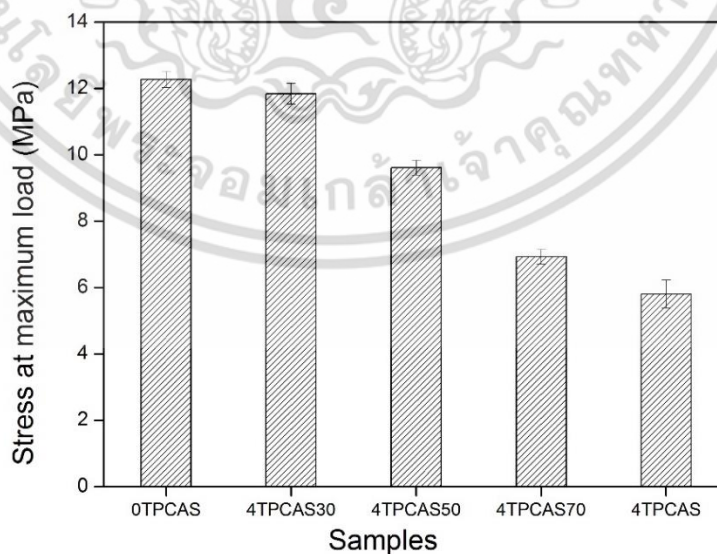
ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาไรลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



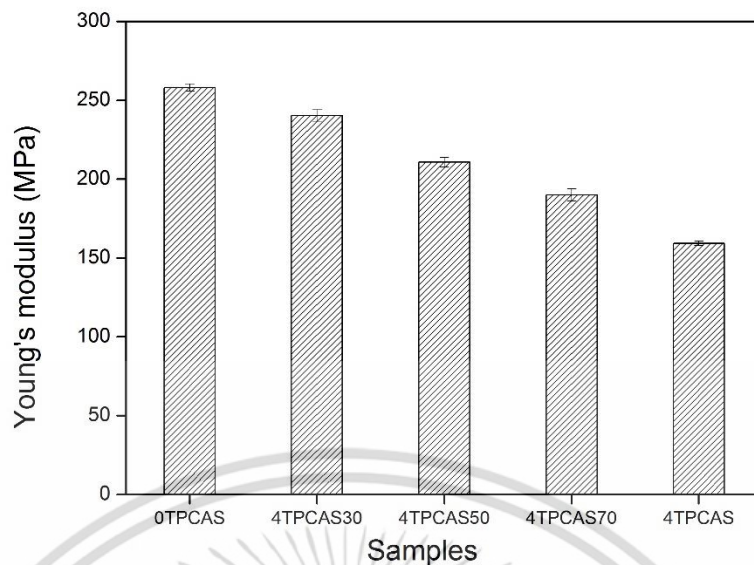
รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์การดึงยืดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

รูปที่ 4.21 – 4.23 และภาคผนวก ง แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น สมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซนต์การดึงยืดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการที่แป้งเชื่อมโยงมีการใช้กลูตาร์ลดีไฮด์ในปริมาณน้อยเพียง 0.25 phr เท่านั้น

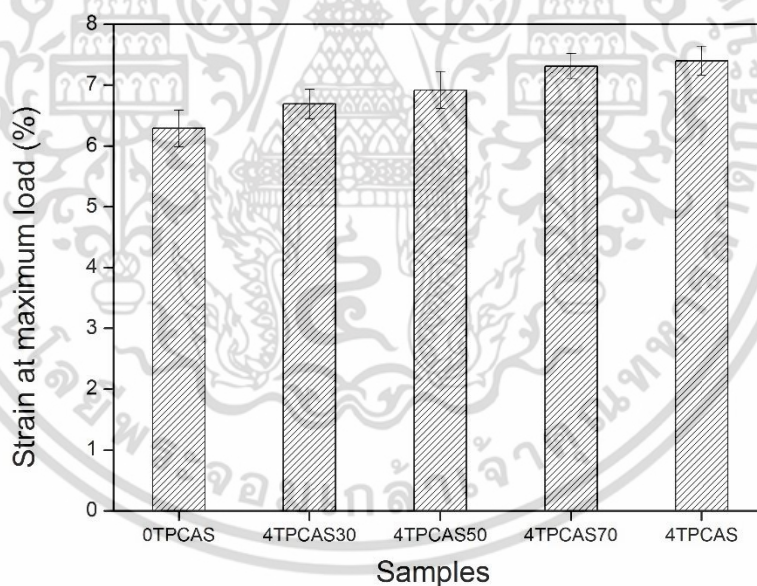


รูปที่ 4.24 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 มอดุลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์



รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง ท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์

รูปที่ 4.24 – 4.26 และภาคผนวก ง แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับ แป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้ง

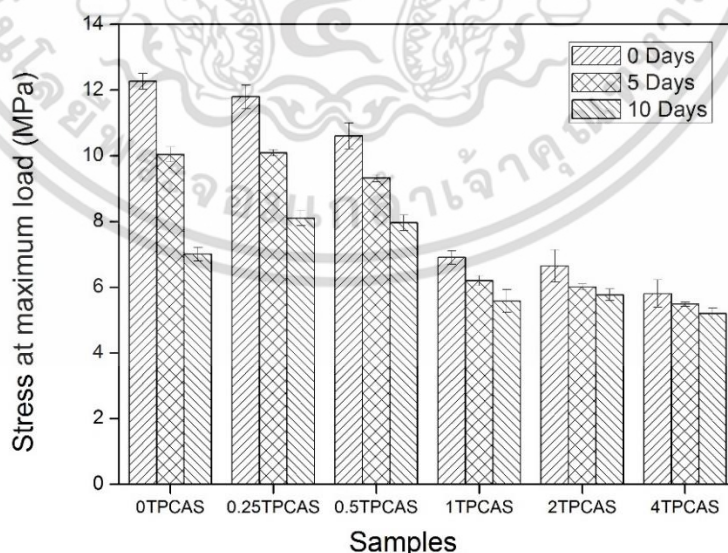
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้หากพิจารณาจากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในหัวข้อที่ 4.3 นั้นพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งปริมาณผลึกที่ลดลงนี้เองส่งผลทำให้แป้งมีความสามารถในการรับแรงที่น้อยลง ค่าความแข็งแรงดึงจึงลดต่ำ นอกจากนี้ ผลของสมบัติเชิงกลยังสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาในหัวข้อที่ 4.5 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น ชิ้นงานแป้งมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และพบเม็ดแป้งบางส่วนที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของแป้งลดต่ำลง และจากการทดลองทั้งสองตอนสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานสูตร OTPCAS ซึ่งไม่มีการใช้สารเชื่อมโยงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งมีการใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงมากที่สุดที่ 4 phr มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงที่สุด

#### 4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

##### 4.7.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

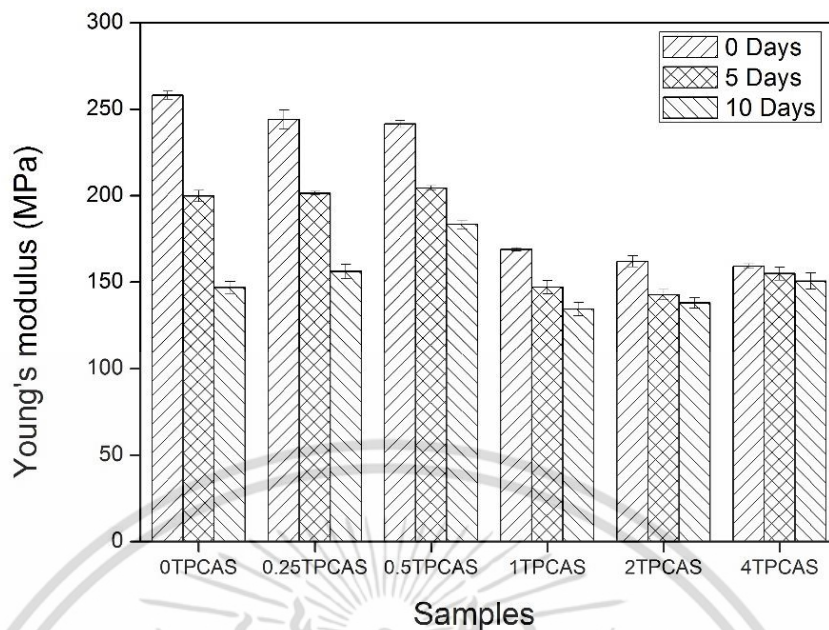
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr ทำการทดลองโดยฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-15% เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นจึงบันทึกเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ และทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด โดยให้ผลการทดลองดังนี้



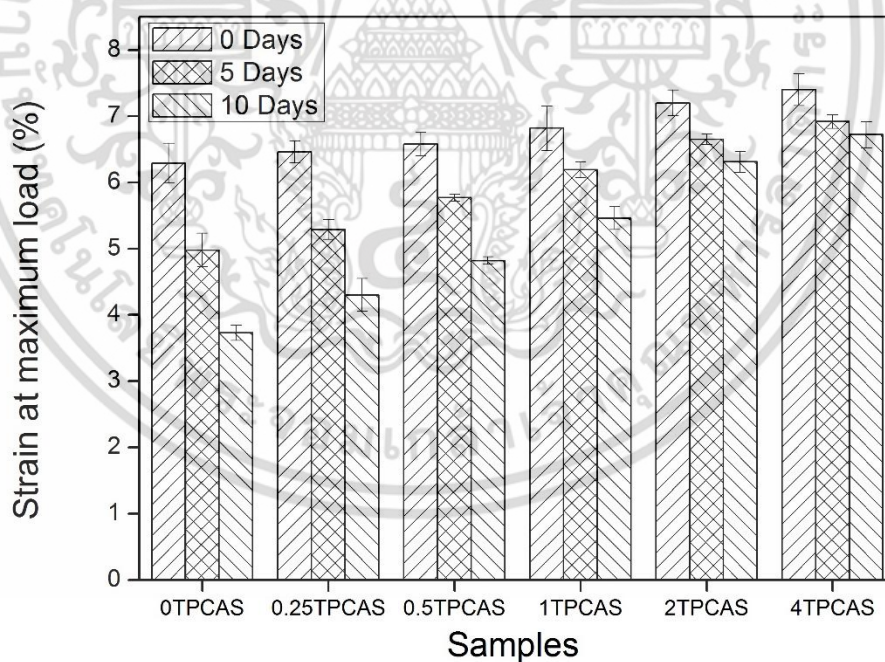
รูปที่ 4.27 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 มอดุลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.29 เปอร์เซนต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าว-ยายม่อมสูตรต่างๆ หลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

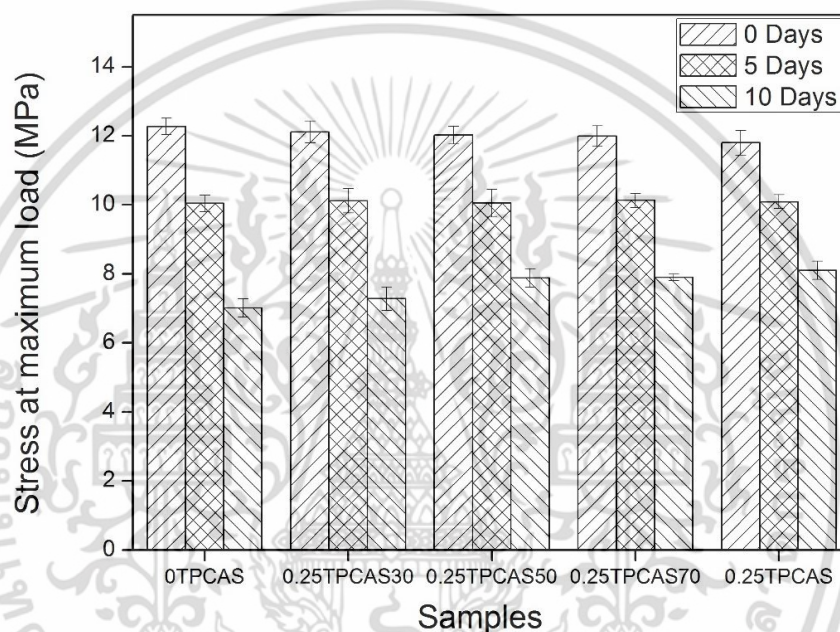
ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ความแข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด	ความแข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด
0TPCAS	18.17	22.61	20.82	42.86	43.10	40.69
0.25TPCAS	14.49	17.45	18.11	31.35	36.02	33.43
0.5TPCAS	12.07	15.28	12.31	24.90	24.07	26.74
1TPCAS	10.22	12.96	9.23	19.20	20.47	19.94
2TPCAS	9.58	11.93	7.63	13.19	14.85	12.36
4TPCAS	5.52	2.71	6.48	10.34	5.40	9.18

รูปที่ 4.27 – 4.29 และภาคผนวก ฉ แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน พบว่า สมบัติเชิงกล อันได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดภายหลังการฝังดินมีแนวโน้มลดลงทุกสมบัติ โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัตินั้นมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ฝังดินมากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.6 ประกอบ พบว่า ชิ้นงานสูตร 0TPCAS ที่ไม่ได้ทำการใช้สารเชื่อมโยงมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมากกว่าชิ้นงานสูตรที่มีการใช้สารเชื่อมโยงในทุกสมบัติและทุกช่วงเวลา นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดินของแป้งลดลง หรือแป้งมีสมบัติการย่อยสลายที่ช้าลง โดยชิ้นงานแป้งสูตร 0TPCAS ซึ่งไม่มีการใช้สารเชื่อมโยงมีการย่อยสลายที่เร็วที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณมากที่สุดมีการย่อยสลายที่ช้าที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากในดินนั้นมีความชื้นเป็นส่วนประกอบหลัก และโครงสร้างของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว แป้งจึงมีสมบัติชอบน้ำและสามารถดูดซับความชื้นเข้ามาในโครงสร้างแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมีขนาดที่สั้นลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง [35] แต่เมื่อมีการใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลดีไฮด์ของ กลูตารัลดีไฮด์ทำให้ความเป็น Hydrophilicity ของแป้งลดลง นั่นหมายถึงสมบัติความชอบน้ำของแป้งลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายเกิดได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดซับความชื้นในหัวข้อที่ 4.2 ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น แป้งมีการดูดซับความชื้นลดลง

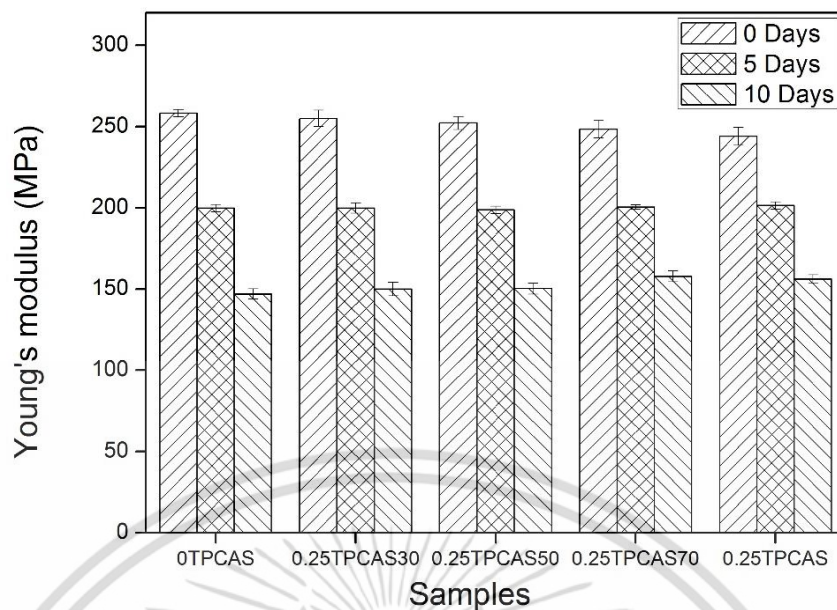
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงและแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

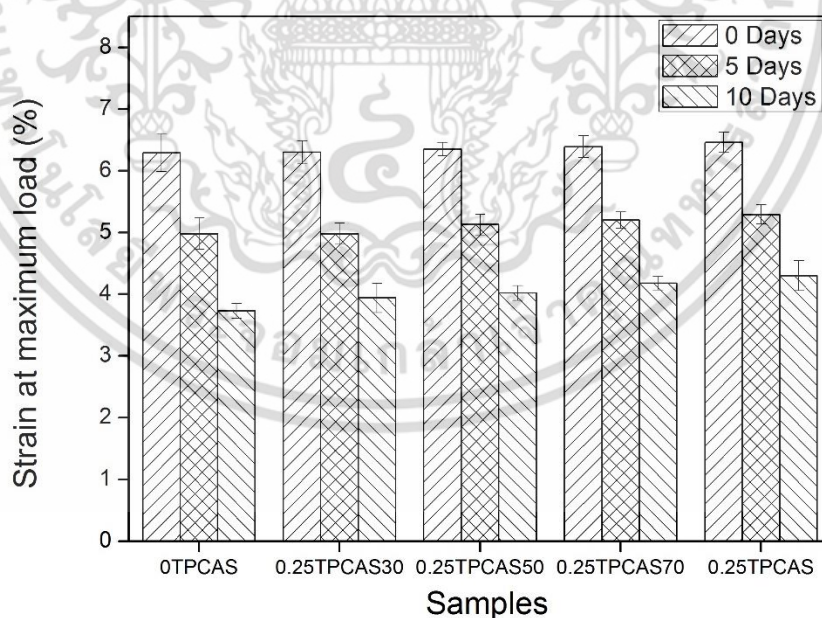
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.30 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

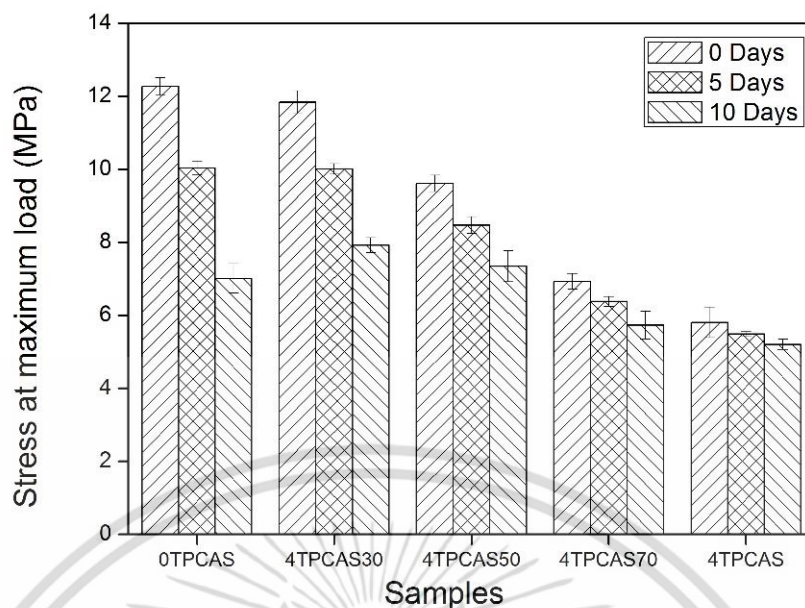


รูปที่ 4.31 มอดุลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากฝัง ดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

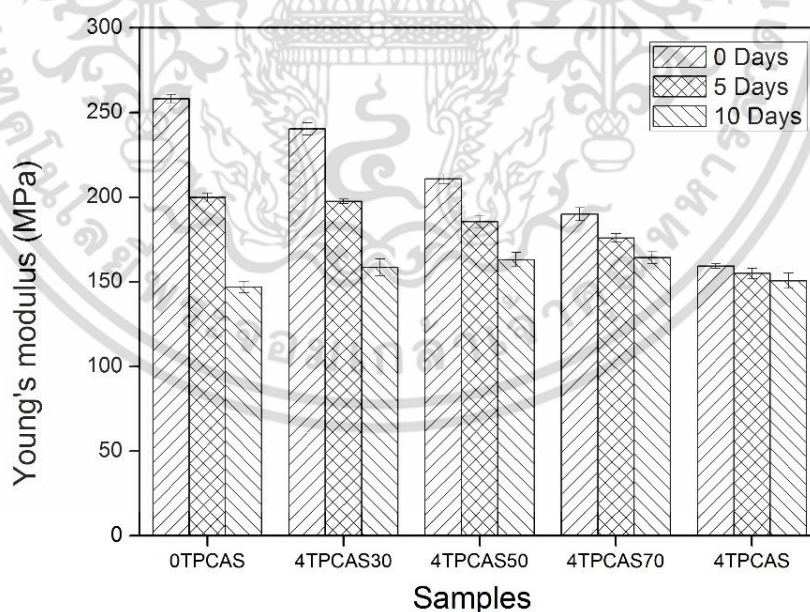


รูปที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง ท้าวยายม่อมที่ ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตาร์ลดีไฮด์ 0.25 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

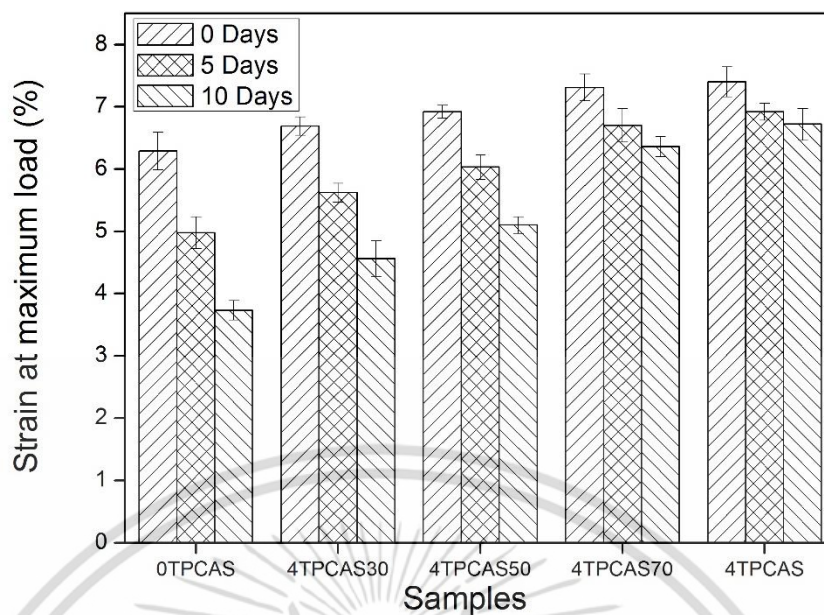


รูปที่ 4.33 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าว-ยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.34 มอดุลัสของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ภายหลังกการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์หลังทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยึด	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยึด
0TPCAS	18.17	22.61	20.82	42.86	43.10	40.69
0.25TPCAS30	16.43	21.62	20.95	39.88	41.18	37.46
0.25TPCAS50	16.38	21.21	19.21	34.44	40.44	36.69
0.25TPCAS70	15.51	19.33	18.62	34.11	36.48	34.58
0.25TPCAS	14.49	17.45	18.11	31.35	36.02	33.43
4TPCAS30	15.45	17.82	15.99	33.10	34.03	31.83
4TPCAS50	11.86	12.00	12.86	23.62	22.65	26.30
4TPCAS70	7.93	7.38	8.34	17.31	13.52	12.99
4TPCAS	5.51	2.71	6.48	10.34	5.40	9.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.30 – 4.35 และภาคผนวก ฉ แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน พบว่า สมบัติเชิงกล อันได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดภายหลังจากฝังดินมีแนวโน้มลดลงทุกสมบัติ โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงนั้นมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ฝังดินมากขึ้น

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการที่แป้งเชื่อมโยงมีการใช้กลูตารัลดีไฮด์ในปริมาณน้อยเพียง 0.25 phr เท่านั้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของแป้งมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดินของแป้งลดลง หรือแป้งมีสมบัติการย่อยสลายที่ช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่แป้งเชื่อมโยงมีสมบัติความชอบน้ำน้อยกว่าแป้งบริสุทธิ์ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น จึงทำให้สมบัติของแป้งโดยรวมมีความชอบน้ำน้อยลงตามไปด้วย ความสามารถในการย่อยสลายจึงเกิดได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดซับความชื้นในหัวข้อที่ 4.2 ที่พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงมากขึ้น แป้งมีการดูดซับความชื้นลดลง และจากการทดลองทั้งสองตอนสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานสูตร OTPCAS ซึ่งไม่มีการใช้สารเชื่อมโยงมีการย่อยสลายเร็วที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร 4TPCAS ซึ่งมีการใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงมากที่สุดที่ 4 phr มีการย่อยสลายช้าที่สุด

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 phr และ ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยาย่มอมที่ทำการเชื่อมโยงโดยใช้ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 และ 4 phr กับแป้งท้าวยาย่มอมบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 0/100, 30/70, 50/50, 70/30 และ 100/0 สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ทดสอบการบวมตัว พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น การบวมตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแป้งสูตร 4TPCAS มีการบวมตัวน้อยที่สุดในขณะที่สูตร 0TPCAS มีการบวมตัวมากที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น การบวมตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น การบวมตัวมีแนวโน้มลดลง

2. เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลง โดยแป้งเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุดในขณะที่สูตร 0TPCAS มีการดูดซับความชื้นมากที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลง

3. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลง โดยแป้งเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีปริมาณผลึกต่ำที่สุด ในขณะที่สูตร 0TPCAS มีปริมาณผลึกสูงที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr มากขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลง

4. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยแป้งเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงที่สุดในขณะที่สูตร 0TPCAS มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของ กลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ภาคตัดขวางของชิ้นงานแปงมีลักษณะขรุขระมากขึ้น โดยแปงเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีลักษณะขรุขระของเม็ดแปงที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์มากที่สุด ในขณะที่สูตร 0TPCAS ชิ้นงานมีความเรียบที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแปงเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 และ 4 phr มากขึ้น ภาคตัดขวางของชิ้นงานแปงมีลักษณะขรุขระและพบเม็ดแปงที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์มากขึ้น

6. การทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้นเล็กน้อย โดยแปงเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสต่ำที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงที่สุด ในขณะที่สูตร 0TPCAS มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแปงเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของ กลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น สมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแปงเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้นเล็กน้อย

7. ทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ชิ้นงานแปงมีความสามารถในการย่อยสลายลดต่ำลง โดยแปงเชื่อมโยงสูตร 4TPCAS มีการย่อยสลายช้าที่สุด ในขณะที่สูตร 0TPCAS มีการย่อยสลายเร็วที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแปงเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 0.25 phr มากขึ้น ความสามารถในการย่อยสลายของแปงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแปงเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ 4 phr มากขึ้น ชิ้นงานแปงมีความสามารถในการย่อยสลายลดต่ำลง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแปงทำวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์สูตร 4TPCAS นั้นมีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลของการบวมตัว เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลาย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปแบบอื่นๆ ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแปงทำวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เช่น การเทหล่อ การฉีดขึ้นรูป หรือการเป่าขึ้นรูป เพื่อให้ได้ตัวอย่างชิ้นงานที่หลากหลายในด้านของการนำไปใช้งาน และสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปได้

2. ศึกษาผลของการใช้เส้นใย เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยมะพร้าว หรือเส้นใยหนุ่ย ใส่ลงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแปงทำวยายม่อมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง และปรับปรุงสมบัติด้านการดูดซับความชื้นให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] ทศนัย อรรถพรพิทักษ์. 2546. “สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชท้าวายม่อม *Tacca leontopetaloides Ktze.*” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] Yeh, J.T. Hou, Y.J. Cheng, L. Wang, Y.Z. Yang, L. and Wang, C.K. “Waterproof and strength retention properties of thermoplastic starch based biocomposites modified with glutaraldehyde.” *Carbohydrate Polymers*. 127 (2015) : 135-144.
- [4] Jin, M. Ikeda, S. and Zhong, Q. “Strengthening soy protein hydrogels filled with protein-coated montmorillonite nanoclay by glutaraldehyde crosslinking.” *LWT - Food Science and Technology*. 51 (2013) : 23-29.
- [5] Tian, Z. Wu, K. Liu, W. Shen, L. and Li, G. “Two-dimensional infrared spectroscopic study on the thermally induced structural changes of glutaraldehyde-crosslinked collagen.” *Spectrochimica Acta : Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 140 (2015) : 356-363.
- [6] Pratt, D.Y. Wilson, L.D. and Kozinski, J.A. “Preparation and sorption studies of glutaraldehyde cross-linked chitosan copolymers.” *Journal of Colloid and Interface Science*. 395 (2013) : 205-211.
- [7] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). 2559. **เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน : พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. [Online]. Available : [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic).
- [8] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2553. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [9] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2559. **การพัฒนาการของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/download/document/chapter2.pdf>.
- [10] ศิริวิมล สุขสวัสดิ์. 2556. “การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแล็กไทด์ที่ผ่านการใช้งานโดยแอคติโนมัยซีสต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ฉันททิพ คำนวนทิพย์. 2540. “การสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ ดัดแปรด้วยแป้งมันสำปะหลังซึ่งผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรด.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] สุชลี รอดทั้ง. 2548. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/ แป้ง/แป้งดัดแปร.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] The Biochem Synapse. 2559. **Carbohydrates Part II.** [Online]. Available : <https://thebiochemsynapse.wordpress.com/tag/amylose>.
- [14] Study academy. 2559. **Amylose: Structure, Formula and Function.** [Online]. Available : <http://study.com/academy/lesson/amylose-structure-formula-function.html>.
- [15] Kadokawa, J.I. “Architecture of Amylose Supramolecules in Form of Inclusion Complexes by Phosphorylase-Catalyzed Enzymatic Polymerization.” *Biomolecules*. 3 (2013) : 369-385.
- [16] ขวนชม อ่วมเนตร. 2552. “การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งดัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมพืช คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [17] นรศิษฐ์ จันทร์กุล. 2547. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] อนงค์ เจษฎาญาณเมธา. 2534. “แป้งมันสำปะหลังดัดแปร : การแทนที่และการเชื่อมขวาง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [19] ปุณณภา อารามรักษ์. 2559. **วิธีการทำแป้งท้าวยายม่อม.** งานวิชาการเกษตร ศูนย์ศึกษาและพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี.
- [20] Bicchemical. 2559. **Glutaraldehyde.** [Online]. Available : <http://www.bicchemical.com/index.php?view=article&catid=1%3Anews&id=11>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2559. **Glutaraldehyde**. [Online]. Available : <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=2332>.
- [22] คณะอนุกรรมการมาตรฐานความปลอดภัยทางห้องปฏิบัติการ คณะกรรมการพัฒนาคุณภาพห้องปฏิบัติการ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล. 2559. **Glutaraldehyde**. [Online]. Available : <http://www.si.mahidol.ac.th/project>.
- [23] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
- [24] ภิกษุ รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง*. 23 (2) : 140-159.
- [25] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2559. **Glycerol**. [Online]. Available : <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=1568>.
- [26] Mpbio. 2559. **Glycerol**. [Online]. Available : <http://www.mpbio.com/product/pid=02193996>.
- [27] อภิสรา ศรีสายหยุด และอภินันท์ สุทธิธารวัช. 2554. “การเตรียมผงแป้งที่ถูกเชื่อมขวางโมเลกุลผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย.” การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. จังหวัดสงขลา.
- [28] รัตเกล้า ภูติวรนาถ. 2539. “การทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตซานโดยการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสายช่วยให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] นพร แซ่เบ๊. 2547. “ผลการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟต ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากพืชไทยและสตาร์ชจากจีน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] Kaewtatip, K. and Thongmee J. “The effects of cross-linked starch on the properties of thermoplastic starch.” *Materials and Design*. 45 (2013) : 586-589.
- [31] Mei, J.Q. Zhou, D.N. Jin, Z.Y. Xu, X.M. and Chen, H.Q. “Effects of citric acid esterification on digestibility, structural and physicochemical properties of cassava starch.” *Food Chemistry*. 187 (2015) : 378-384.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Pornsuksomboon, K. Hollo, B.B. Szecsenyi, K.M. and Kaewtatip, K. “Properties of baked foams from citric acid modified cassava starch and native cassava starch blends.” *Carbohydrate Polymers*. 136 (2016) : 107-112.
- [33] Garg, S. and Jana, A.K. “Studies on the properties and characteristics of Starch - LDPE blend films using cross-linked, glycerol modified, cross-linked and glycerol modified starch.” *European Polymer*. 43 (2007) : 3976-3987.
- [34] El-Tahlawy, K. Venditti, R.A. and Pawlak, J.J. “Aspects of the preparation of starch microcellular foam particles crosslinked with glutaraldehyde using a solvent exchange technique.” *Carbohydrate Polymers*. 67 (2007) : 319–331.
- [35] จินตภา แต้มสีคราม. 2558. “สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [36] ยศธร ธเนสรุ่งโรจน์. 2557. “ผลของชนิดของแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล. 2546. เคมีอินทรีย์ 2. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [38] Reddy, N. and Yang, Y. “Citric acid cross-linking of starch films.” *Food Chemistry*. 118 (2010) : 702-711.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์เจลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์เจล (%)
0TPCAS	0
0.25TPCAS	8.4
0.5TPCAS	13.5
1TPCAS	29.6
2TPCAS	41.9
4TPCAS	56.2
0.25TPCAS30	2.5
0.25TPCAS50	4.0
0.25TPCAS70	7.1
4TPCAS30	10.4
4TPCAS50	27.6
4TPCAS70	43.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)					
	0TPCAS	0.25TPCAS	0.5TPCAS	1TPCAS	2TPCAS	4TPCAS
0	0	0	0	0	0	0
1	117.99	115.45	113.78	111.61	99.85	82.07
2	129.92	124.41	120.58	117.05	106.45	92.73
3	143.61	139.22	133.29	129.00	118.16	103.20
4	147.16	140.63	136.24	131.63	124.15	107.28
5	150.10	145.97	143.56	139.80	133.32	114.02
6	169.96	166.05	163.76	159.24	153.00	129.40

ตารางที่ ข.2 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)					
	0.25TPCAS30	0.25TPCAS50	0.25TPCAS70	4TPCAS30	4TPCAS50	4TPCAS70
0	0	0	0	0	0	0
1	117.1	116.51	115.92	114.56	100.02	95.98
2	127.89	126.31	125.44	121.76	111.81	103.71
3	143.21	141.54	140.28	132.82	120.75	115.81
4	145.21	144.90	142.94	136.33	127.90	119.23
5	149.01	147.89	146.32	142.02	133.98	128.21
6	169.02	167.88	166.91	155.96	146.82	135.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

**ตารางที่ ค.1** เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร  
ต่างๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์  $99\pm 1\%$  เป็นระยะเวลา 15 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)					
	0TPCAS	0.25TPCAS	0.5TPCAS	1TPCAS	2TPCAS	4TPCAS
0	0	0	0	0	0	0
1	13.40	12.30	12.08	11.76	11.28	10.22
2	21.46	20.23	20.04	19.42	18.75	18.46
3	26.32	25.22	24.96	24.63	24.50	23.39
4	37.50	36.39	36.35	35.83	35.51	34.36
5	37.63	36.52	36.41	36.41	36.16	35.50
6	38.55	37.53	37.26	37.80	37.24	36.39
7	39.79	38.66	38.50	38.35	38.42	37.55
8	41.52	39.95	39.88	39.93	39.67	38.60
9	46.21	45.17	44.98	44.56	44.44	43.45
10	47.48	46.88	46.51	46.18	45.47	44.69
11	48.40	48.13	47.11	46.88	45.40	44.78
12	49.74	48.15	47.93	47.04	45.86	45.12
13	50.75	49.73	48.85	48.04	46.90	45.91
14	52.75	50.83	49.51	48.97	47.24	46.30
15	53.77	52.25	50.56	49.42	47.97	46.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
 แป้งท้าวยาย่มอ่มที่ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยาย่มอ่มบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่  
 ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1% เป็นระยะเวลา 15 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)					
	0.25TPCAS30	0.25TPCAS50	0.25TPCAS70	4TPCAS30	4TPCAS50	4TPCAS70
0	0	0	0	0	0	0
1	13.09	13.18	12.87	12.56	11.93	11.00
2	21.38	20.79	20.26	20.86	19.95	19.10
3	26.31	25.98	25.36	25.98	25.47	24.33
4	37.50	36.89	36.41	36.00	35.86	35.34
5	37.43	36.98	36.43	37.25	36.77	36.22
6	38.51	38.23	37.78	38.05	37.53	36.90
7	39.66	38.99	38.72	39.10	38.16	37.88
8	40.87	40.66	40.65	40.96	40.26	39.47
9	46.22	45.88	45.34	45.69	44.88	43.97
10	47.22	47.03	46.90	46.94	46.29	45.89
11	48.39	48.33	48.13	47.89	46.57	45.83
12	49.66	48.96	48.23	48.89	47.33	46.69
13	50.79	50.23	49.44	49.34	48.38	46.99
14	52.41	51.59	51.00	51.49	49.99	47.88
15	53.40	52.90	52.66	52.10	50.56	48.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

**ตารางที่ ง.1** สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ

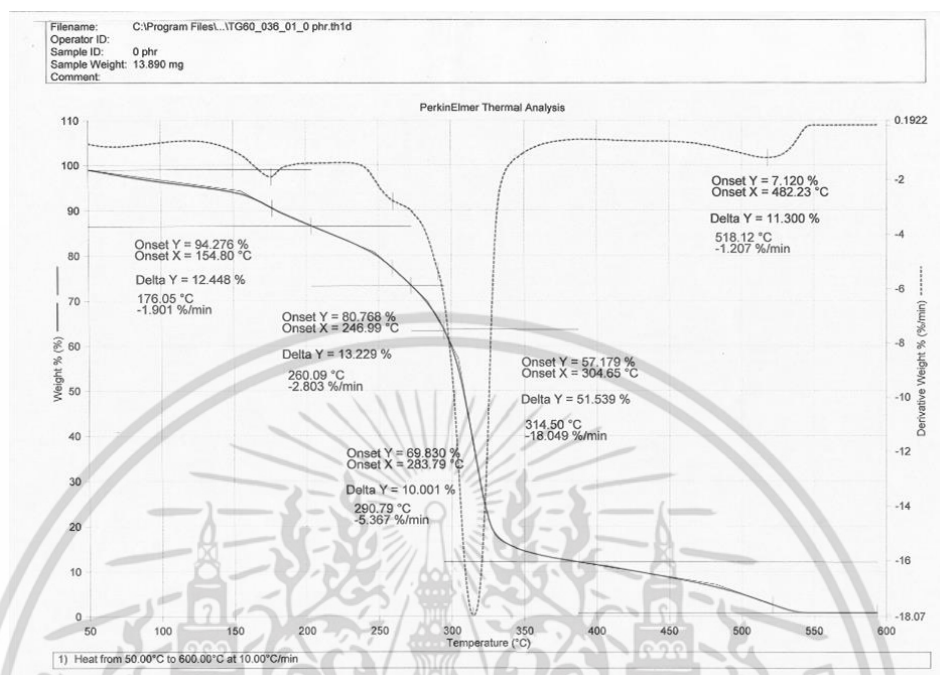
สูตร	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0TPCAS	12.27±0.23	258.18±2.26	6.29±0.30
0.25TPCAS	11.80±0.35	244.02±5.63	6.46±0.16
0.5TPCAS	10.60±0.40	241.48±2.06	6.58±0.17
1TPCAS	6.90±0.20	169.01±0.88	6.82±0.33
2TPCAS	6.64±0.49	162.00±3.16	7.20±0.19
4TPCAS	5.80±0.41	159.23±1.31	7.40±0.24

**ตารางที่ ง.2** สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งท้าวยายม่อมที่  
ถูกเชื่อมโยงกับแป้งท้าวยายม่อมบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆ

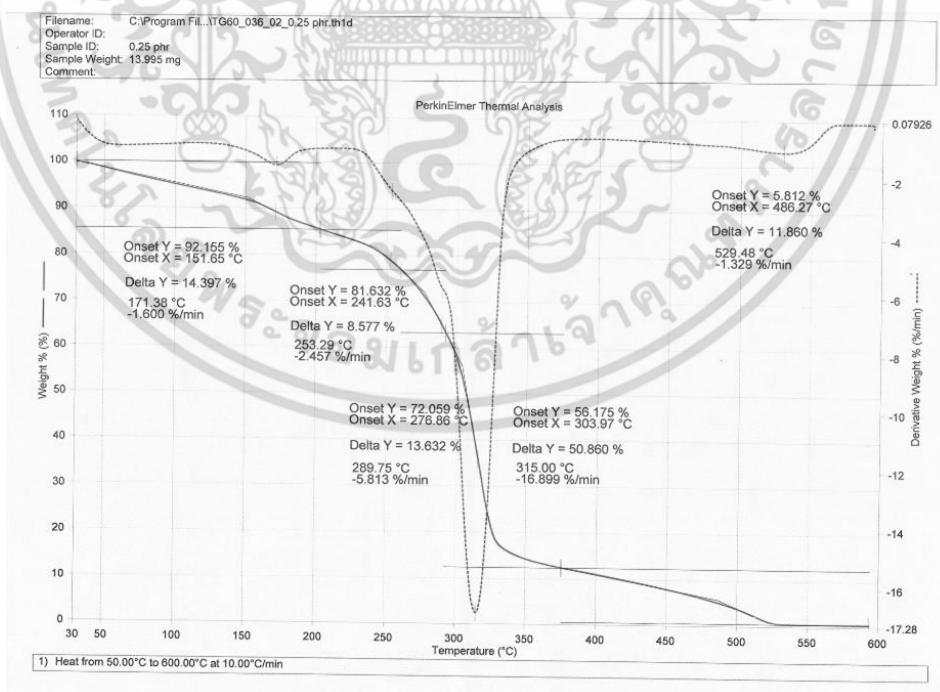
สูตร	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0.25TPCAS30	12.11±0.31	254.98±4.98	6.30±0.28
0.25TPCAS50	12.02±0.25	252.23±3.99	6.35±0.21
0.25TPCAS70	11.99±0.30	248.35±5.29	6.39±0.27
4TPCAS30	11.84±0.31	240.34±3.68	6.69±0.24
4TPCAS50	9.61±0.22	210.77±2.98	6.92±0.30
4TPCAS70	6.93±0.21	189.91±3.81	7.31±0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

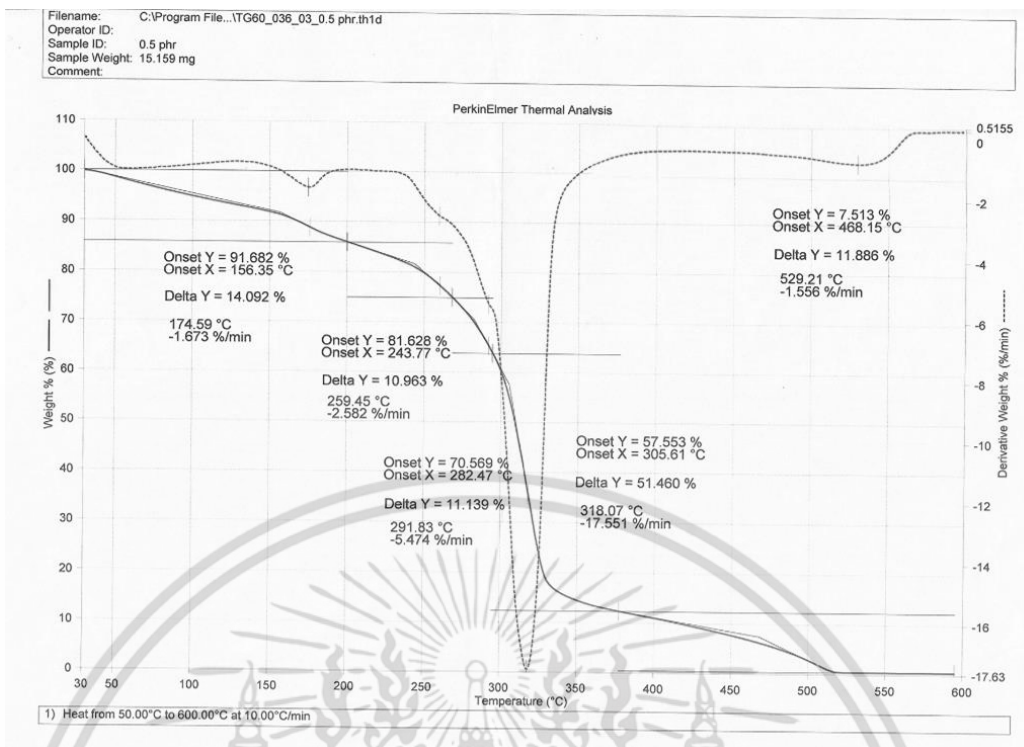


รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม่อมสูตร 0TPCAS

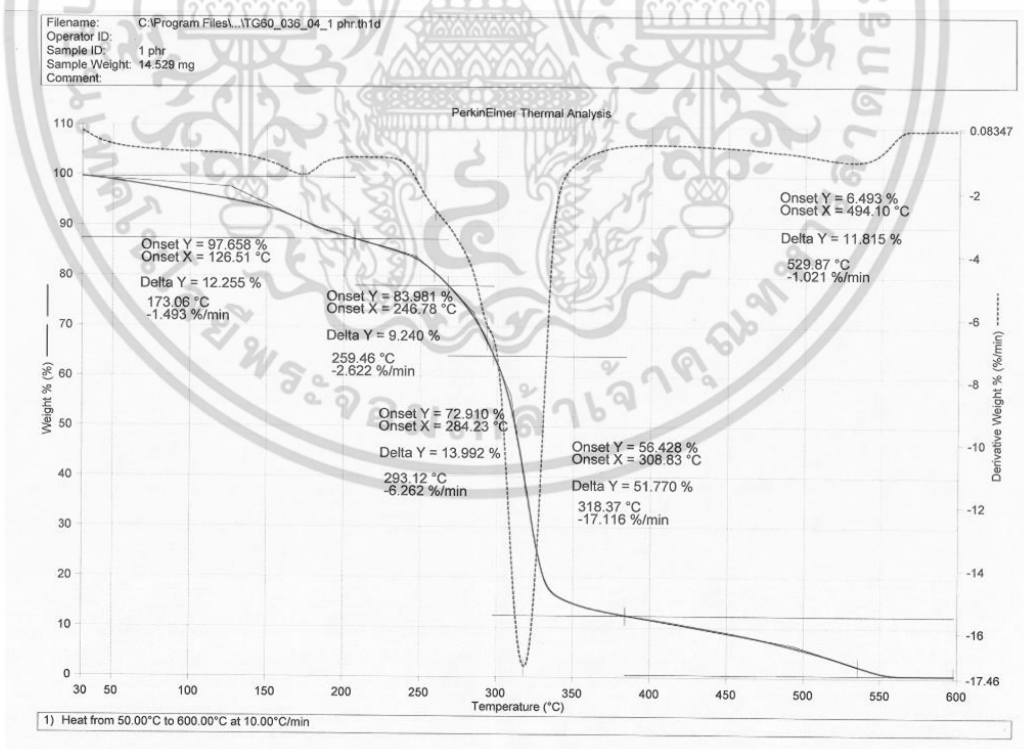


รูปที่ จ.2 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม่อมสูตร 0.25TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

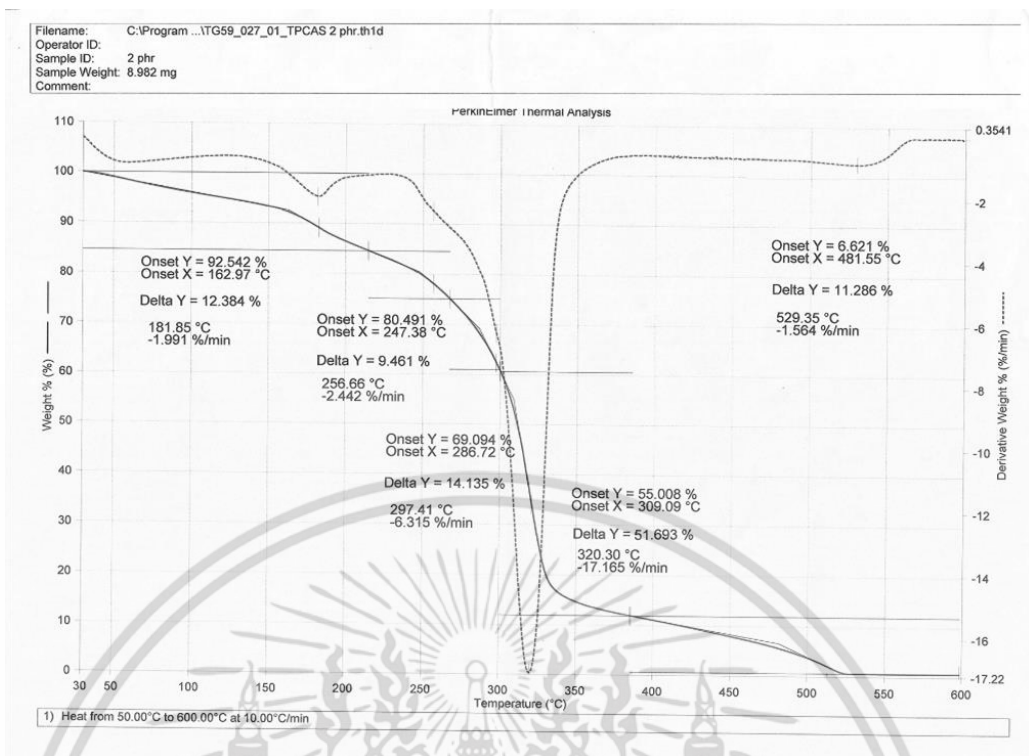


รูปที่ จ.3 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.5TPCAS

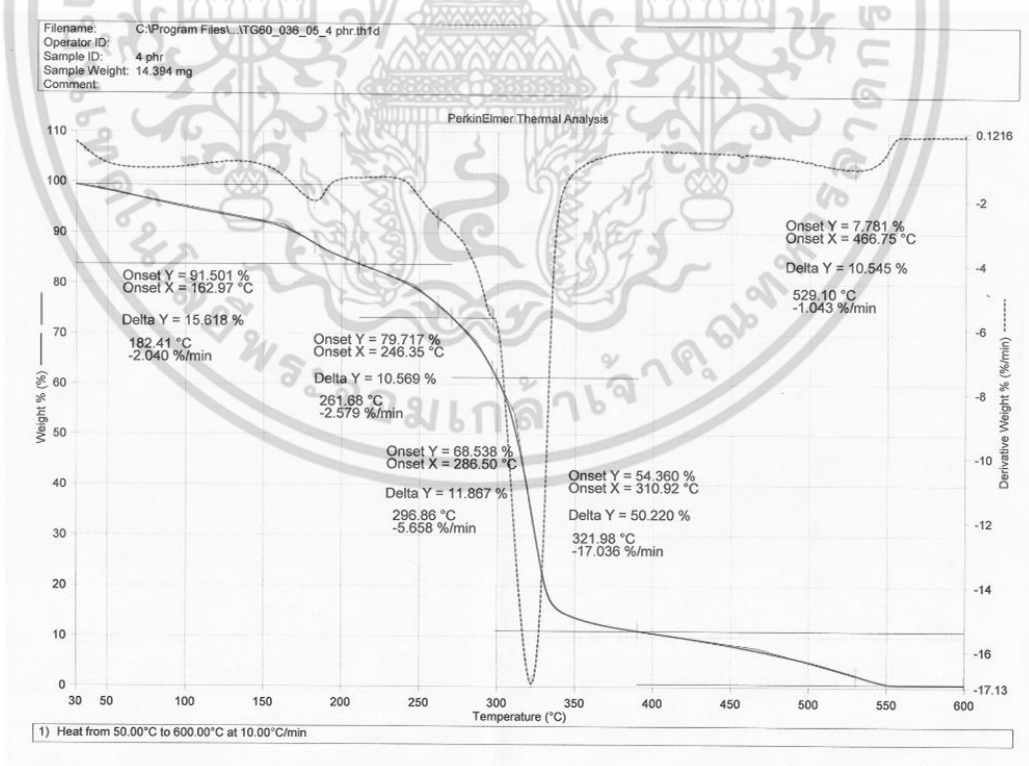


รูปที่ จ.4 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 1TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

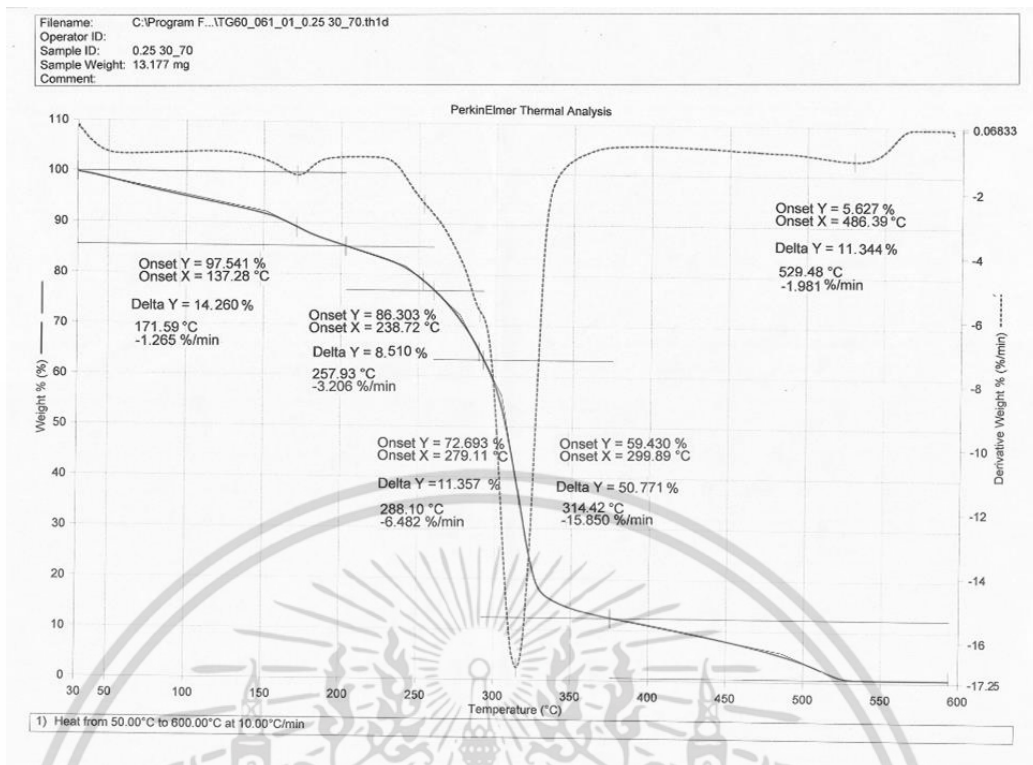


รูปที่ จ.5 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 2TPCAS

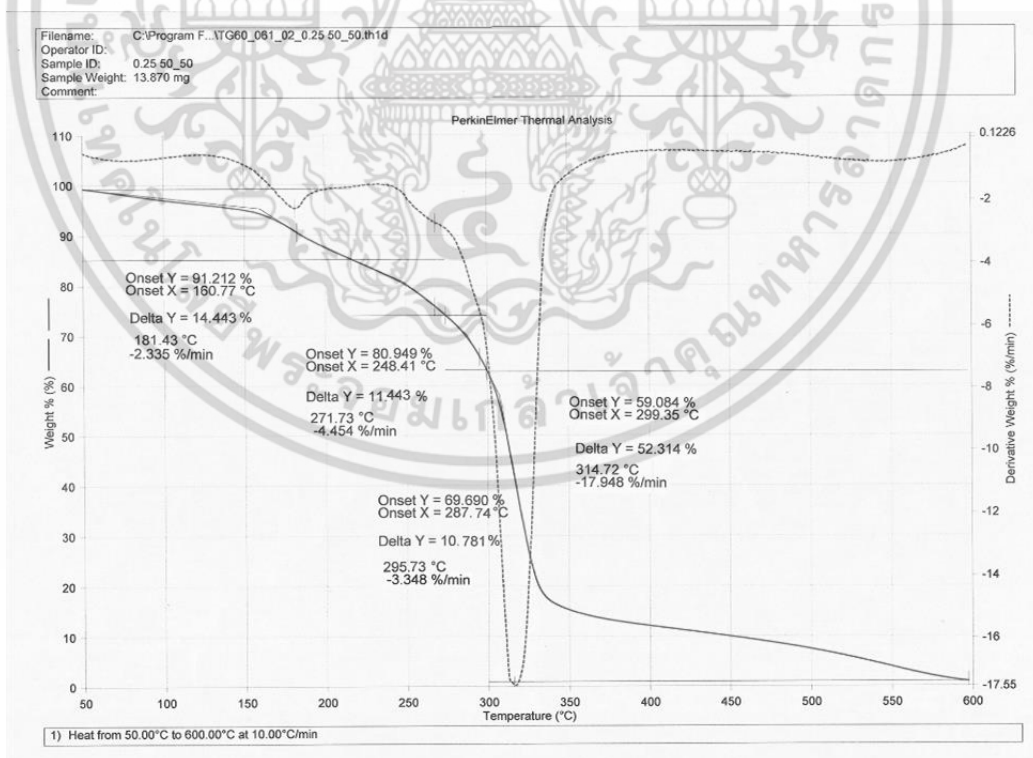


รูปที่ จ.6 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

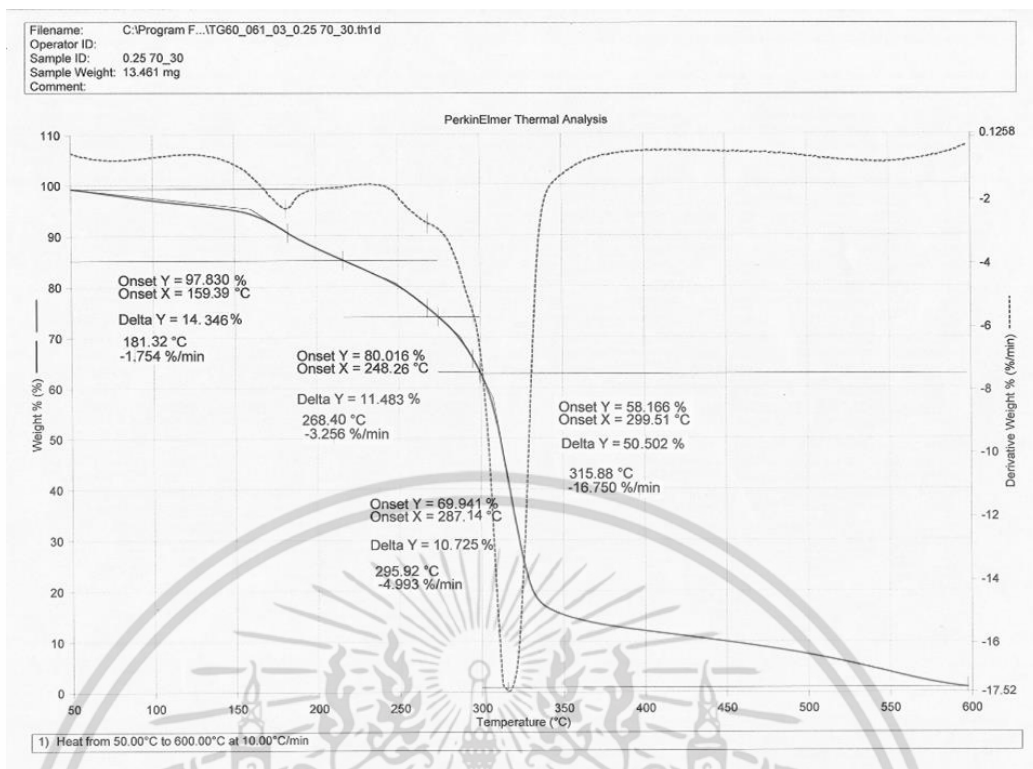


รูปที่ จ.7 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS30

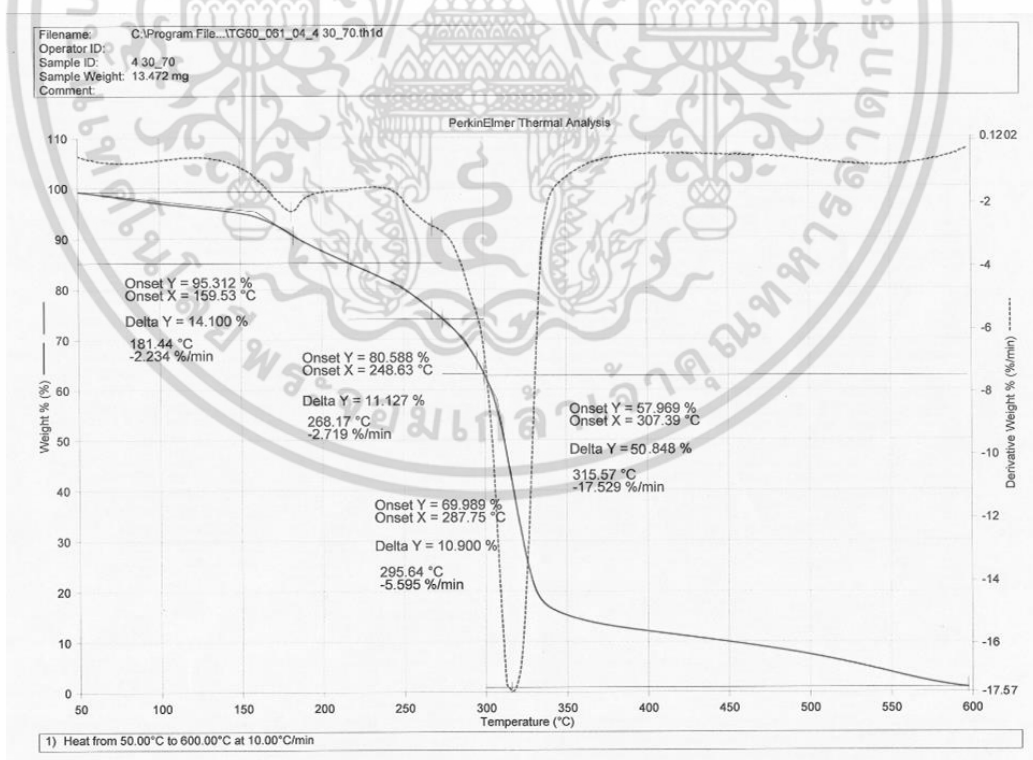


รูปที่ จ.8 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 0.25TPCAS50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

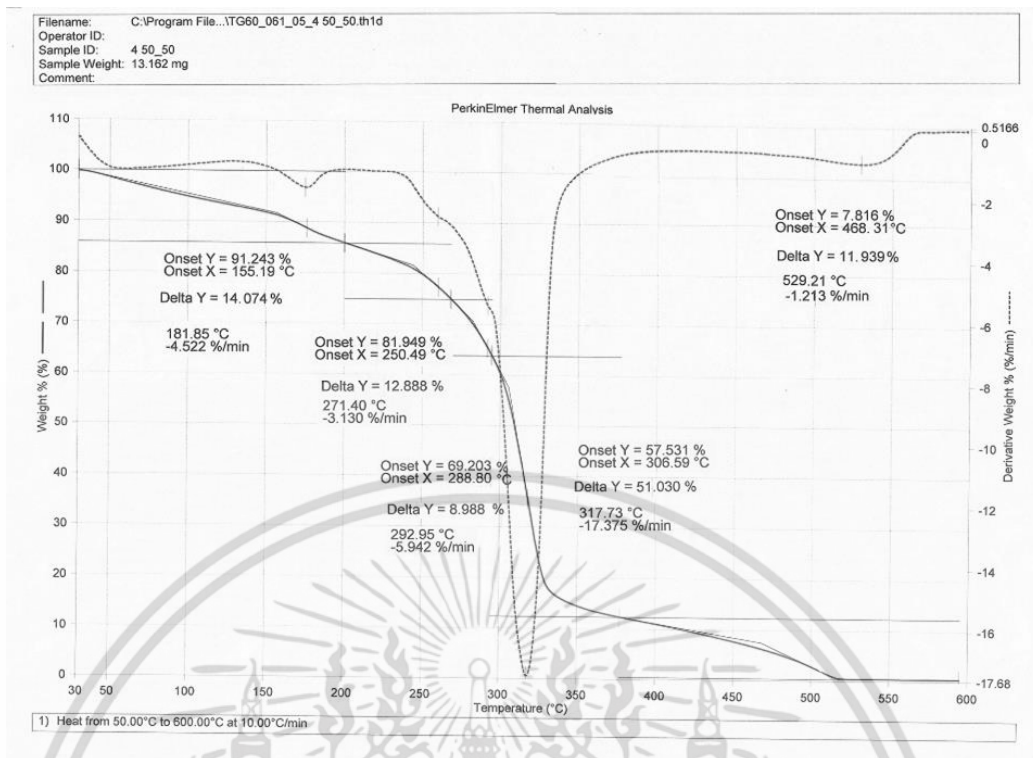


รูปที่ จ.9 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อสูตร 0.25TPCAS70

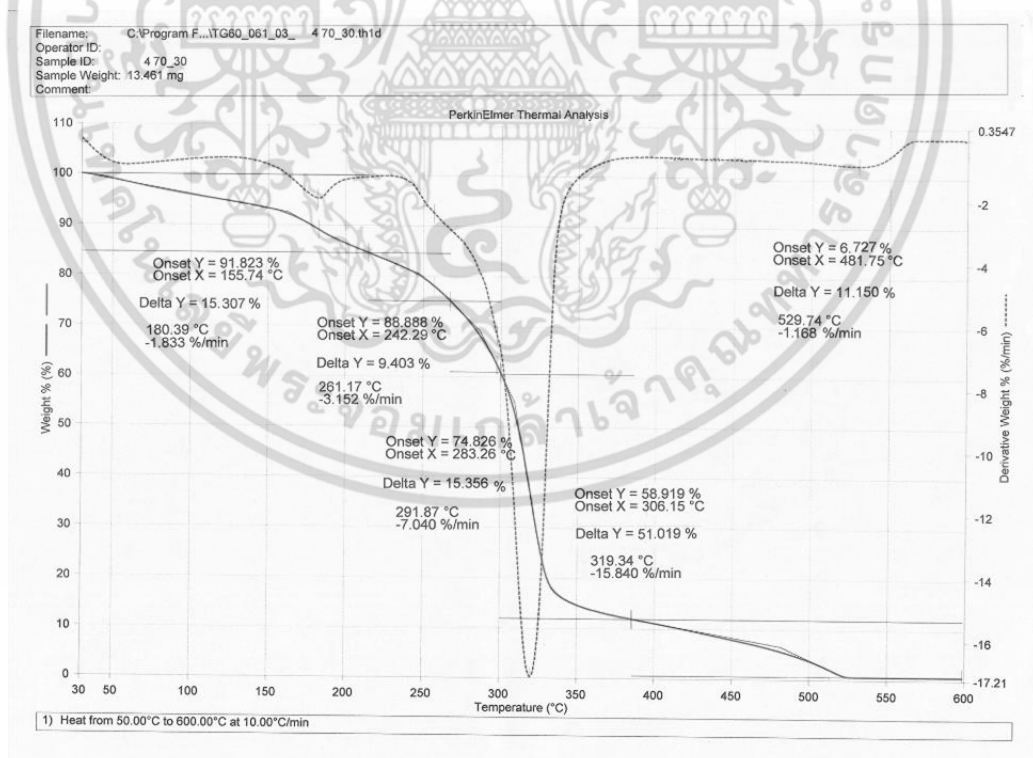


รูปที่ จ.10 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อสูตร 4TPCAS30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



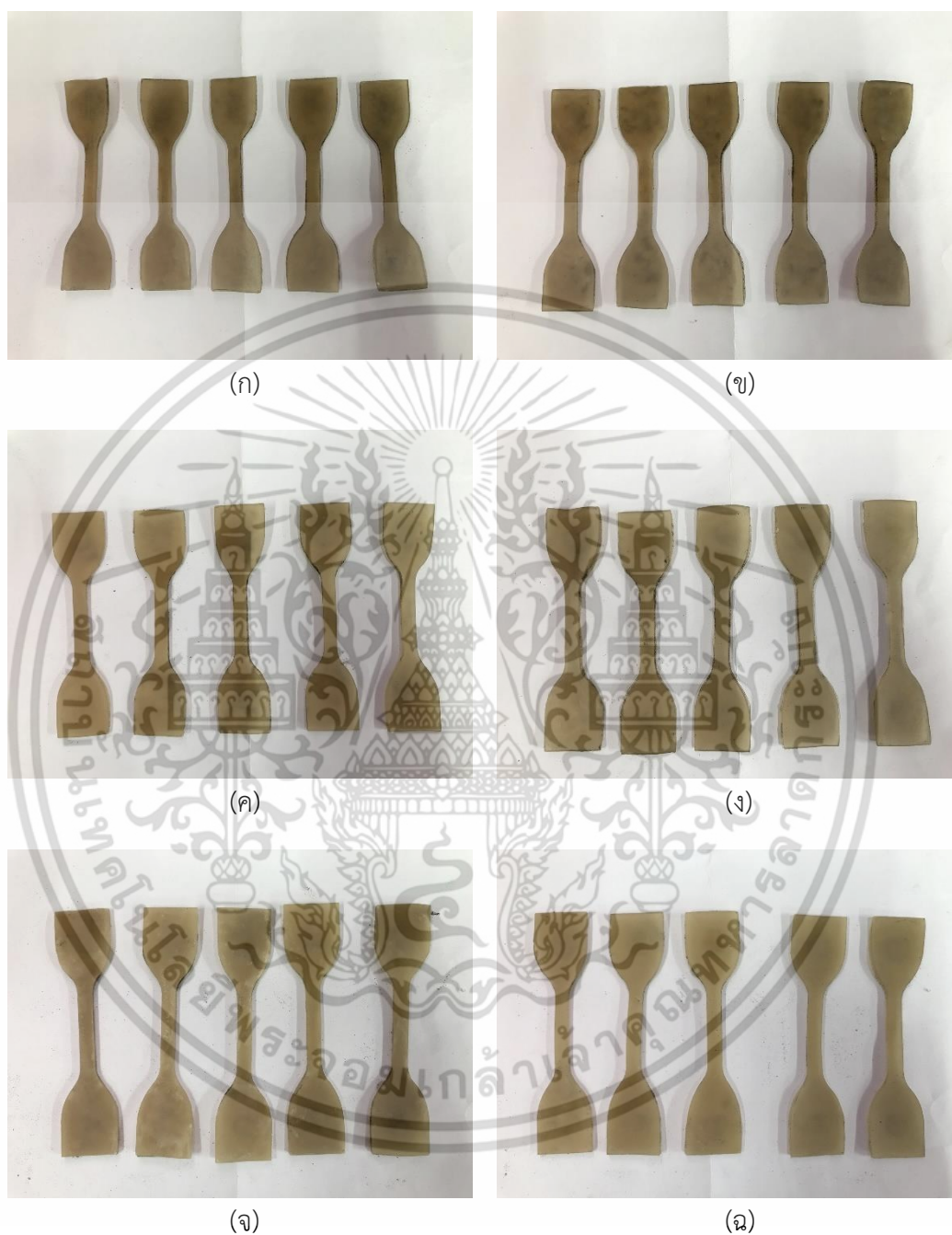
รูปที่ จ.11 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS50



รูปที่ จ.12 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งท้าวยายม่อมสูตร 4TPCAS70

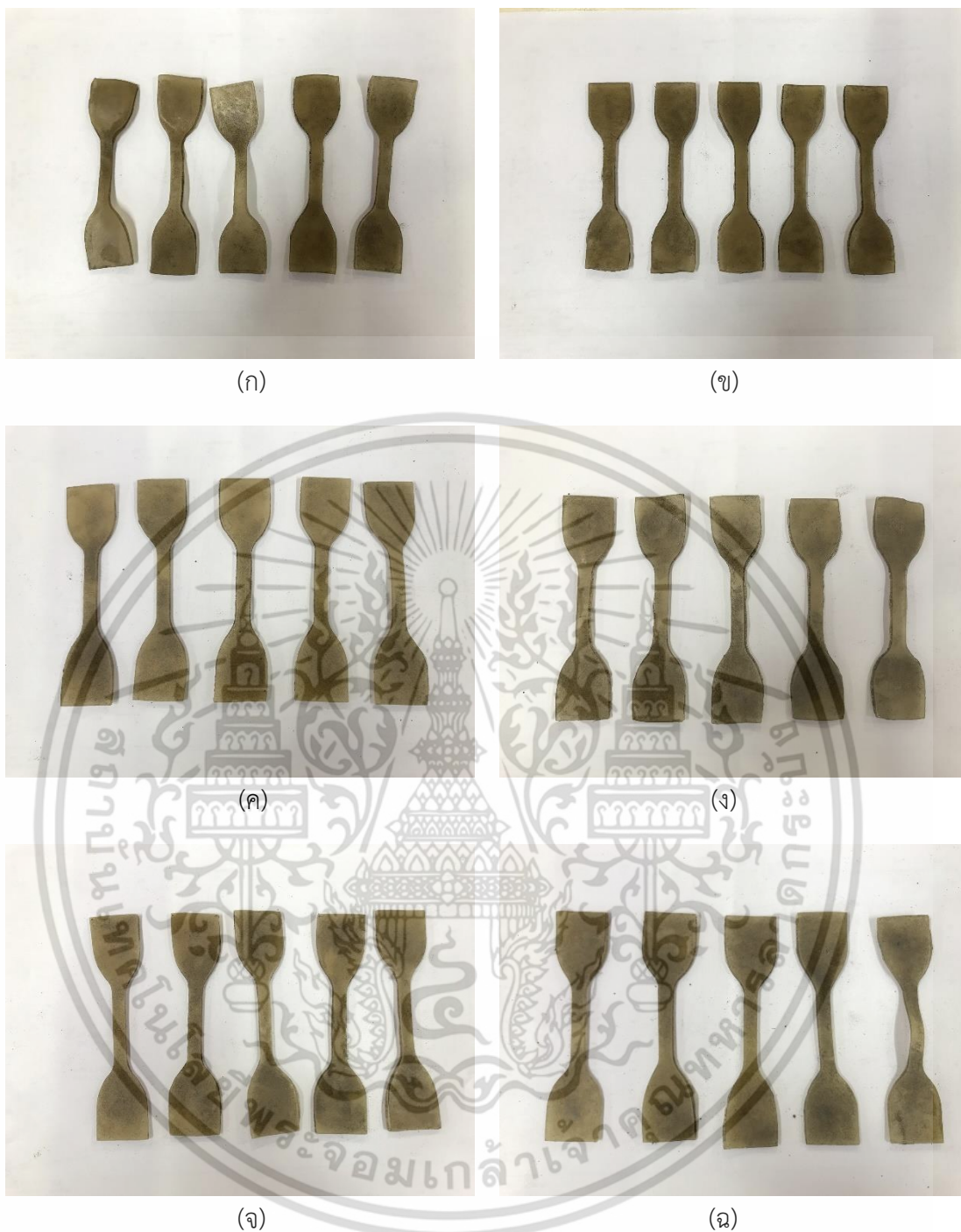
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ



**รูปที่ ฉ.1** ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน (ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS (ค) 0.5TPCAS (ง) 1TPCAS (จ) 2TPCAS และ (ฉ) 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๒ ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน (ก) 0TPCAS (ข) 0.25TPCAS (ค) 0.5TPCAS (ง) 1TPCAS (จ) 2TPCAS และ (ฉ) 4TPCAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ๓.3** ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน (ก) 0.25TPCAS30 (ข) 0.25TPCAS50 (ค) 0.25TPCAS70 (ง) 4TPCAS30 (จ) 4TPCAS50 และ (ฉ) 4TPCAS70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๔.4 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน (ก) 0.25TPCAS30 (ข) 0.25TPCAS50 (ค) 0.25TPCAS70 (ง) 4TPCAS30 (จ) 4TPCAS50 และ (ฉ) 4TPCAS70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งทำวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน

วัน	สูตร	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	0TPCAS	12.27±0.23	258.18±2.26	6.29±0.30
	0.25TPCAS	11.80±0.35	244.02±5.63	6.46±0.16
	0.5TPCAS	10.60±0.40	241.48±2.06	6.58±0.17
	1TPCAS	6.90±0.20	169.01±0.88	6.82±0.33
	2TPCAS	6.64±0.49	162.00±3.16	7.20±0.19
	4TPCAS	5.80±0.41	159.23±1.31	7.40±0.24
	0.25TPCAS30	12.11±0.31	254.98±4.98	6.30±0.28
	0.25TPCAS50	12.02±0.25	252.23±3.99	6.35±0.21
	0.25TPCAS70	11.99±0.30	248.35±5.29	6.39±0.27
	4TPCAS30	11.84±0.31	240.34±3.68	6.69±0.24
	4TPCAS50	9.61±0.22	210.77±2.98	6.92±0.30
	4TPCAS70	6.93±0.21	189.91±3.81	7.31±0.21
5	0TPCAS	10.04±0.22	199.78±3.31	4.98±0.25
	0.25TPCAS	10.09±0.10	201.42±0.99	5.29±0.15
	0.5TPCAS	9.32±0.10	204.56±1.09	5.77±0.05
	1TPCAS	6.20±0.15	147.09±3.77	6.19±0.11
	2TPCAS	6.01±0.08	142.66±2.98	6.65±0.07
	4TPCAS	5.48±0.07	154.91±3.78	6.92±0.10
	0.25TPCAS30	10.12±0.35	199.85±3.16	4.98±0.17
	0.25TPCAS50	10.05±0.40	198.72±2.17	5.13±0.36
	0.25TPCAS70	10.13±0.20	200.34±1.33	5.20±0.23
	4TPCAS30	10.01±0.14	197.51±1.39	5.62±0.15
	4TPCAS50	8.47±0.23	185.46±3.40	6.03±0.29
	4TPCAS70	6.38±0.13	175.89±2.64	6.70±0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งทำวยายม่อมสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน (ต่อ)

วัน	สูตร	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
10	0TPCAS	7.01±0.20	146.88±3.41	3.73±0.11
	0.25TPCAS	8.10±0.22	156.11±4.22	4.30±0.24
	0.5TPCAS	7.96±0.24	183.35±2.45	4.82±0.05
	1TPCAS	5.58±0.34	134.40±3.73	5.46±0.17
	2TPCAS	5.77±0.17	137.94±2.97	6.31±0.15
	4TPCAS	5.20±0.15	150.63±4.75	6.72±0.19
	0.25TPCAS30	7.28±0.33	149.96±4.31	3.94±0.23
	0.25TPCAS50	7.88±0.26	150.22±3.41	4.02±0.12
	0.25TPCAS70	7.90±0.08	157.74±3.33	4.18±0.42
	4TPCAS30	7.92±0.20	158.55±4.85	4.56±0.28
	4TPCAS50	7.34±0.42	163.03±4.24	5.10±0.43
	4TPCAS70	5.73±0.38	164.22±3.59	6.36±0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวอัจฉิมา สุทธิจิิต
วัน เดือน ปีเกิด	15 กันยายน 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 110 ถนนสันติภาพ แขวงป้อมปราบฯ เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพฯ 10100
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 2.92 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Suthichujit, A. and Prachayawarakorn, J. 2016. “Properties of thermoplastic from arrowroot starch crosslinked by glutaraldehyde.” 126-129. In <i>International Polymer Conference of Thailand 2016 (PCT-6)</i> . Bangkok.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้