

สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยง  
ด้วยกรดซิตริก และใช้อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

PROPERTIES OF BIODEGRADABLE RICE STARCH FILMS  
CROSS-LINKED BY CITRIC ACID FILLED WITH METAL OXIDE  
PARTICLES AS ANTIBACTERIAL AGENTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2018-SC-M-014-015

สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยง  
ด้วยกรดซิตริก และใช้อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

PROPERTIES OF BIODEGRADABLE RICE STARCH FILMS  
CROSS-LINKED BY CITRIC ACID FILLED WITH METAL OXIDE  
PARTICLES AS ANTIBACTERIAL AGENTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562

KMITL-2018-SC-M-014-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF BIODEGRADABLE RICE STARCH FILMS  
CROSS-LINKED BY CITRIC ACID FILLED WITH METAL OXIDE  
PARTICLES AS ANTIBACTERIAL AGENTS



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

2019

KMITL-2018-SC-M-014-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และใช้อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย  
Properties of biodegradable rice starch films cross-linked by citric acid filled with metal oxide particles as antibacterial agents

ชื่อนักศึกษา นายกิตติชัย ศรีสำแดง  
รหัสประจำตัว 59605038  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย กรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ กรรมการ	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
วันที่ 8 เดือน MA.....พ.ศ. 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้า เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และใช้นุภาคโลหะออกไซด์เป็น สารต้านเชื้อแบคทีเรีย
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติชัย ศรีสำแดง
รหัสประจำตัว	59605038
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิด โดยศึกษาผลของปริมาณของกรดซิตริกที่ใช้ที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก จากการเติมกรดซิตริกลงไป พบว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่แสดงการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน ซึ่งเป็นพิกแสดงการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและผลจากการเติมกรดซิตริกยังส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก การบวมตัว การดูดซับความชื้น และการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แต่จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของกรดที่ใส่มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% ลงในฟิล์มแป้งที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% พบว่าเกิดพิกใหม่เป็นพิกแสดงลักษณะการสั่นของอนุภาคโลหะออกไซด์ในช่วง  $470-680\text{ cm}^{-1}$  โดยจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ดังกล่าวส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการบวมตัว การซึมผ่านของไอน้ำ และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มลดต่ำลง จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าการเติมกรดซิตริกร่วมกับอนุภาคโลหะออกไซด์ยังคงส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการย่อยสลายได้ นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีความขาวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการทดลองความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียต่อ *E.coli* and *S.aureus* พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อเชื้อมากที่สุด

**คำสำคัญ :** การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กรดซิตริก แคลเซียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แป้งข้าวเจ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Properties of biodegradable rice starch films cross-linked by citric acid filled with metal oxide particles as antibacterial agents
Student Name	Kittichai Sornsumdang
Student ID	59605038
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn
Thesis Co-advisor	Asst. Prof. Dr. Panpailin Seeharaj

### Abstract

This research focused on preparation and properties of biodegradable rice starch film crosslinked by citric acid and modified by metal oxides. Different contents of citric acid, i.e. 0, 5, 10, 15 and 20% were varied. The addition of citric acid caused the esterification in the starch film as observed by FTIR spectra indicating of crosslinking reaction. Moreover, the citric acid crosslinked starch films showed the decrease of crystallinity, swelling, water absorption and water vapor permeability. Additionally, elongation of the citric acid crosslinked starch films was significantly increased, especially at high contents of citric acid. Besides, zinc oxide, titanium dioxide and calcium oxide at different concentrations, i.e. 0, 1, 3 and 5% were also incorporated into the 20% citric acid crosslinked starch film. It was found from FTIR that the new wavenumbers in the range of 470-680  $\text{cm}^{-1}$  were observed after adding metal oxides into the crosslinked films also caused the increase of crystallinity, thermal decomposition temperature, stress and modulus. However, swelling, water vapor permeability and strain decreased. For biodegradation test, citric acid and metal oxide still led to the biodegradability of the increase of crosslinked films. Furthermore, the increase of metal oxide contents resulted in whiteness index of the films. Finally, 5% of zinc oxide caused the greatest anti-bacterial activity towards *E.coli* and *S.aureus*.

**Keywords :** Biodegradable, Citric acid, Calcium oxide, Zinc oxide, Titanium dioxide, Rice starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้บรรลุผลสำเร็จได้ก็เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจน คำแนะนำจากบุคคลต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดียิ่งกับตัวข้าพเจ้า ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และการดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้ามาโดยตลอดในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ คณะกรรมการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความ ถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ คุณณัฐพล ไกรธรรม และคุณสาคร สอนพงษ์ นักเคมี และเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการศึกษาระดับปริญญาตรี 1 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกเรื่องสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาเคมีทุกคน ที่เป็น กำลังใจสำคัญ คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่มีส่วนช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นายกิตติชัย ทรสำแดง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics).....	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ .....	4
2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ .....	5
2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics).....	5
2.1.3.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.1.3.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	8
2.1.3.3 ผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	9
2.1.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	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
2.2.2.3 สารตัวกลาง (Intermediate materials).....	15
2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง .....	16
2.2.3 ขนาด รูปร่าง และโครงสร้างผลึกของแป้ง .....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของแป้ง .....	17
2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย .....	17
2.2.4.2 การเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้ง (Gelatinization).....	18
2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation).....	20
2.2.4.4 ความหนืด .....	21
2.2.4.5 ความชื้น .....	21
2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch).....	21
2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร.....	21
2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification).....	21
2.3.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification).....	22
2.3.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ.....	23
2.4 फिल्मจากแป้ง.....	23
2.4.1 สมบัติของ फिल्मจากแป้ง.....	23
2.4.2 การเกิด फिल्म.....	24
2.4.3 การขึ้นรูป फिल्म.....	24
2.5 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch).....	24
2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้งข้าวเจ้า.....	24
2.5.2 สมบัติของแป้งข้าวเจ้า.....	25
2.5.3 การผลิตแป้งจากข้าวเจ้า.....	26
2.6 กรดซิตริก (Citric acid).....	26
2.7 วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposites).....	28
2.7.1 การแบ่งชนิดของวัสดุประกอบ (Classification of composites).....	28
2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุประกอบ.....	29
2.7.3 การเตรียมวัสดุประกอบนาโน.....	29
2.7.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO).....	30
2.7.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO <sub>2</sub> ).....	32
2.7.6 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO).....	34
2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแบคทีเรีย.....	35
2.8.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย.....	35
2.8.1.1 ความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรีย.....	36
2.8.1.2 <i>Staphylococcus aureus</i> .....	37
2.8.1.3 <i>Escherichia coli</i> .....	37
2.9 กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	37
2.10 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	38
2.10.1 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของพลาสติไซเซอร์.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 กลีเซอรอล (Glycerol).....	38
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>44</b>
3.1 สารเคมี.....	44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.3 การทดลอง.....	47
3.3.1 คำโครงการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.3.2 การเตรียมวัสดุประกอบจากแป้งข้าวเจ้า.....	48
3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	49
3.4.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR).....	49
3.4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	49
3.4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	50
3.4.4 การทดสอบการบวมตัว (Swelling).....	50
3.4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption).....	50
3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....	51
3.4.7 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA).....	51
3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	52
3.4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	53
3.4.10 การวัดสี (Color measurement).....	53
3.4.11 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial test).....	54
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....</b>	<b>55</b>
4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	57
4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	57
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน.....	59
4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	61
4.2.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	61
4.2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่โลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	62
4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	65
4.3.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	65
4.3.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบสมบัติการบวมตัว (Swelling).....	70
4.4.1 สมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	70
4.4.2 สมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่อนุภาค โลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	71
4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption) .....	73
4.5.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก..	73
4.5.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและ เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ .....	74
4.6 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability) .....	76
4.6.1 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ..	76
4.6.2 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มี การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ.....	77
4.7 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermo- gravimetric analysis, TGA).....	78
4.7.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	78
4.7.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ.....	80
4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	84
4.8.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	84
4.8.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติม อนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ.....	85
4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	87
4.9.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ภายหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน .....	87
4.9.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการ เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน.....	90
4.10 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurements).....	93
4.10.1 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรด ซิตริก .....	93
4.10.2 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรด ซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณต่างกัน .....	94
4.11 การทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial activity)...	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	99
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	101
เอกสารอ้างอิง .....	102
ภาคผนวก .....	107
ภาคผนวก ก .....	108
ภาคผนวก ข .....	109
ภาคผนวก ค .....	110
ภาคผนวก ง .....	112
ภาคผนวก จ .....	120
ประวัติผู้เขียน .....	127



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	9
2.2	10
2.3	13
2.4	16
2.5	18
2.6	18
2.7	24
2.8	25
2.9	26
2.10	31
2.11	31
2.12	33
2.13	33
2.14	34
2.15	34
2.16	36
2.17	39
2.18	40
3.1	45
3.2	45
3.3	49
4.1	55
4.2	57
4.3	61
4.4	64
4.5	76
4.6	77
4.7	79
4.8	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าสูตรต่าง ๆ หลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน	89
4.10	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าสูตรต่าง ๆ หลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน.....	92
4.11	ค่าการวัดสีของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ....	93
4.12	ค่าการวัดสีของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	94
4.13	แสดงระยะในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	95
ก.1	พื้นที่ใต้กราฟของพีคจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ...	108
ข.1	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง.....	109
ข.2	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง.....	109
ค.1	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นระยะเวลา 14 วัน.....	110
ค.2	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นระยะเวลา 17 ถึง 22 วัน.....	111
จ.1	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินที่เวลา 5 และ 10 วัน.....	120
จ.2	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่างกัน ก่อนและหลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน.....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2	ชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ ก่อนทำการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	123
จ.3	ชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าและฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน.....	124
จ.4	ชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน.....	125
จ.5	ชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าและฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน.....	126
จ.6	ชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน.....	127



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในระยะเวลา 6 เดือน.....	6
2.2 สัญลักษณ์ขององค์กรต่าง ๆ ที่ใช้บ่งบอกผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ .....	7
2.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการย่อยสลาย.....	7
2.4 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	8
2.5 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่าง ๆ.....	12
2.6 โครงสร้างของอะไมโลส .....	14
2.7 โครงสร้างบิตเกลียวของอะไมโลส.....	14
2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน .....	15
2.9 โครงสร้างทางผลึกชนิด A และ B และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างทางผลึกแบบ A, B และ Vh.....	17
2.10 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม.....	19
2.11 การแสดงการเกิดเจลลาที่โนเซชันของแป้ง .....	20
2.12 โครงสร้างของกรดซิตริก โมโนไฮเดรท (Citric acid monohydrate).....	26
2.13 กรดซิตริกในรูปผลึกโมโนไฮเดรท (Monohydrate).....	27
2.14 ชนิดของวัสดุประกอบแป้งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง.....	28
2.15 โครงสร้างแบบ Hexagonal wurtzite ของซิงค์ออกไซด์.....	30
2.16 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์.....	32
2.17 รูปร่างและการเรียงตัวของเซลล์แบคทีเรียแบบทรงกลม แบบแท่ง และแบบเกลียว.....	35
2.18 องค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ.....	36
2.19 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล .....	38
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	50
3.3 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน.....	52
3.3 เครื่องทดสอบเนกประสงค์.....	52
4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เติมกรดซิตริก และอนุภาค- โลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ .....	56
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ.....	58
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์- ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน.....	59
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน .....	59

4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกและใส่แคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน .....	60
4.6 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ	61
4.7 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ .....	63
4.8 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณต่างกัน .....	65
4.9 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งขาวเจ้าและฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของแบ่งที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	66
4.10 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกและเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10,000 เท่า.....	67
4.11 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกและเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10000 เท่า	68
4.12 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกและเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10,000 .....	69
4.13 เฟอร์เซนต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณต่าง ๆ	70
4.14 เฟอร์เซนต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	71
4.15 เฟอร์เซนต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	72
4.16 เฟอร์เซนต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	72
4.17 เฟอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณต่าง ๆ	73
4.18 เฟอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน .....	74
4.19 เฟอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน .....	75
4.20 เฟอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน .....	75
4.21 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณต่างกัน .....	78
4.22 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ .....	80
4.23 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแบ่งขาวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.24	เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	82
4.25	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ.....	84
4.26	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	85
4.27	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	86
4.28	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....	86
4.29	ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	88
4.30	มอดูลัสของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	88
4.31	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	89
4.32	ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก.....	90
4.33	มอดูลัสของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก.....	91
4.34	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก.....	91
4.35	ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าและฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% ต่อแบคทีเรียแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> และแบคทีเรียแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> .....	96
4.36	ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> และแบคทีเรียแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> .....	96
4.37	ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> และแบคทีเรียแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> .....	97
4.38	ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> และแบคทีเรียแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> .....	97
ง.1	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุดต่างกัน.....	112
ง.2	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C.....	113
ง.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C.....	114
ง.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C .....	114
ง.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิใน การทดสอบ 600 °C.....	115
ง.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิใน การทดสอบ 600 °C.....	115
ง.8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิใน การทดสอบ 600 °C.....	116
ง.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้ อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C .....	116
ง.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้ อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C.....	117
ง.11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้ อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C .....	117
ง.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิ ในการทดสอบ 600 °C.....	118
ง.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิ ในการทดสอบ 600 °C.....	118
ง.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิ ในการทดสอบ 600 °C.....	119
จ.1 ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะ ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ก่อนทำการย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารมีอัตราการเจริญเติบโตอย่างมาก รวมถึงจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ความต้องการในการใช้บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ในการบรรจุอาหารจึงมีมากขึ้นไปด้วย เช่น ถุงใส่ของ ถาด ถ้วย และฟิล์มห่ออาหาร ซึ่งบรรจุภัณฑ์เหล่านี้เป็นพลาสติกที่ผลิตมาจากปิโตรเลียม (Petroleum-based packaging) มีสมบัติเด่นที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบา สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ดี ข้อเสียที่สำคัญที่สุดของพลาสติก คือ เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ อีกทั้งยังผลิตมาจากทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น

จากปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้ในระยะหลัง ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มาจากธรรมชาติ (Bio-based plastics) ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) โดยที่นิยมมากที่สุด คือ แป้ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ มีความสามารถในการย่อยสลายได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาถูก ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง มันเทศ มันฝรั่ง ข้าวโพด ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว เป็นต้น โดยพืชผลทางการเกษตรเหล่านี้จัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นใหม่หรือทดแทนได้ (Renewable resource) อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหรือฟองตัวในแม่พิมพ์ได้เมื่ออยู่ในสภาวะสารละลายและถูกให้ความร้อน แต่ข้อจำกัดหลักของแป้ง คือ มีความว่องไวต่อความชื้นสูงและมีสมบัติเชิงกลต่ำ จึงได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำวัสดุชนิดอื่นมาปรับปรุงสมบัติด้วยข้างต้นอยู่มากมาย เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติและการใช้งานที่เทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี [1]

แป้งข้าวหรือแป้งข้าวเจ้า (Rice starch) เป็นแป้งที่ผลิตมาจากข้าวเจ้า (*Oryza sativa L.*) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งเล็ก และมีปริมาณอะไมโลสสูง ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้แป้งข้าวเจ้ายังเป็นพืชที่หาได้ง่าย เนื่องจากเป็นที่นิยมปลูกมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากให้ความกรอบแข็ง เปราะ และสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ [1-2] แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลักของแป้งดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงมีการค้นคว้างานวิจัยที่นำวัสดุทางชีวภาพอื่น ๆ ที่มุ่งเน้นด้านการปรับปรุงสมบัติด้วยจากแป้งนี้ เพื่อให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างไม่มีข้อจำกัด โดยวิธีที่นิยมที่สุด คือ การเชื่อมโยงแป้ง โดยใช้สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) เช่น กลูตารัลดีไฮด์ สารในกลุ่มของพอลิคาร์บอกซิลิก แอซิด รวมถึงเกลือจากกรดบางชนิด ซึ่งการใช้สารเชื่อมโยง จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้ง ซึ่งแป้งที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว มีความเหนียวขณะอยู่ในสภาพเป็นสารละลายร้อนสูงขึ้น มีเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลในเกณฑ์ที่ดี [3-5]

กรดซิตริก (Citric acid) เป็นกรดอ่อนที่โครงสร้างประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุล 3 หมู่ ใช้ประโยชน์ในการถนอมอาหาร ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยจากงานวิจัย [3-5] พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลจากการนำแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาปรับปรุงด้วยกรดซิตริกยังมีค่าไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังไม่สามารถต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ได้ แนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาข้างต้น คือ การนำวัสดุอนินทรีย์ที่มีสมบัติเชิงกลและสัมประสิทธิ์ทางความร้อนสูงมาช่วยเสริมแรงและมีความสามารถในการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ได้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานหลากหลายประเภทมากยิ่งขึ้น

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นวัสดุอนินทรีย์ในกลุ่มโลหะออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ละลายน้ำได้น้อย มีขนาดอนุภาคเล็ก เรียงตัวแบบหนาแน่นจึงทำให้ทึบแสง มีสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีค่าความจุความร้อน การนำความร้อน และจุดหลอมเหลวในเกณฑ์ที่สูงและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ เป็นต้น [6]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) เป็นวัสดุอนินทรีย์อีกชนิดที่อยู่ในกลุ่มโลหะออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ความเป็นพิษต่ำ มีขนาดอนุภาคเล็ก มีความทึบแสงมากกว่าซิงค์ออกไซด์ แต่มีสมบัติบางประการคล้ายคลึงกัน เช่น สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล รวมถึงสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ด้วย โดยทั่วไปมักใช้ในอุตสาหกรรมงานเคลือบ สีทาบ้าน เป็นต้น [6]

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) เป็นวัสดุอนินทรีย์ในกลุ่มโลหะออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง ความเป็นพิษต่ำ สังเคราะห์ได้ง่าย ราคาถูก มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และสามารถใช้เป็นสารต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ได้ [6]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มห่ออาหารย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วที่ทำกรดซิตริกที่ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง 100 กรัม [3] ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮดรอกซี 30 เปอร์เซ็นต์และใช้น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยงานวิจัยทำการศึกษาผลของชนิดของแป้งที่มีผลต่อสมบัติโดยรวมของชิ้นงาน จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีด (Screw extrusion) จากผลการทดลอง พบว่าการใส่กรดซิตริกทำให้หมู่คาร์บอกซิลิกจากกรดเกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลจากโมเลกุลแป้งผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และผลจากการศึกษาเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นและค่าการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าการใส่สารเชื่อมโยนกรดซิตริกมีผลทำให้ปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่วัดได้มีค่าลดลง สำหรับในด้านของการศึกษาชนิดของแป้งพบว่าชิ้นงานจากแป้งข้าวเจ้ามีค่าความเป็นผลึก ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าชิ้นงานจากแป้งถั่ว แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของแป้งข้าวเจ้าจะมีแนวโน้มต่ำกว่า

และจากงานวิจัยของจินตภา เต็มสิคราม และคณะ [4] ได้มีการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลกติก และกรดมาลิก ที่ปริมาณ 0, 2, 5, 10 และ 20% ของน้ำหนักของแป้ง จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อ จากผลการทดลอง พบว่าพบหมู่ฟังก์ชันใหม่เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1737 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากการเชื่อมโยง ผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดแต่ละชนิดส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำ ค่าการบวมตัว ความเป็นผลึก ค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยึดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากชนิดของกรด พบว่าสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมีสมบัติโดยรวมดีที่สุด รองลงมา คือ กรดแลกติก และกรดมาลิก ตามลำดับ

นอกจากนี้งานวิจัยของ Akhavan, A. และคณะ [7] ได้ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water uptake) และสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ของซิงค์ออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโนผสมกับพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมจากแป้งมันฝรั่งและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol, PVA) โดยใช้กลีเซอรอล 27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นพลาสติกไซเซอร์ และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนของผสมแล้วขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อขึ้นรูป จากผลการทดลอง พบว่าซิงค์ออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโน 0.1–1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซับน้ำลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 190–158 เปอร์เซ็นต์และสามารถช่วยต้านทานเชื้อจุลินทรีย์แบคทีเรียชนิด *E.coli* ได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 71.2–94.4 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าโดยศึกษาผลของการใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมโยง และใช้นุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและเป็นสารต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ (Biodegradable rice starch active food packaging) จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่เตรียมได้ เช่น การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน การบวมตัว การดูดซับความชื้น สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์สี สมบัติการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ และสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดิน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า
- 2) เพื่อศึกษาผลของกรดซิตริก ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าและกรดซิตริก
- 2) เพื่อศึกษาผลของกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับความชื้น การบวมตัว สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ โครงสร้างผลึกและโมเลกุล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ และสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เตรียมได้
- 3) เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้
- 4) ตรวจสอบวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับความชื้น การบวมตัว สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ โครงสร้างผลึกและโมเลกุล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ และสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และอนุภาคโลหะออกไซด์ สามารถนำไปใช้ทดแทนฟิล์มพลาสติกจากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายได้ยาก และสามารถนำไปต่อยอดทางด้านอุตสาหกรรมอาหารได้มากยิ่งขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในโลกปัจจุบันปัญหาของการใช้พลาสติกเริ่มมีผู้ให้ความสนใจมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะพลาสติกส่วนใหญ่สามารถทนต่อการย่อยสลายสูง ต้องใช้ระยะเวลาหลายร้อยปี อีกทั้งยังผลิตมาจากปิโตรเลียมเป็นหลัก ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นมาทดแทนได้อย่างฉับพลัน โดยหากทำลายทิ้งด้วยการเผาก็จะต้องใช้พลังงานสูง ได้ก๊าซที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างมาก จึงได้เกิดแนวความคิดที่นำพลาสติกชนิดอื่นที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาทดแทน ซึ่งนอกจากผลิตมาจากทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้แล้ว ยังมีราคาถูกและไม่มีความเป็นพิษ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมในอุตสาหกรรมอาหารในอนาคตได้อย่างถาวรอีกด้วย [1, 7]

### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics)

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

จากความต้องการในการใช้พลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นร่วมกับคุณสมบัติที่มีความคงทนมาก และไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกเป็นจำนวนมาก และหากต้องการกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ด้วยวิธีการเผาก็จะส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของมลพิษไปในอากาศ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นผลิตพลาสติกรูปแบบใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามที่กล่าวมาข้างต้น โดยพลาสติกรูปแบบใหม่ที่กล่าวถึงนั้นมีชื่อเรียกว่า พลาสติกย่อยสลายได้ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายองค์กรได้ให้คำนิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ไว้มาก เช่น [8-9, 11]

International organization for standardization (ISO) กล่าวว่า พลาสติกย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมา เพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน [4]

American society for testing and materials (ASTM) ก็ได้ให้ความหมายพลาสติกย่อยสลายได้ไว้ คือ พลาสติกย่อยสลายได้ เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ [8]

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)
4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่มักจะถูกเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงไป หรือทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง สามารถแตกหักได้ง่ายภายใต้แสง เช่น มีหมู่คีโตนอยู่ในโครงสร้าง เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสงจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ แต่การย่อยสลายของพลาสติกแบบนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานเฉพาะพลาสติกที่มีการสัมผัสกับแสงโดยตรงเท่านั้น [4, 10]

2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics) พลาสติกที่เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยานี้ มักเป็นพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) โดยมีหลักการสำคัญ คือ เกิดปฏิกิริยาการเติมของออกซิเจนลงโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เมื่อพลาสติกสัมผัสกับออกซิเจน แสงและความร้อน จะทำให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ [4, 10]

3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) เป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับพลาสติกที่มีหมู่เอสเตอร์ (Ester groups) หรือเอไมด์ (Amide groups) อยู่ในโครงสร้าง เช่น แป้ง พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) หรือพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และประเภทที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) [4, 10]

4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ ทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งจะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม โดยการย่อยสลายทางชีวภาพมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โครงสร้างโมเลกุลแตกออก (Depolymerization) มักจะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาตัดสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งแบบเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ โดยตัดพันธะจากปลายสุดก่อนตามลำดับ จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการที่สอง คือ การนำสารประกอบที่ได้จากการย่อยเข้าสู่เซลล์ แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ก๊าซ และชีวมวล (Biomass) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนโตรเจน และน้ำ เป็นต้น [8, 10]

### 2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายเป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้ด้วยจุลินทรีย์และเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้นี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม โดยในปัจจุบัน ตามข้อกำหนดขององค์กรต่าง ๆ ก็ได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไว้ด้วย เช่น [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามข้อกำหนด ISO 472 : 1988 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีบางประการภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีนั้นเป็นผลมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ

ตามข้อกำหนด ASTM D20.96 กล่าวว่า พลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่สามารถถูกตัดพันธะของสายโพลิเมอร์ได้ผ่านทางปฏิกิริยาเคมี ชีวภาพ และกายภาพ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายโครงสร้างของพลาสติก [11]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกเรียกในอีกหลายชื่อ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally degradable plastics, EDP) พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmentally friendly plastics) พลาสติกสีเขียว (Green plastics) เป็นต้น

นอกจากนี้ องค์กรในต่างประเทศหลายๆ องค์กรได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานวิธีการทดสอบและการรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น International organization for standardization (ISO), American society for testing and materials (ASTM), Japanese Industrial Standard (JIS) และ Institute for Standards Research (ISR) เป็นต้น โดยข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพในระดับนานาชาตินั้นมีรายละเอียดที่ใกล้เคียงกัน หากแต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่ององค์ประกอบ และวิธีการทดสอบ [8, 11]

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือสารชีวมวล ภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงสภาพดินได้ โดยไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อผ่านการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดแล้วจะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น [11]



รูปที่ 2.1 ลักษณะการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในระยะเวลา 6 เดือน [11]

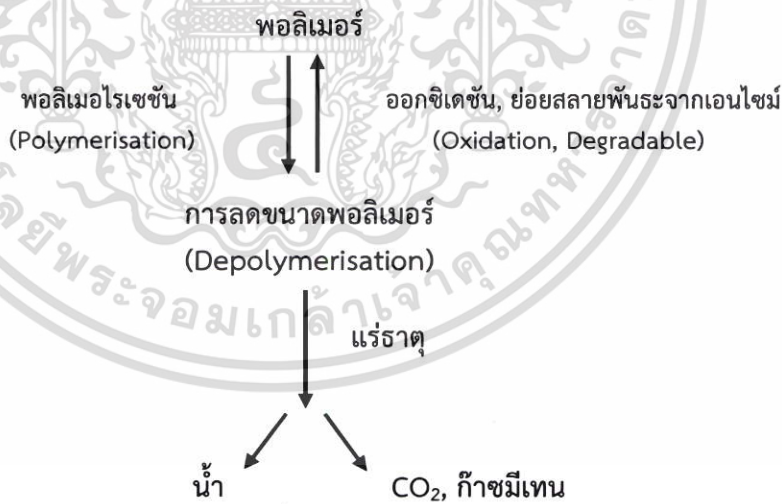
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ขององค์กรต่าง ๆ ที่ใช้บังคับผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ [4]

### 2.1.3.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตรถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ ตามลำดับ จากนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จะผ่านการปรับปรุงสมบัติและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เมื่อหมดอายุการใช้งานหรือไม่เป็นที่ต้องการแล้วการนำไปทิ้งในสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้พลาสติกเหล่านี้ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช วงเวียนเป็นวัฏจักรแบบนี้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [10]



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการย่อยสลาย [1, 8]

โดยการเกิดการย่อยสลายส่วนใหญ่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์ และสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และอุณหภูมิ เป็นต้น [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [11]

### 2.1.3.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานหลากหลายด้าน เช่น

#### 1. ด้านบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

สำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สะดวกในการใช้งาน ราคาถูก และสามารถทดแทนการใช้วัสดุอื่น ๆ เช่น แก้ว กระดาษ โลหะ หรือไม้ ได้อย่างดี ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีส่วนชยะอยู่ในปริมาณสูงและยังไม่ได้รับความนิยมกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส [13]

#### 2. ด้านการแพทย์และสาธารณสุข

ในด้านการแพทย์และสาธารณสุขนั้น นิยมใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อการผ่าตัด และเย็บแผล ซึ่งต้องมีความสามารถย่อยสลายหรือละลายได้เมื่อสัมผัสกับของเหลวภายในร่างกายภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง รวมถึงเทคโนโลยีการบรรจุลงในแคปซูลพลาสติกที่ละลายได้ซึ่งกำลังได้รับความนิยมสูง เนื่องจากสามารถปล่อยตัวยาเข้าสู่กระแสโลหิตในอัตราที่ควบคุมได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประเภทสกรูและแผ่นตามกระดูก เมื่อได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายจะสามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้ไม่ต้องผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย ช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดความเสี่ยงจากการผ่าตัดซ้ำลดลง [13]

#### 3. ฟิล์มคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย หรือสารเคมีสำหรับการเกษตรต่าง ๆ เป็นต้น [13]

### 2.1.3.3 ผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม 2 ทิศทาง คือ

#### 1. ผลกระทบด้านบวก

- ผลดีที่จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช เกิดการหมุนเวียนของธาตุเป็นวัฏจักร

- ลดเนื้อที่ใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่ย่อยสลายได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ นอกจากนี้การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันก็จะเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่ใช้งานในหลุมฝังกลบ ซึ่งอาจสูงถึง 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

- สามารถลดพลังงานในการสังเคราะห์หรือการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้น้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมีทั่วไป

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกชนิดต่าง ๆ [10]

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

- พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเคมี ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่พลาสติกที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในกระบวนการเติบโตของพืชที่ปลูกขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วย [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพลาสติกชนิดต่าง ๆ [10]

ชนิดของพลาสติก	ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kg CO <sub>2</sub> eq./kg)
PCL	530
LDPE	500
HDPE	490
PVOH	420
TPS	110

## 2. ผลกระทบด้านลบ

- ผลกระทบด้านลบต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นพบ น้อยมาก โดยส่วนมากที่พบนั้นจะเป็นผลของสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เติมลงไป เช่น พลาสติกไซเซอร์ ซึ่ง อาจก่อให้เกิดการตกค้างหรือรั่วไหลได้ เมื่อถูกเก็บไว้ในระยะเวลาอันยาวนาน อาจปนเปื้อนแหล่งน้ำในดิน หรือบนดินได้ [10]

### 2.1.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในกระบวนการย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย สามารถหน่วงหรือเร่งทำให้เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่ต้อง ให้ความสำคัญ อันได้แก่

#### 1. โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดีนั้น จะต้องมีโครงสร้างทางเคมีที่ เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มักต้องมีพันธะที่ง่ายต่อการเกิด ไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ขาดและน้ำหนักโมเลกุลลดลงเรื่อย ๆ จนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งก้านจะย่อยสลายได้ ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง เนื่องจากกิ่งก้านจะขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ และพอลิเมอร์ที่มี น้ำหนักโมเลกุลต่ำจะย่อยสลายได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นต้น [13]

#### 2. ชนิดของจุลินทรีย์

ในธรรมชาตินั้นมีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูง ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสังเคราะห์ เอนไซม์ที่มีความจำเพาะที่ให้ความแตกต่างในการย่อยสลายพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยปกติแล้วการ ย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์มากกว่า 1 ชนิด และในสภาวะที่ไม่มีจุลินทรีย์นั้น การย่อยสลายทางชีวภาพนั้นแทบไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย [13]

#### 3. สภาวะแวดล้อม

สภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากการปรับสภาวะแวดล้อมให้เอื้อต่อการจะเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการย่อย สลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- อุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการย่อยสลายได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส จัดเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปใน ธรรมชาติ

- ปริมาณของก๊าซออกซิเจน ช่วยให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้การย่อยสลายเกิดได้อย่างรวดเร็วสมบูรณ์

- น้ำและความชื้น ช่วยให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์

4. ขนาดของวัสดุทดสอบ พบว่าหากวัสดุทดสอบมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่ทำให้จุลินทรีย์เข้าไปเกาะได้มาก [13]

## 2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

### 2.1.4.1 การทดสอบโดยการฝังดิน

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

### 2.1.4.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้

เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เช่น ความขรุขระ การเปลี่ยนแปลงของสี รูพรุน หรือรอยแตกหัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเกิดผลกระทบต่อสมบัติทางเชิงกลของพลาสติก ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้โดย

- การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากทำการส่องจะพบว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสีที่เปลี่ยนแปลง เกิดรอยแตก รอยฉีกขาด และมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

- วิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยจะให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำลงอันเนื่องมาจากการย่อยสลายทำให้สายโซ่สั้นลง น้ำหนักโมเลกุลลดลง

- วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ศึกษาโดยใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งจะทำให้ทราบว่าในระหว่างการย่อยสลายนั้นลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก [13]

### 2.1.4.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปของพลาสติกเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ให้ผลไม่ถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบเป็นระยะเวลาาน มักจะมีกลุ่มของจุลินทรีย์สะสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ เป็นผลให้ค่าน้ำหนักที่ได้มีค่าสูงเกินจริง โดยปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญ คือ การย่อยสลายมักจะเกิดบริเวณพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ น้ำหนักที่หายไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว ดังนั้น เพื่อความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในการรายงานผลควรรายงานค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ต่อพื้นที่ผิวทดสอบมากกว่ารายงานค่าน้ำหนักที่หายไปเท่านั้น [13]

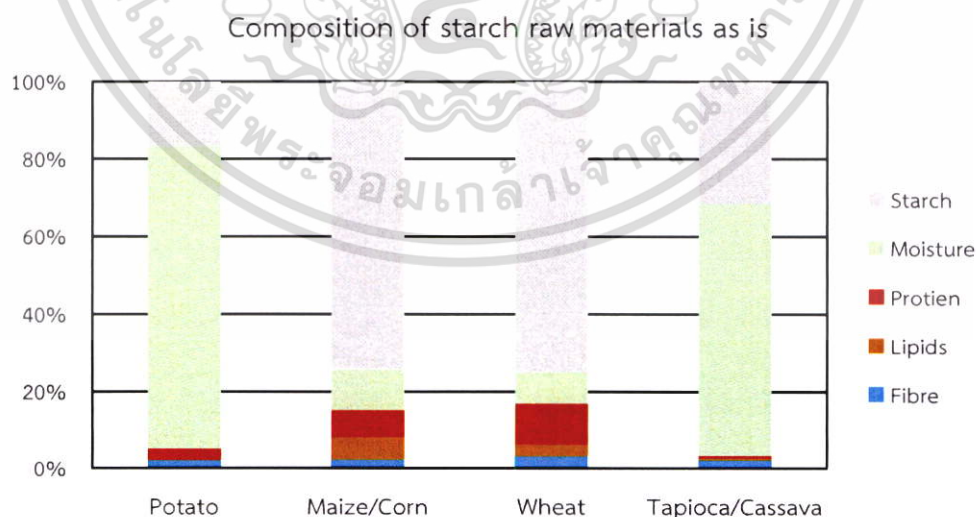
## 2.2 แป้ง (Starch)

### 2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สำคัญ สามารถพบได้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น คลอโรพลาสต์ในใบ และส่วนที่พืชใช้สะสมอาหาร เช่น ราก ลำต้น และเมล็ด แป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 1-100 ไมโครเมตร หรืออาจจะมากกว่านี้ ขึ้นกับแหล่งที่มาของวัตถุดิบการผลิตแป้ง เช่น แป้งจากข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี ในทวีปอเมริกา แป้งจากมันฝรั่ง ในทวีปยุโรป และแป้งจากข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง ในทวีปเอเชียและทวีปแอฟริกา เป็นต้น โดยแป้งเป็นแหล่งโภชนาการที่มีความสำคัญมาก ซึ่งโภชนาการทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของแป้งเป็นหลัก เช่น ข้าว ขนมปัง อาหารจำพวกเส้น เป็นต้น [12, 14]

ถึงแม้ว่าบทบาทที่สำคัญของแป้ง คือ ใช้เป็นแหล่งโภชนาการพลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากสมบัติเฉพาะของแป้งจึงได้มีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมอาหาร โดยมักจะใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดความคงตัว ทำให้เกิดเจล ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็ง การทำพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) และสเตอริไรเซชัน (Sterilization) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมยา อีกด้วย [1]

แป้ง โดยความหมายทางสากลนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบหลัก ๆ เป็นอะตอมของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย เช่น โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ แป้งที่ยังมีสิ่งเจือปนหรือส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะจัดอยู่ในประเภท ฟลาวัวร์ และเรียกเป็นอีกชื่อหนึ่ง เช่น แป้งข้าวโพด (Corn flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนอื่น ๆ ถูกสกัดออกไปจนเหลือเพียงแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงจะเปลี่ยนคำว่า ฟลาวัวร์ เป็น สตาร์ช (Starch) [1, 14]



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่าง ๆ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศไทย อุตสาหกรรมแป้งมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรเป็นอย่างมาก เนื่องจากแป้งจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น (Renewable resources) ทำให้ถึงแม้จำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นทุกวัน และมีความต้องการแหล่งพลังงานเพิ่มสูงขึ้น แต่แหล่งพลังงาน เช่น แป้ง ก็จะไม่วันหมดไป เนื่องจากสามารถแปรรูปเพื่อสนองความต้องการของมนุษย์ได้อย่างไม่มีจำกัด และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมด้วย [1]

## 2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันที่พันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป มีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงโซ่กิ่ง โดยทั่วไปแล้วแป้งจะมีอัตราส่วนของอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส คิดเป็นประมาณ 70 ต่อ 30 หรือ 80 ต่อ 20 ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและชนิดของแป้ง ซึ่งส่งผลให้สมบัติที่ได้แตกต่างกันออกไปด้วย [1,14]

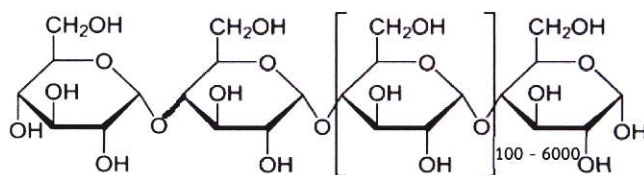
นอกเหนือจากอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแล้ว เม็ดแป้งยังประกอบด้วยสารตัวกลาง (Intermediate material) รวมถึงสิ่งเจือปนในปริมาณน้อย เช่น แร่ธาตุ และเถ้า เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [4]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	โมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง	โมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นโซ่กิ่ง
พันธะ	$\alpha$ -1, 4	$\alpha$ -1, 4 และ $\alpha$ -1, 6
ขนาด	100 – 6000 หน่วยซ้ำของกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยซ้ำของกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

### 2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคสประมาณ 100 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$  -1, 4 Glucosidic linkage โดยขนาดของโมเลกุลอะไมโลสขึ้นกับแหล่งที่มาของวัตถุดิบและกระบวนการแปรรูปแป้ง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลส [14]

โดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวฟ่าง จะมีปริมาณอะไมโลสสูง โดยมีค่าประมาณ 22-30% ส่วนแบ่งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาคู จะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า โดยอยู่ในช่วง 18-24% ส่วนแป้งข้าวเหนียวนั้นจะไม่มีปริมาณของอะไมโลสเลย แป้งจะมีน้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 โดยแป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง [1]

จากโครงสร้างของอะไมโลส พบว่า มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้สมบัติของแป้งมีความชอบน้ำและสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี นอกจากนี้สายโซ่ยาวของอะไมโลสยังสามารถบิดโครงสร้างเป็นเกลียวได้ (Helical conformation) ทำให้สามารถเกิดไมเซลล์ในน้ำได้ด้วย [12]



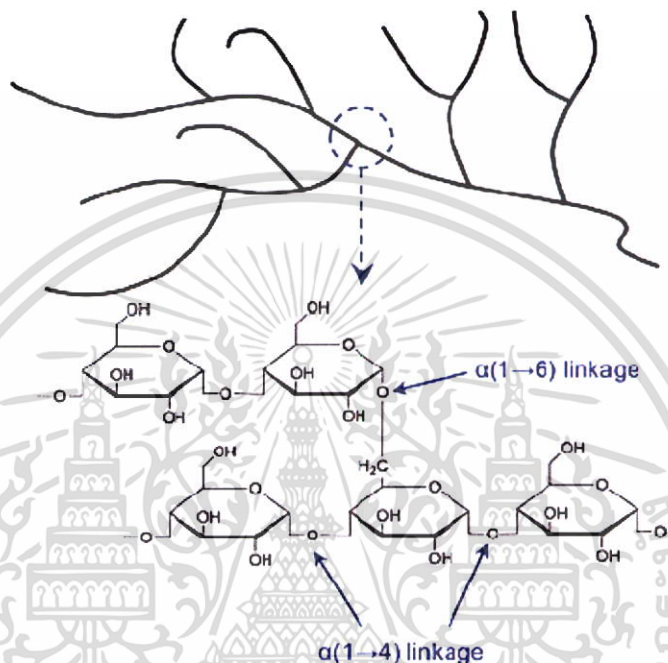
รูปที่ 2.7 โครงสร้างบิดเกลียวของอะไมโลส [8]

สมบัติอีกประการหนึ่งของอะไมโลส คือ มีความชอบไอโอดีน รวมถึงสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว (Long chain alcohol) กรดไขมัน (Fatty acid) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และฟีนอล (Phenol) อะไมโลสจะจัดเรียงตัวบิดเป็นเกลียวล้อมรอบโมเลกุลดังกล่าวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น โดยสารประกอบเชิงซ้อนนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจพิสูจน์แป้งที่มีโมเลกุลอะไมโลสเป็นส่วนประกอบ และยังสามารถใช้หาปริมาณของอะไมโลสในแป้งได้ด้วย โดนวธีการวัดความเข้มของสีหรือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับบิวทานอล (Butanol) สามารถนำมาใช้เป็นวิธีแยกอะไมโลสออกจากอะไมโลเพคตินได้โดยกระบวนการตกตะกอน [1, 14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคติน เป็นพอลิเมอร์เชิงสายโซ่กิ่งที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งเชื่อมกันที่พันธะ  $\alpha$ -1, 4 Glycosidic linkage และ พันธะ  $\alpha$ -1, 6 Glycosidic linkage โดยทั่วไปทุกๆ 6 ถึง 12 หน่วย จึงจะพบสายโซ่กิ่งหนึ่งสาย โดยแต่ละสายโซ่กิ่งจะประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคส 12 ถึง 15 หน่วย โครงสร้างของอะไมโลเพคตินจะมีโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก [14]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [14]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด โดยอะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของอะไมโลส ข้อมูลจากการตรวจวัดด้วย Light scattering พบว่าอะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน [15]

และเนื่องจากอะไมโลเพคตินมีขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโซ่กิ่งจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง และมีอัตราการคืบตัวต่ำ และเนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีจำนวนหน่วยของน้ำตาลกลูโคสสูง ทำให้มีสมบัติชอบน้ำมาก นอกจากนี้ในส่วนของ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน พบว่า ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดงม่วง [8]

### 2.2.2.3 สารตัวกลาง (Intermediate materials)

สารตัวอย่างมีอยู่เพียงน้อยมากในแป้งบางชนิด และมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับอะไมโลเพคติน แต่จะมีน้ำหนักมากกว่าเมื่อเทียบกับอะไมโลส สารตัวกลางสามารถทำปฏิกิริยาไอโอดีนได้สีน้ำเงินเช่นเดียวกับอะไมโลส นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้าง พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบโซ่กิ่งคล้ายอะไมโลเพคติน แต่จะมีขนาดและสายโซ่กิ่งสั้นกว่า โดยปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช [1]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่าง ๆ [1]

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

หมายเหตุ ข้อมูล (-) ในตาราง หมายถึง ไม่มีข้อมูลรายงาน

#### 2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ นอกเหนือจาก 3 องค์ประกอบที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แบ่งได้ดังนี้

1. ส่วนประกอบที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particular material) เช่น โปรตีนและผนังเซลล์ของเม็ดแป้งที่ไม่ละลาย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์ (Amyloplast membrane)
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง [1]

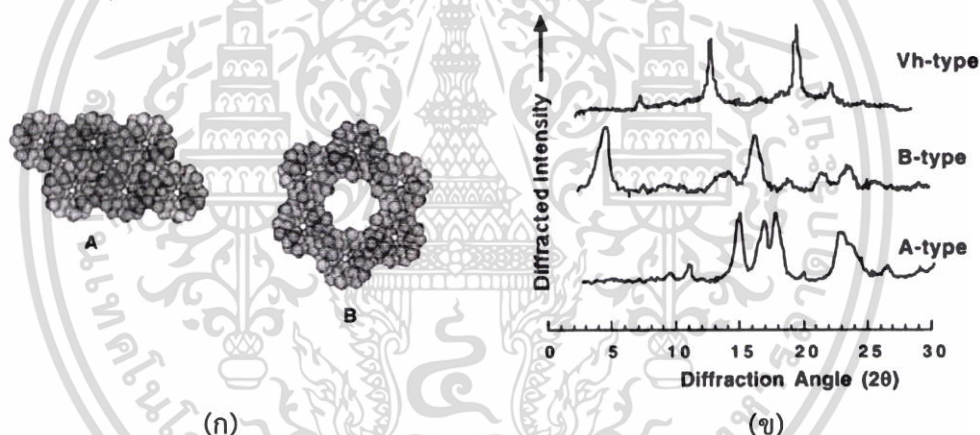
#### 2.2.3 ขนาด รูปร่าง และโครงสร้างผลึกของแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (granule) ซึ่งมีขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งแป้งนั้น ๆ โดยเม็ดแป้งจากข้าวเจ้าจะมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในบรรดาแป้งจากธัญพืช โดยมีลักษณะแบน มีหลายเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-5 ไมโครเมตร [16]

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีการจัดเรียงตัวกันในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน ในขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่ในโมเลกุลของอะไมโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ต่อกันของคลัสเตอร์อะไมโลเพกติน (Series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยชั้นผลึก (Crystalline lamellae)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเกิดจากสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินที่จัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helix) อย่างเป็นระเบียบสลับกับชั้นอสัณฐาน (Amorphous lamellae) ซึ่งเกิดจากบริเวณที่เป็นกิ่งของสายอะไมโลเพคตินที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จะเห็นได้ว่าสายอะไมโลเพคตินจะเป็นส่วนประกอบทั้งในส่วนโครงสร้างผลึกและส่วนอสัณฐาน และพบว่าร้อยละ 80-90 ของจำนวนอะไมโลเพคตินจะอยู่ในส่วนของชั้นผลึก ส่วนร้อยละ 10-20 ที่เหลือจะอยู่ในส่วนอสัณฐาน โดยส่วนที่เป็นชั้นผลึกจะเป็นส่วนที่ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงคงรูปร่างของเม็ดแป้งไว้ได้ ส่วนอสัณฐานจะเป็นส่วนที่ยึดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกันและเป็นส่วนที่สร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นกับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวหนาแน่นจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (A-type) เช่น แป้งจากธัญพืชและราก ถ้าจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B (B-type) เช่น แป้งจากพืชหัว และถ้ามีการจัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกัน จะเกิดผลึกแบบ C (C-type) เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว นอกจากผลึกแบบ A B และ C บางครั้งปรากฏลักษณะผลึกแบบ Vh (Vh-type) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนที่เกิดจากการจับกันของอะไมโลสกับแอสทอซอลที่เป็นเส้นตรง ไอโอดีน หรือกรดไขมัน ซึ่งลักษณะผลึกแบบ Vh จะพบในแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 เช่น ในแป้งข้าวโพดที่มีการดัดแปลงโครงสร้างพันธุกรรม [1, 12]



รูปที่ 2.9 (ก) โครงสร้างทางผลึกชนิด A และ B (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างทางผลึกแบบ A, B และ Vh

## 2.2.4 สมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของแป้ง

### 2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำที่เติมลงไปได้ภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ โดยปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% [1]

น้ำภายในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ แป้งที่มีความชื้น 8-10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอก-

ซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยซ้ำน้ำตาลกลูโคสในแต่ละหน่วยของแป้งจะได้สตาโรซโมโนไฮเดรต  $[(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)]$  [1]

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจางจะเกิดสีขึ้นภายในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอเปอร์ซัลเฟตลงไป พบว่าสีหายไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวคัดกรองขนาดโมเลกุล (Molecular sieve) โคนรูพรุนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำให้แห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจจะมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากขั้นตอนการทำให้แห้งในกระบวนการผลิต

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตินเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้ความสามารถในการละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มสูงขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และกระบวนการแปรรูปทางเคมี [1]

ตารางที่ 2.5 การพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95 องศาเซลเซียส [4]

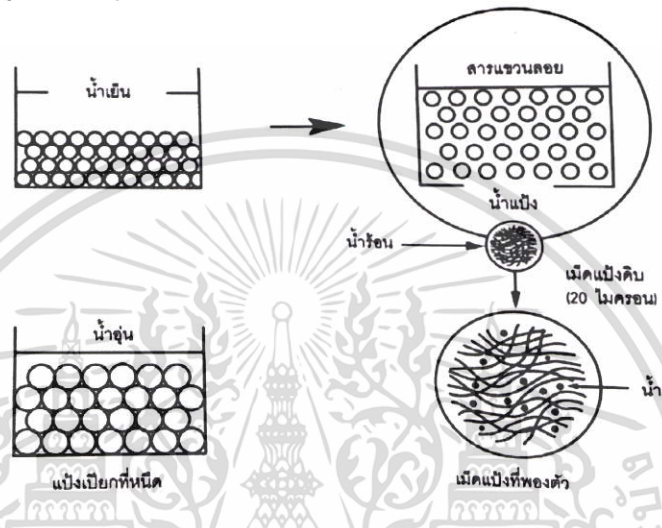
ชนิดของแป้ง	การพองตัว (%)	ความสามารถในการละลาย (%)
แป้งมันฝรั่ง	> 1,000	82
แป้งสาคู	97	39
แป้งมันสำปะหลัง	71	48
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	64	23
แป้งท้าวายม่อม	54	28
แป้งมันเทศ	46	18
แป้งข้าวโพด	24	25
แป้งข้าวฟ่าง	22	22
แป้งสาลี	21	41
แป้งข้าวเจ้า	19	18

#### 2.2.4.2 การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้ง (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งจัดเรียงตัวอยู่ในรูปของไมเซลล์ จึงทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งพองตัว ส่งผลให้ส่วนผสมน้ำแป้งมีความหนืดและมีความใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลลาคีโนเซชัน โดยอุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาคีโนเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด จะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด โดยแป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลลาคีโนเซชันต่ำกว่าอุณหภูมิแป้งจากธัญพืช



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [1]

ตารางที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งชนิดต่าง ๆ [8]

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

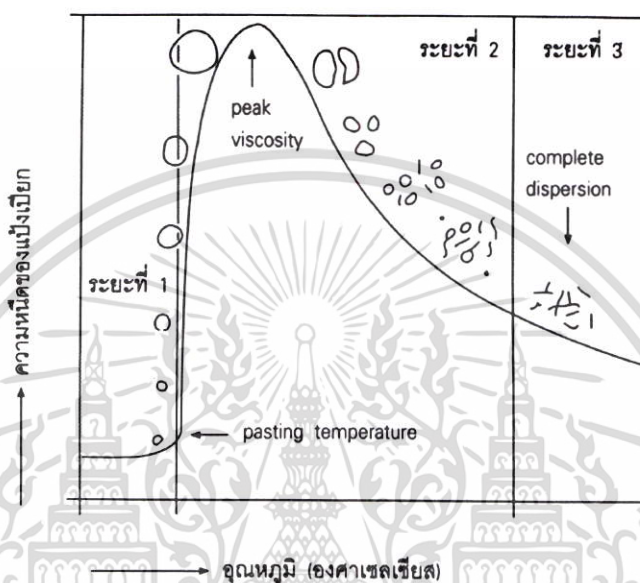
การเกิดเจลลาคีโนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ

1. ระยะที่หนึ่ง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเสลล์ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนสังเกตเห็นได้ เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งขึ้นจนถึงอุณหภูมิเริ่มเจลลาคีโนเซชัน จะเริ่มเข้าสู่ระยะที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระยะที่สอง เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร้างแหระหว่างโมเลกุลจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากขึ้นและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาทีโนเซชัน ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

3. ระยะที่สาม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปอีก รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจล [1, 18]



รูปที่ 2.11 การแสดงการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้ง [1]

#### 2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสารละลายแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีโนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายหลุดออกมามีผลทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติที่แข็งแรง โดยโครงสร้างใหม่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาภายนอก เรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น [16]

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดเบสของสารละลาย โดยพบว่า แป้งจะเกิดการคืนตัวได้เร็วที่สุดในช่วง pH 5 – 7 หากช่วง pH สูงหรือต่ำกว่านี้การคืนตัวจะช้าลง นอกจากนี้ยังมีผลจากปริมาณและขนาดของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน กล่าวคือ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง จากการวิจัยพบว่าอะไมโลเพคตินจะเกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินต่างกันก็จะเกิดการคืนตัวที่แตกต่างกันตามไปด้วย [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.4.4 ความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่ง จะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลีจะมีความหนืดต่ำที่สุด การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง ชนิดของแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง [18]

#### 2.2.4.5 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งจะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในสถานที่หรือบริเวณที่เก็บรักษาแป้ง ในภายใต้สภาพบรรยากาศปกติที่นั้นแป้งธรรมชาติจะมีความชื้นโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นศูนย์ ปริมาณความชื้นของแป้งจะเข้าใกล้ศูนย์ด้วย โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์จะมีปริมาณความชื้นประมาณ 5 – 6 เปอร์เซ็นต์ [18]

### 2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)

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

#### 2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

##### 2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

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

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) สามารถเตรียมได้โดยตรงจากการทำปฏิกิริยาของแป้งกับกรดคาร์บอกซิลิกชนิดต่าง ๆ หรือเตรียมทางอ้อมโดยการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแป้งกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น แอนไฮไดรด์ (Anhydride) เอซิลคลอไรด์ (Acyl chloride) และเอสเทอร์ ทำให้ได้แป้งที่มีสมบัติเด่น คือ มีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส ความอ่อนตัว และยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง [1, 19]

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่เอเทอร์ สมบัติของแป้งที่ได้จะมีการคืนตัวน้อยลง อุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนซ์ลดต่ำลง สามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น แป้งเปียกมีความเหนียว คงตัวได้ดี มีความคงทนต่อกรดและเบส หากนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะใส มั่นคง และยืดหยุ่นมากขึ้น [19]

- แป้งเชื่อมโยง (Cross-linked starch) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกสารเคมีนั้นว่า สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) อาจเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันหรืออีเทอร์ิฟิเคชันขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแป้งในสภาวะแขวนลอย พันธะที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น อัตราการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนซ์สูงขึ้น เพิ่มความต้านทานของแป้งต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน เพิ่มความหนืดของแป้งขณะเป็นสารละลายร้อน มีสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นที่มีความหนืดสูง โดยที่ลักษณะโครงสร้างภายนอกเม็ดแป้งจะไม่เปลี่ยนแปลงไป [1, 20]

2. แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยกรด (Acid-modified starch) ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ หรือกรดกำมะถัน เพื่อทำให้โมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลง ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อละลายในน้ำร้อนจะมีความหนืดน้อยกว่าแป้งปกติทำให้สามารถใช้แป้งได้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเกิดการคืนตัวจะได้เจลที่แข็งและทึบแสง สามารถยึดเกาะกันได้ดี [1]

3. แป้งออกซิเดชัน (Oxidized starch) ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีของแป้งกับสารออกซิไดซ์ ได้แก่ สารในกลุ่ม โบรมีน คลอรีน ไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite) ไฮโปโบรมิท์ (Hypobromite) เปอร์ซัลเฟต (Persulfate) และเปอร์แมงกาเนต (Permanganate) โดยสมบัติของแป้งที่ออกซิไดซ์แล้ว คือ จะมีอัตราการคืนตัวของแป้งเปียกลดลง และแป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง มีความใสมากขึ้น โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเกิดแบบสุ่ม 4 ตำแหน่ง ได้แก่

- ออกซิไดซ์ที่ตำแหน่ง Aldehyde reducing end groups เปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล
- ออกซิไดซ์ที่หมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) ได้หมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde) และถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยหมู่คาร์บอกซิล
- ออกซิไดซ์ที่ตำแหน่งไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) ได้หมู่คีโตน
- ออกซิไดซ์ที่หมู่ไกลคอล (Glycol group) ได้หมู่อัลดีไฮด์ และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นหมู่คาร์บอกซิล [1, 20]

### 2.3.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

1. แป้งพรีเจลาทีไนซ์ (Pregelatinized starch) แป้งพรีเจลาทีไนซ์ หรือแป้งพรีเจลหรือชื่อในทางการค้าว่า อัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยการให้ความร้อนแก่แป้ง ทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาทีไนซ์ แล้วทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด จะทำให้ได้แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล เหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมต่าง ๆ น้ำซอส ส่วนผสมของซูปผง เป็นต้น [1-2]

2. แป้งละลายน้ำเย็น (Granular cold water soluble starch, GCWSS) เป็นการแปรรูปโดยใช้แอลกอฮอล์และเบส จะได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล [1, 19]

3. การลดขนาดของเม็ดแป้งด้วยกรรมวิธีเชิงกล เนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งมีผลต่อสมบัติบางประการ เช่น การพองตัว และการละลาย เป็นต้น

4. การให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชัน

5. การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงและจำกัดปริมาณน้ำ มีผลทำให้สมบัติทางความร้อนและความหนืดของแป้งเปลี่ยนไป

### 2.3.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ

เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ได้แก่

- Waxy starch คือ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย ทำให้สมบัติที่ได้คล้ายกับสมบัติของแป้งข้าวเหนียว คือ ไม่เกิดการคืนตัว มีความเหนียว และมันเงาสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกาวและสิ่งทอ [1]

- High amylose starch คือ แป้งที่มีปริมาณของอะไมโลสสูง ทำให้มีสมบัติพองตัวได้ยาก มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันสูง สามารถผลิตฟิล์มที่มีความแข็งแรงสูงและยืดหยุ่นได้ดี [2]

## 2.4 ฟิล์มจากแป้ง

### 2.4.1 สมบัติของฟิล์มจากแป้ง

ในอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการทำแป้งแห้งเพื่อจุดประสงค์ในการห่อหุ้มกระดาษหรือเส้นใย (Coating) หรือเพื่อใช้เป็นกาว (Adhesive) สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ ฟิล์มแป้งจะมีคุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์ม และความเงา (Gloss)

ฟิล์มแป้งที่ได้จากแหล่งที่ต่างกันจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้แตกต่างกัน และมีอัตราในการเกิดรีโทรเกรเดชันต่างกัน แป้งจากธัญพืชมีอะไมโลสและไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันในระหว่างการทำให้แป้งแห้ง ทำให้ส่วนนั้นไม่ละลายและเกิดเป็นร่างแห ก่อให้เกิดการไม่ละลายของส่วนอะไมโลเพคตินอีกด้วย ในขณะที่แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำ จึงสามารถละลายในน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์ ฟิล์มแป้งจะมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ในช่วงระยะหนึ่ง

ฟิล์มแป้งจากมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง มีความใสและความมันเงามากกว่าฟิล์มแป้งจากธัญพืช เนื่องจากในระหว่างกระบวนการทำให้แห้งและกระบวนการเก็บรักษา แป้งธัญพืชจะเกิดรีโทรเกรเดชัน โมเลกุลอะไมโลสจะเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายทำให้ฟิล์มขุ่น และเปราะง่าย [22]

ตารางที่ 2.6 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด [22]

ลักษณะ	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว
ความใส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
การละลาย	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความเรียบ/ยืดหยุ่น	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความแข็งแรง/เหนียว	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง

### 2.4.2 การเกิดฟิล์ม

การเกิดฟิล์ม จะมีองค์ประกอบหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์ม ตัวทำละลาย และสารเติมแต่งที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม เมื่อนำองค์ประกอบมาทำให้ละลายและกระจายตัวแล้วแยกตัวทำละลายออกจะเกิดแรงยึดเหนี่ยว 2 ชนิด ได้แก่ แรงโคฮีชัน (Cohesion) และแรงแอดฮีชัน (Adhesion) โดยแรงโคฮีชันเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความยาว และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะในการเตรียมฟิล์มจึงควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายที่อ่อน และทำให้ฟิล์มแห้งด้วยอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่เหมาะสม ส่วนแรงแอดฮีชันจะเป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่เกี่ยวข้องในการเตรียมฟิล์ม เช่น พลาสติไซเซอร์ เป็นต้น ทั้งแรงโคฮีชันและแอดฮีชัน จะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม เช่น ความหนาแน่น ความสามารถในการซึมผ่าน ความเปราะ และความยืดหยุ่น เป็นต้น

### 2.4.3 การขึ้นรูปฟิล์ม

ในการขึ้นรูปฟิล์ม สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. การเทสารละลายลงบนวัสดุต่าง ๆ (Solvent casting) เป็นการขึ้นรูปโดยการเทสารละลายของฟิล์ม และแผ่เป็นแผ่นบาง ๆ ลงบนภาชนะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม และใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้แห้ง แล้วลอกออก จะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่ต้องการ
2. การเอกรูขุ่น (Extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือในการทำให้ฟิล์มเป็นแผ่นบาง แต่วัสดุที่ใช้จะต้องมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)
3. การทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (Calendaring) เป็นการขึ้นรูปโดยผ่านการผ่านแผ่นฟิล์มเข้าไปในลูกกลิ้งร้อน เพื่อรีดให้ฟิล์มเรียบและแห้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับ แรงกดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์ม และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ฟิล์มผ่านเข้าไป [22]

## 2.5 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch)

### 2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้งข้าวเจ้า

แป้งข้าวเจ้า เป็นแป้งที่ผลิตมาจากเมล็ดข้าวเจ้า ซึ่งเป็นพืชในวงศ์ Gramineae มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa Linn.* โดยลักษณะทางพฤกษศาสตร์จัดเป็นพืชจำพวกหญ้า และมีลักษณะภายนอกคล้ายต้นหญ้า ขนาดสูงประมาณ 1 เมตร ลำต้นภายในกลวง ใบเรียวยาว มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมล็ดสีข้าว มีเปลือกห่อหุ้ม มีต้นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบมากในประเทศไทย เวียดนาม และอินโดนีเซีย โดยเฉพาะในประเทศไทยจะนิยมปลูกข้าวเจ้าอยู่ทั่วทุกจังหวัด [1, 21]

โดยทั่วไปแล้วข้าวเจ้าในหลายๆ ประเทศทั่วโลกจัดจำแนกไว้อยู่หลายสายพันธุ์ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- พันธุ์ออไรซา ซาโทวา (*Oryza sativa*) มีปลูกกันทั่วไป แบ่งเป็นพันธุ์อินดิกา ปลูกมากในภูมิภาคเขตร้อนรวมถึงประเทศไทย และพันธุ์จาปอนิกา มีปลูกมากในภูมิภาคเขตอบอุ่น

- พันธุ์ออไรซา แกลเบอร์ริมา (*Oryza glaberrima*) มีปลูกโดยเฉพาะทวีปแอฟริกา เท่านั้น

- พันธุ์ข้าวป่า ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในประเทศต่าง ๆ ทั่วไป

นอกเหนือจากนี้ ยังมีพันธุ์ข้าวเจ้าอีกหลากหลายชนิดซึ่งได้ถูกมนุษย์คัดสรรและปรับปรุงพันธุ์กรรมมาโดยตลอดตั้งแต่มีประวัติศาสตร์การเพาะปลูก ทำให้ข้าวเจ้าในปัจจุบันมีหลากหลายพันธุ์ที่ให้สมบัติและประโยชน์ใช้สอยแตกต่างกันออกไป โดยพันธุ์ข้าวเจ้าตัดแปรที่มีชื่อเสียงในระดับสากลของประเทศไทย คือ ข้าวหอมมะลิ [21]

ข้าวเจ้ามีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 90 ซึ่งเป็นแป้งเกือบทั้งหมด ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 7 ไขมันร้อยละ 1.5 และเป็นวิตามิน เกลือแร่ และสารอาหารอื่น ๆ อีกร้อยละ 1.5 ข้าวที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นวัตถุดิบประกอบอาหารจะเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงร้อยละ 27 – 33 และควรเป็นข้าวเก่าที่เก็บไว้แล้ว 3 – 4 เดือน [21]

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวหัก [1]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
ความชื้น	12.0
แป้ง	79.2
โปรตีน	7.0
ไขมัน	0.4
เถ้า	0.5
สิ่งเจือปนอื่น ๆ	0.9

### 2.5.2 สมบัติของแป้งข้าวเจ้า

แป้งข้าวเจ้า มีลักษณะเป็นผงละเอียดร่วนสีขาว จับแล้วสากมือเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืชชนิดอื่น ๆ มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนโซอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 77 °C เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะขุ่นร่วน ถ้าทิ้งให้เย็นจะอยู่ตัวเป็นก้อน ร่วนไม่เหนียว จึงเหมาะที่จะประกอบอาหารที่ต้องการความอยู่ตัวร่วนไม่เหนียวหนืด แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็ก เนื่องจากแป้งข้าวไม่มีพิษและไม่มีสารระคายเคือง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารทำให้แข็ง (Laundry stiffening agent) ในการซักผ้าอีกด้วย [1, 5, 21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 สมบัติโดยรวมของแป้งข้าวเจ้า [1]

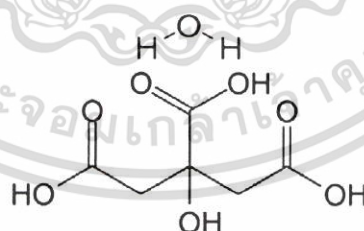
สมบัติ	แป้งข้าวเจ้า
ขนาดของเม็ดแป้ง	6.8 ไมโครเมตร
ปริมาณอะไมโลส	18 -27 %
ปริมาณอะไมโลเพคติน	73 – 82 %
ขนาดของอะไมโลส (Degree of polymerization)	900 – 1,100
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลลาทีไนซ์ (Onset temperature, $T_0$ )	60 °C
อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดเจลลาทีไนซ์ (Peak temperature, $T_p$ )	77 °C

### 2.5.3 การผลิตแป้งจากข้าวเจ้า

ข้าวเจ้าที่ใช้ในการผลิตแป้งจะนิยมใช้ข้าวหักหรือข้าวเกรดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง โดยกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการนำข้าวเปลือกมาล้างทำความสะอาด นำไปสี แล้วล้างแยกสิ่งแปลกปลอมออกอีกครั้ง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเบสพร้อมกับการปั่นกววนข้าว ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อแยกเอาโปรตีนที่ติดอยู่กับเมล็ดข้าวออก ปล่อยให้ข้าวตกตะกอน แยกส่วนใสที่มีโปรตีน (Steep liquor) ออก ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนเมล็ดข้าวเริ่มนิ่ม แล้วนำเมล็ดข้าวมาบดเปียกด้วยสารละลายเบส ล้างน้ำ และเหวี่ยงแยกโปรตีนส่วนที่ติดอยู่ในสารแขวนลอยแป้งออก นำมาผ่านไฮโดรไซโคลอน กำจัดน้ำ แล้วทำให้แห้ง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งข้าวเจ้า [6]

## 2.6 กรดซิตริก (Citric acid)

กรดซิตริกเป็นกรดอ่อนใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการอาหารได้โดยไม่เกิดอันตราย สามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว ส้มป่อย และส้ม [40]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของกรดซิตริก โมโนไฮเดรท (Citric acid monohydrate)

กรดซิตริกที่ผลิตในปัจจุบันอยู่ในรูปผลึก Monohydrate ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ) ซึ่งมีน้ำประกอบอยู่ 1 โมเลกุล มีสีใส ไม่มีกลิ่น มีรสเปรี้ยว มีความสามารถละลายในน้ำเย็น มากกว่าการละลายในน้ำร้อน

โดยกรดซิตริกมีคุณสมบัติทางเคมีดังนี้

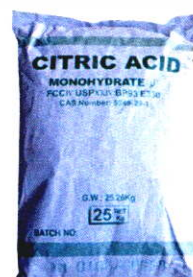
IUPAC name	: 2-hydroxypropane-1,2,3-tricarboxylic acid
ชื่ออื่น	: Citric acid anhydrous, Citric acid monohydrate, Uralyt U
CAS	: 77-92-9
สูตรโมเลกุล	: $C_6H_8O_7$
น้ำหนักโมเลกุล	: Anhydrous ; 192.12352 g/mol Monohydrate ; 210.14 g/mol
ความหนาแน่น	: Anhydrous ; 1.665 g/cm <sup>3</sup> Monohydrate ; 1.542 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	: Anhydrous ; 153 °C Monohydrate ; 70-75 °C
จุดเดือด	: Anhydrous ; - Monohydrate ; 175 °C
ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้	: -47405 kCal/mol
ค่าคงที่การแตกตัวของกรด	: pKa1 = 3.13, pKa2 = 4.76, pKa3 = 6.39
Hydrogen bond donor count	: 4
Hydrogen bond acceptor count	: 7
Complexity	: 227

ลักษณะ

ทางกายภาพ	: ผงแห้ง, ของเหลว, คริสตัลขนาดใหญ่
สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น
การละลาย	: ละลายในน้ำ 59 g/100 ml at 20 °C ไม่ละลายในตัวทำละลายเบนซีนและคลอโรฟอร์ม ละลายได้ดีในเอทานอล, อีเทอร์, เอทิล อะซิเตท

การใช้ประโยชน์

กรดซิตริกโดยทั่วไป ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายประเภท เช่น ใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร (Food additive), วัตถุปรุงแต่งรสอาหาร (Flavoring agent), สารกันหืน (Antioxidant), สารกันเสีย (Preservative), สารจับโลหะ (Chelating agent) และสารทำความสะอาด (Cleaning agent) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 กรดซิตริกในรูปผลึกโมโนไฮเดรท Monohydrate [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 วัสดุประกอบนาโน (Nano composites)

วัสดุประกอบนาโนเป็นวัสดุที่สามารถเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิกส์ และพอลิเมอร์ ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นมาโดยมีการดัดแปลงการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร โดยการเติมวัสดุที่เป็นองค์ประกอบอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่เป็นของแข็งขนาดเล็กมากในช่วงนาโนเมตรลงไปเมทริกซ์หลัก จะเรียกรวมกันเป็นวัสดุประกอบนาโน ซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะที่เป็นได้ทั้งอสัณฐาน กึ่งผลึก หรือผลึก โดยองค์ประกอบหลักของวัสดุประกอบ คือ

1. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงกับวัสดุประกอบ เมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุจะเป็นส่วนรับแรงหลัก โดยวัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงนี้อาจเป็นได้ทั้งเส้นใย (Fiber) อนุภาค (Particle) หรือแผ่น (Laminate)

2. เมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการจัดเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบส่วนเสริมแรงไว้ เมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุประกอบจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงที่ได้รับไปยังส่วนเสริมแรง (Load transfer medium) โดยเมทริกซ์จะเป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) และจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกว่าวัสดุประกอบชนิดนี้ว่า พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) โดยสามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)
- โลหะ เรียกว่าวัสดุประกอบชนิดนี้ว่า เมทัลคอมโพสิต (Metal composites)
- เซรามิกส์ เรียกว่าวัสดุประกอบชนิดนี้ว่า เซรามิกส์คอมโพสิต (Ceramic composites) [23]

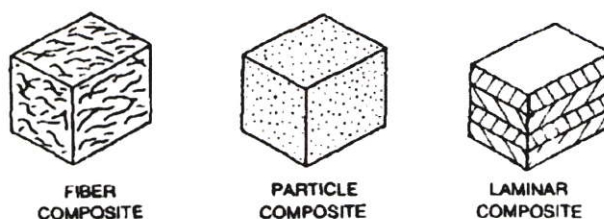
### 2.7.1 การแบ่งชนิดของวัสดุประกอบ (Classification of composites)

ชนิดของวัสดุประกอบแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. วัสดุประกอบแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ วัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย โดยอาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fiber) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fiber) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้วัสดุประกอบมีความแข็งแรงตามแนวการจัดเรียงของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. วัสดุประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ วัสดุประกอบที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ (Sandwich) และเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. วัสดุประกอบแบบเป็นก้อน (Particular composites) คือ วัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powders) ที่มีขนาดเล็ก โดยมักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร [23]



รูปที่ 2.14 ชนิดของวัสดุประกอบแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดวัสดุประกอบได้ตามลักษณะการเกิดของวัสดุประกอบ คือ

1. วัสดุประกอบธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ฟัน และกระดูก โดยไม้จะเป็นวัสดุประกอบที่มีเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรงและมีลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นวัสดุประกอบของแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์คอลลาเจน (Collagen) ที่เหนียว เป็นต้น
2. วัสดุประกอบจากการสังเคราะห์ (Synthesis composites) คือ วัสดุประกอบที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น [24 - 25]

### 2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุประกอบนาโน

1. วัสดุประกอบนาโนมีข้อดี ดังนี้
  - มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือสมบัติต่อความหนาแน่นสูง (Highly properties to weight or density ratio) เช่น ความแข็งจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) และความแข็งเปราะจำเพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น
  - มีสมบัติที่หลากหลาย สามารถสร้างวัสดุประกอบให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ เช่น จากการจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวรับแรง
  - มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติการต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
  - มีสมบัติการรับแรงและมีการหน่วง (Damping) ที่ดี
  - มีความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
  - มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ
2. วัสดุประกอบนาโนมีข้อเสีย ดังนี้
  - ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปวัสดุประกอบ
  - มีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง ซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุประกอบไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากเปรียบเทียบกับแนวการจัดเรียงตัว (Transverse direction)
    - การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น ทำได้ยาก
    - การทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล ทำได้ยาก [23]

### 2.7.3 การเตรียมวัสดุประกอบนาโน

การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างอนุภาคขนาดนาโนและพอลิเมอร์ ได้แก่ [24-25]

#### 1. การผสมโดยตรง

1.1 การผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งเหล็กหล่อสองลูกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300-500 มิลลิเมตร และมีความยาว 800-1500 มิลลิเมตร วางขนานกันและหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนผ่านลูกกลิ้งทั้งสอง ข้อดีของการผสมแบบนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเติมแต่งและพลาสติกได้ สามารถผสมในปริมาณที่

แตกต่างกันได้ สะดวกในการทำความสะดวก ส่วนข้อเสีย คือ ผู้ใช้งานต้องมีความชำนาญในการช่วยผสมโดยปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความสม่ำเสมอในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีได้ง่ายเนื่องจากการผสมในระบบเปิด

1.2 การผสมด้วยเครื่องผสมชนิดบราเบนเดอร์ (Brabender mixing) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) จำนวนสองชุดบรรจุภายในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำร้อนหรือน้ำเย็นไหลผ่านโรเตอร์ที่หมุนสวนทางกันในห้องผสมนั้นจะให้แรงเฉือนสูง เกิดการกระจายตัวของสารเติมแต่งได้ดี ข้อดีของการผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาปฏิบัติสั้น ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน และมีความสม่ำเสมอในการผสมแต่ละครั้งแน่นอน ส่วนข้อเสีย คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก

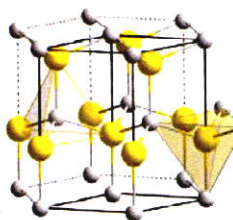
1.3 การผสมโดยการให้ความร้อน (Melt mixing) เทคนิคนี้เป็นการผสมอนุภาคนาโนกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เลือก โดยอาศัยการให้ความร้อนทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว ร่วมกับการเหวี่ยงปั่นกววน ทำให้อนุภาคนาโนสามารถกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด ประหยัดพลังงาน ไม่ต้องใช้เครื่องมือผสมราคาแพง สามารถมองเห็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ตลอด รวมถึงง่ายต่อการทำความสะอาดอุปกรณ์ เป็นต้น

2. การผสมโดยใช้ตัวทำละลาย (Solution mixing) เป็นเทคนิคที่มีการใช้ตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายที่ใช้ต้องสามารถละลายพอลิเมอร์ และทำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวได้ดี ตัวทำละลายที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ โทลูอีน คลอโรฟอร์ม ไซลีน และเตตระไฮโดรฟูราน เป็นต้น โดยเทคนิคนี้มีข้อเสีย คือ การหาตัวทำละลายที่เหมาะสมและเสถียรกับความร้อนนั้นยาก มีการตกค้างของตัวทำละลายในแผ่นวัสดุประกอบ มีการตกตะกอนของอนุภาค หรือการตกผลึกของอนุภาคก่อนเวลา นอกจากนี้การผลิตทำได้ในปริมาณน้อย

3. การผสมแบบพอลิเมอไรเซชัน (In-situ polymerization) เทคนิคนี้คล้ายกับเทคนิคการผสมโดยใช้ตัวทำละลาย แต่ต่างกันตรงที่จะใช้มอนอเมอร์เป็นตัวทำละลายและมีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมด้วย ข้อดี คือ ไม่มีตัวทำละลายตกค้าง ส่วนข้อเสีย คือ การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำได้ยาก และอาจเกิดการตกตะกอนของอนุภาคนาโนก่อนที่จะทำปฏิกิริยาเสร็จ เนื่องจากความหนืดของมอนอเมอร์มีน้อยเกินไป [24 - 25]

#### 2.7.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ละลายน้ำได้น้อยมาก มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal wurtzite) สมบัติโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ คือ มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากประมาณ 20-400 นาโนเมตร อนุภาคจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นจึงทำให้ทึบแสง สามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้ มีความจุความร้อนสูง จุดหลอมเหลวสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ การนำความร้อนสูง



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแบบ Hexagonal wurtzite ของซิงค์ออกไซด์ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลาดของซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมเคมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกระบวนการผลิตสารเคมีหลายปฏิกิริยา เช่น Alkylation, Oxidation และ Dehydrogenation เป็นสารเริ่มต้นในการผลิตสารประกอบสังกะสีตัวอื่น ๆ เช่น  $ZnCrO_4$ ,  $ZnSO_4$ ,  $ZnCl_2$ ,  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ Zinc stearate เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี สามารถต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial) รวมถึงสามารถกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์โดยทำปฏิกิริยากับโมเลกุลแอมโมเนียหรือโมเลกุลไทออลได้

ตารางที่ 2.11 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ [23]

ชื่อ	- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) - ซิงค์ (II) ออกไซด์ (Zinc (II) Oxide) - ซิงค์ไวท์ (Zinc white)
สูตรโมเลกุล	ZnO NPs
น้ำหนักโมเลกุล	81.37 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ผงของแข็งละเอียด สีขาวหรือขาวอมเหลือง ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.66 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1975 °C
ความถ่วงจำเพาะ	5.607 ที่ 20 °C
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	200 nm
พื้นที่ผิวจำเพาะ	26.22 m <sup>2</sup> /g
pH	6.95-7
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์
ความบริสุทธิ์	99.5 %

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโน [25]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อทั่วไป	Zinc Oxide
CAS NO.	1314-13-2
รหัส RTECS	ZH 4810000
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่ลุกติดไฟเมื่ออยู่ท่ามกลางเชื้อเพลิงหรือมีประกายไฟ</p> <p>การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารมีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิ และความดัน รวมถึงไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำและความชื้น</p> <p>อันตรายต่อสุขภาพ (สีฟ้า) ระดับ 1 คือ มีความเสี่ยงต่อการระคายเคืองหรือก่อให้เกิดอาการแพ้</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากเอกสารข้อมูลด้านความปลอดภัย (Material safety data sheet, MSDS) ได้ อธิบายผลกระทบของซิงค์ออกไซด์ต่อร่างกายไว้ว่า

- การสัมผัสกับผิวหนัง ไม่ส่งผลให้เกิดการคันหรือระคายเคือง
- การสัมผัสกับดวงตา ไม่ส่งผลอันตรายต่อดวงตา หากระคายเคืองสามารถล้างออกได้
- หากสูดดมหรือหายใจเข้าไป ไม่ส่งผลอันตรายใดๆ ต่อระบบทางเดินหายใจ
- หากกลืนกิน อาจส่งผลให้เกิดการคลื่นไส้หรือปวดท้องได้ [25-26]

### 2.7.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, $TiO_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม มีสูตรโมเลกุล คือ  $TiO_2$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 79.9 และเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง โดยในธรรมชาติ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของแร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) หรือแร่ลิวโซซีน (Leucocene) ซึ่งเป็น แร่สีดำชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไอออนไทเทเนต ( $FeTiO_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง ผลึกที่พบหลักๆ อยู่ 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดย โครงสร้างของอนาเทสและรูไทล์จะมีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนโครงสร้างแบบ บรูคไคท์จะมีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) [26]



รูปที่ 2.16 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคไคท์ [27]

โครงสร้างผลึกทั้งสามแบบของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อผ่านอะตอม ออกซิเจนของออกตระฮีดรอลที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไทเทเนียมออกไซด์ ( $TiO_6^{2-}$ ) โดยไอออนของ  $Ti^{4+}$  ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ  $O^{2-}$  แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตระฮีดรอลจะต่างกัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส จะมีประสิทธิภาพในการ เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ สาเหตุเนื่องมาจากการกลับมารวมตัวกัน ใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่า ดัชนีหักเห (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทส และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อสะท้อนแสง [26]

ตารางที่ 2.13 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์ [26]

ชื่อ	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไทเทเนียม แอนไฮไดรด์ (Titanium anhydride) ไทเทเนีย (Titania)
มวลโมเลกุล	79.9 g/mol
ความหนาแน่น	3.84-4.26 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1,850 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ	350 m <sup>2</sup> /g
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	200 nm
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.2 อิเล็กตรอนโวลต์

ตารางที่ 2.14 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ [28]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อทั่วไป	Titanium dioxide
CAS NO.	13463-67-7
รหัส RTECS	XR 2275000
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่ลุกติดไฟเมื่ออยู่ท่ามกลางเชื้อเพลิงหรือมีประกายไฟ</p> <p>การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารมีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิ และความดัน รวมถึงไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำและความชื้น</p> <p>อันตรายต่อสุขภาพ (สีฟ้า) ระดับ 1 คือ มีความเสี่ยงต่อการระคายเคืองหรือก่อให้เกิดอาการแพ้</p>

โดยจากเอกสารข้อมูลด้านความปลอดภัย (Material safety data sheet, MSDS) ได้อธิบายผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อร่างกายไว้ว่า

- การสัมผัสกับผิวหนัง ไม่ส่งผลให้เกิดการคันหรือระคายเคือง สามารถล้างออกได้
- การสัมผัสกับดวงตา มีความเป็นอันตรายต่ำ มีอาการคันเล็กน้อย สามารถล้างออกได้
- หากสูดดมหรือหายใจเข้าไป จะทำให้เกิดอาการคัน และอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจในระยะยาว

- หากกลืนกิน มีความเป็นอันตรายต่ำ [29 ]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.6 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO)

แคลเซียมออกไซด์ หรือปูนขาวไลม์ (Lime) มีสูตรทางเคมีคือ CaO ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยปกติแล้วจะผลิตแคลเซียมออกไซด์จากการเผาวัสดุใด ๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบ ณ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการเผาใหม่นี้ว่า Calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกมา ปูนขาวนี้สามารถทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub> ที่อยู่ในอากาศ ที่ปริมาณความร้อนและอุณหภูมิสูง โดยอาศัยระยะเวลาที่นานพอ กลับกลายเป็น CaCO<sub>3</sub> ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ [29]

ตารางที่ 2.15 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของแคลเซียมออกไซด์ [30]

ชื่อ	แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) ปูนขาว (Lime)
มวลโมเลกุล	56.08 g/mol
ความหนาแน่น	3.37 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	2,614 °C
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	200 nm
ช่องว่างแถบพลังงาน	4.49 อิเล็กตรอนโวลต์

ตารางที่ 2.16 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของแคลเซียมออกไซด์ [30]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อทั่วไป	Calcium oxide
CAS NO.	1305-78-8
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่ลุกติดไฟเมื่ออยู่ท่ามกลางเชื้อเพลิงหรือมีประกายไฟ</p> <p>การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารมีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิ และความดัน รวมถึงไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำและความชื้น</p> <p>อันตรายต่อสุขภาพ (สีฟ้า) ระดับ 1 คือ มีความเสี่ยงต่อการระคายเคืองหรือก่อให้เกิดอาการแพ้เล็กน้อย</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

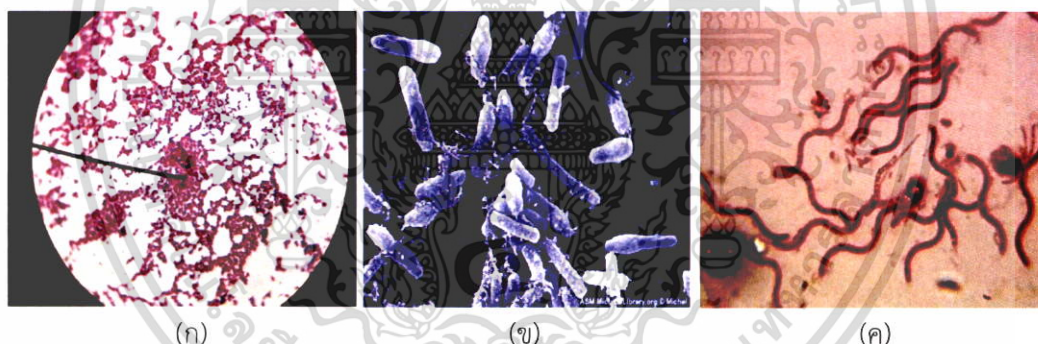
## 2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเซลล์เดียวที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ดิน น้ำ และอากาศ มีขนาดเล็กในช่วง 0.5-10 ไมโครเมตร และมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น (Microorganism) มักอยู่อาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แบคทีเรียมีบทบาทสำคัญต่ออาหาร มีทั้งชนิดที่ก่อให้เกิดโรค และไม่ก่อให้เกิดโรค โดยทั่วไปแล้วการศึกษาแบคทีเรียต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 1000 เท่า และมักอาศัยการย้อมสีเพื่อช่วยให้เห็นเซลล์หรือโครงสร้างอื่น ๆ ชัดเจนยิ่งขึ้น จากการศึกษาสามารถจำแนกรูปร่างของแบคทีเรียได้ 3 แบบ โดยมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามทิศทางการจัดเรียงตัว ดังนี้

- ทรงกลม (Coccus) เซลล์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยถ้ามีการเรียงตัวแบบหลายเซลล์จะเรียกว่า เททราด (Tetrad) แบบลูกบาศก์ เรียกว่า ซาลินา (Salina) และแบบพวงอ่งเรียกว่า สเตฟิโลคอคโค (Staphylococci)

- ทรงแท่ง (Bacillus) เซลล์ชนิดนี้จะมีการเรียงตัวแบบไม่เด่นชัดเท่ารูปร่างทรงกลม อาจมีการเรียงตัวของเซลล์จากการเจริญเติบโต และมีการจัดเรียงตัวที่แปลกแตกต่าง เช่น มีการแตกกิ่งก้านบานออกที่หัวหรือท้าย หรือมีสปอร์อยู่ภายในเซลล์ เป็นต้น

- ทรงเกลียว (Spiral) แบคทีเรียชนิดนี้มักอยู่เป็นเซลล์เดี่ยว แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งด้านความยาว จำนวนเกลียว ความแข็งแรงผนังเซลล์ บางชนิดเป็นเซลล์สั้น โค้งเล็กน้อย บางชนิดยาว และมีเกลียวหลายเกลียว [31]



รูปที่ 2.17 รูปร่างและการเรียงตัวของเซลล์แบคทีเรียชนิดต่าง ๆ (ก) แบบทรงกลม (ข) แบบแท่ง และ (ค) แบบเกลียว

### 2.8.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบโพรคาริโอต (Prokaryotic cell) เป็นรูปแบบเซลล์ที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีนิวเคลียส มีเพียงบริเวณที่สารพันธุกรรมไปรวมตัวกันอยู่หนาแน่น เซลล์ของแบคทีเรียมีโครงสร้างต่าง ๆ ที่มีสมบัติค่อนข้างจำเพาะแตกต่างจากจุลินทรีย์ชนิดอื่น โดยประกอบด้วย

- ส่วนของรยางค์ที่ยื่นออกนอกเซลล์ (Appendages) ประกอบด้วย แฟล็กเจลลา (Flagella) พิล (Pili) และฟิมเบเลีย (Fimbriae)

- ส่วนห่อหุ้มเซลล์ (Cell envelope) ประกอบด้วย ชั้นของพอลิแซคคาไรด์ เรียกว่า ไกลโคคาลิกซ์ (Glycocalyx) และผนังเซลล์ (Cell wall) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1.1 ความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์แบคทีเรีย

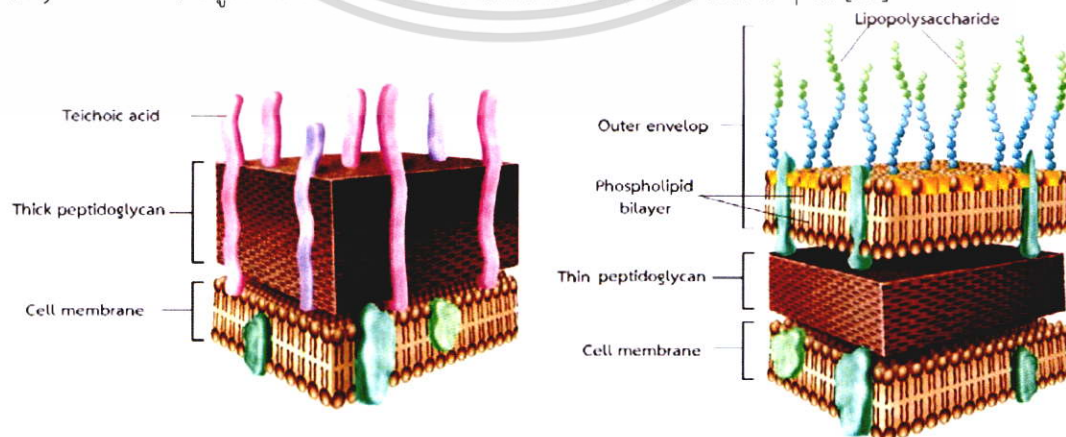
การย้อมสีเซลล์แบคทีเรีย เป็นวิธีที่ใช้บ่งบอกความแตกต่างของโครงสร้างของผนังเซลล์ได้ดี โดยจากการย้อมจะสามารถแบ่งแบคทีเรียออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามปฏิกิริยาการติดสี ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ จำแนกความแตกต่างได้ดังตารางที่ 2.17 [32-33]

ตารางที่ 2.17 ความแตกต่างของเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ [32]

ส่วนประกอบ	แบคทีเรียแกรมบวก	แบคทีเรียแกรมลบ
กรดอะมิโน	อะลานีน กรดกลูตามิก ไลซีน และกรดโตอะมิโนพิเมลลิก	ส่วนใหญ่เป็นกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบของโปรตีน
ปริมาณของชั้นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan)	60-100%	5-20%
ปริมาณลิพิด (Lipid)	0.2%	10-20%
สารพอลิแซคคาไรด์	35-60%	15-20%
ความหนา	20-80 นาโนเมตร	10 นาโนเมตร
กรดทีโคอิก (Teichoic acid)	บางชนิดมี	ไม่มี
ผนังเซลล์	1 ชั้น	2 ชั้น

แบคทีเรียแกรมบวก มีผนังเซลล์หนาประมาณ 20-80 นาโนเมตร ซึ่งหนากว่าแกรมลบ และคิดเป็น 20-40% ของน้ำหนักเซลล์เมื่อทำให้แห้ง ประกอบด้วยสารประกอบลิโปโปรตีน (Lipoprotein) ลิพอพอลิแซคคาไรด์ (Lipopolysaccharide) และกรดไทโคอิก (Teichoic acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.18

แบคทีเรียแกรมบวก แตกต่างจากแบคทีเรียแกรมลบ คือ แบคทีเรียแกรมบวกมีปริมาณเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ในผนังเซลล์มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ แต่มีปริมาณไขมันที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์น้อยกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ดังนั้นความแตกต่างนี้จึงทำให้แบคทีเรียแกรมบวกติดสีม่วงเมื่อมีการย้อมสีแกรม เนื่องจากในขั้นตอนที่มีการล้างสี (Decolorization) ด้วยแอลกอฮอล์ ความหนาของชั้นเพปทิโดไกลแคนที่มากทำให้แอลกอฮอล์ไม่สามารถแทรกเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกได้จึงทำให้แบคทีเรียแกรมบวกยังคงติดสีม่วงของคริสทัลไวโอเลต (Crystal violet) อยู่ในผนังเซลล์ ทำให้มีความทนต่อสารดีเทอร์เจนต์ต่าง ๆ ได้ [33]



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1.2 *Staphylococcus aureus*

จัดเป็นแบคทีเรียก่อโรค (Pathogen) ที่สำคัญและพบบ่อยในอาหาร แบคทีเรียชนิดนี้ ย้อมติดสีแกรมบวก (Gram positive bacteria) มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Coccus) อยู่รวมกันเป็น พวงคล้ายพวงองุ่น ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนไหว ส่วนใหญ่ไม่มีแคปซูล และในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะสลายน้ำตาลกลูโคสให้กรดอินทรีย์ เจริญได้ในที่มีอากาศและไม่มีอากาศ แต่จะเจริญได้ดีกว่าใน สภาวะที่มีอากาศ โดยโรคที่เกิดจากการติดเชื้อของแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* ได้แก่

- โรค Furuncle หรือฝีที่เกิดจากการติดเชื้อตามรูขุมขน เช่น ตาตุ้ม
- โรค Carbuncle หรือ ฝีผุกบัว
- โรค Staphylococcus food poisoning การปนเปื้อนของสารพิษในอาหาร [33]

### 2.8.1.3 *Escherichia coli*

จัดเป็นแบคทีเรียแกรมลบรูปร่างเป็นแท่ง (Gram negative rod) อยู่ในกลุ่มเอ็นเทอโร-แบคทีเรียซี (Family Enterobacteriaceae) ปกติอาศัยอยู่ในลำไส้ของ คนและสัตว์เลือดอุ่น พบเป็น จำนวนมากในอุจจาระ แต่ไม่พบในปัสสาวะ ด้วยเหตุนี้ทำให้ *E.coli* มีความสำคัญ ในการตรวจเชื้อ เพื่อควบคุมคุณภาพของอาหารและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) ที่บ่งบอกว่า ผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของสิ่งปนเปื้อนหรือไม่ เชื้อ *E.coli* ทำให้เกิดการติดเชื้อโดยสามารถเกาะกับ ผนังเซลล์ของอวัยวะส่วนต่าง ๆ เช่น ไต กระเพาะปัสสาวะ และจะสร้างสารช่วยในการยึดเกาะให้เชื้อ อยู่ในบริเวณนั้นได้ จากนั้นจะสร้างสารต่าง ๆ ออกมาเพื่อทำลายเซลล์ ก่อให้เกิดโรคติดเชื้อขึ้น เชื้อ *E.coli* ทำให้เกิดกลุ่มอาการที่สำคัญและพบได้บ่อย คือ การติดเชื้อที่ทางเดินปัสสาวะ เยื่อหุ้มสมอง อักเสบในทารก และท้องร่วง [33]

## 2.9 กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรียของสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. ผนังเซลล์ (Cell wall) โดยออกฤทธิ์ที่ระดับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย โดยทำปฏิกิริยากับเซลล์ ออแกนิกในผนังเซลล์ รบกวนระบบเมทาบอลิซึม ทำให้ผนังเซลล์ไม่แข็งแรง ไม่สามารถทนทานต่อ ความดันของสภาพแวดล้อมภายนอกเซลล์ได้ ผนังเซลล์จะบางลง หรืออาจเกิดรูและส่งผลให้เซลล์ แตกได้ในที่สุด

2. เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) โดยเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียประกอบด้วยชั้นโปรตีน- ลิพิด-โปรตีน (Protein-Lipid-Protein) มีผลทำให้กลไกการควบคุมการเข้าออกของสารต่าง ๆ ผ่าน เยื่อหุ้มเซลล์เสียไป สารต้านทานเชื้อแบคทีเรียจะไปแทรกกระหว่างโปรตีนกับลิพิด ส่งผลให้เยื่อหุ้ม เซลล์เสียหาย สารในไซโตพลาสซึมจึงไหลออกมา ทำให้เซลล์แบคทีเรียตายในที่สุด

3. สารสังเคราะห์ไนโซโตพลาสซึม

- ทำลายระบบดีเอ็นเอ (DNA) เนื่องจากดีเอ็นเอเป็นสารพันธุกรรมในแบคทีเรีย ประกอบไป ด้วยสายพอลินิวคลีโอไทด์ (Polynucleotide) โดยทั่วไปจะยับยั้งการนำไทมีน (Thymine) ที่เข้าจับ กับนิวคลีโอไทด์ ทำให้การสร้างดีเอ็นเอไม่สมบูรณ์

- ทำลายระบบอาร์เอ็นเอ (RNA) โดยอาร์เอ็นเอจะเป็นตัวกลางที่ส่งผ่านรหัสพันธุกรรมจากดี เอ็นเอ หากมีการขัดขวางการทำงานของอาร์เอ็นเอ ส่งผลให้ไม่สามารถไปจับคู่กับโปรตีนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำลายการสังเคราะห์โปรตีน โดยยับยั้งการการสร้างโปรตีนที่ไรโบโซม (Ribosome) ซึ่งเป็นบริเวณที่เอ็มอาร์เอ็นเอ (m-RNA) มาเกาะอยู่เพื่อทำการแปลรหัส ส่งผลให้โครงสร้างโปรตีนเปลี่ยนไป [32, 34]

## 2.10 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปพลาสติไซเซอร์มักเป็นของเหลวที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ ใช้เติมลงไปในช่วงกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ เพื่อทำให้เกิดการอ่อนตัวและยืดหยุ่นได้ดีขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลและช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น

สำหรับในพอลิเมอร์ชีวภาพทั่วไปโดยเฉพาะแป้ง จะมีโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงมาก แป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก หากให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แป้งจะเกิดการไหม้และสลายไปแทนที่จะเกิดการหลอม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป แป้งจึงจะสามารถเกิดการหลอมได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงเชิงกล และสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ [34]

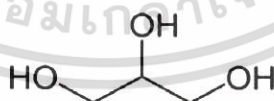
### 2.10.1 สมบัติทางอุดมคติของพลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ที่ดีควรมีสมบัติ ดังนี้

- มีความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ที่ดีกับพอลิเมอร์
- มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีความสามารถในการระเหยต่ำ
- ไม่มีความเป็นพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่สามารถติดไฟได้
- หาได้ง่าย และราคาถูก [34]

### 2.10.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติเด่น คือ ไม่มีพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถละลายน้ำได้ดี [35]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล [35]

ตารางที่ 2.18 สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล [35]


สมบัติ	ข้อมูล
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะ	ของเหลวหนืด
สีและกลิ่น	ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
จุดหลอมเหลว	17.9 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.18 (ต่อ) สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล [35]

จุดเดือด	290 °C
การละลายในน้ำ	ละลายได้ดี
การละลายในอีเทอร์	ไม่ละลาย
pH	5 ที่ 20 °C

ตารางที่ 2.19 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลีเซอรอล [36]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	Propane-1,2,3-Triol
ชื่อเคมีทั่วไป	Glycerol, Glycerine
CAS NO.	56-81-5
รหัส RTECS	MA 8050000
ดัชนี NFPA	 <p>ความไวไฟ (บน) ระดับ 1 คือ สารที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิ 815.5 °C เป็นเวลา 5 นาที หรือน้อยกว่า จึงจะลุกติดไฟ            การเกิดปฏิกิริยา (ขวา) ระดับ 0 คือ สารซึ่งปกติจะมีความเสถียร แต่จะเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัว เมื่อสัมผัสกับอากาศ แสง หรือความชื้น            อันตรายต่อสุขภาพ (ซ้าย) ระดับ 1 คือ สารที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย แต่มีความเสี่ยงต่อการระคายเคืองและอาการแพ้เล็กน้อย</p>

จากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (MSDS) ระบุผลกระทบต่อกลีเซอรอลต่อร่างกายมนุษย์ในระยะสั้นไว้ว่า

- หากสัมผัสโดนผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย
- หากสัมผัสถูกตา จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา
- หากกลืนกินเข้าไป อาจทำให้คลื่นไส้ ปวดศีรษะหรืออาเจียนได้
- หากหายใจเอาไอระเหยเข้าไปในระยะเวลานาน อาจเกิดการทำลายไต รวมถึงระบบทางเดินอาหารได้ [36]

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กชิตติ อัมประไพ และคณะ ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโคได้จากแป้งแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้น เตรียมฟิล์มโดยใช้แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) และฟิล์มแป้งข้าวเจ้า (Rice starch) ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 (แป้ง 5, 10 และ 15 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร) ปั่นกวนแป้งจนสุกบนเตาให้ความร้อน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นนำไปทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเติมพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปั่นกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยเทลงบนภาชนะเคลือบ ทำให้แห้งด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ได้แก่ ความขุ่น (Opacity) การซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีความใส มันวาว ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะขุ่น โปร่งแสง ด้านหนึ่งเรียบมันวาวอีกด้านหนึ่งไม่มันวาว เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่มีการพองตัวสองชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในโมเลกุลเม็ดแป้งที่ต่างกัน คือ บริเวณเปลือกและบริเวณออสติออนของเม็ดแป้ง มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำ เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง จึงเกิดโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรง ส่งผลให้การละลายน้ำและอัตราการซึมผ่านไอน้ำจึงต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังยังมีความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงกว่า เนื่องจากปริมาณของอะไมโลสมีน้อยกว่า การจัดเรียงแพ็คตัวเป็นผลึกซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงจึงน้อยกว่า [2]

**X. Ma และคณะ** ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มห่ออาหารย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วที่ทำกรดชนิดทริกที่ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง 100 กรัม ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ 30 เปอร์เซ็นต์และใช้น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ศึกษาผลของชนิดของแป้งที่มีผลต่อสมบัติโดยรวมของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีด (Screw extrusion) จากผลการทดลองพบว่าการใช้กรดชนิดทริกทำให้หมู่คาร์บอกซิลิกจากกรดเกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลจากโมเลกุลแป้งผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และผลจากการศึกษาเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นและค่าการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าการใส่สารเชื่อมโยงกรดชนิดทริกมีผลทำให้ปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่วัดได้มีค่าลดลง สำหรับในด้านของการศึกษาชนิดของแป้งพบว่าชิ้นงานจากแป้งข้าวเจ้ามีค่าความเป็นผลึก ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าชิ้นงานจากแป้งถั่ว แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของแป้งข้าวเจ้าจะมีแนวโน้มต่ำกว่า เนื่องจากขนาดของอนุภาคภายในแป้งข้าวเจ้าและปริมาณอะไมโลสที่แสดงลักษณะความเป็นผลึกมีมากกว่า [3]

**จินตภา แต้มสีคราม และคณะ** ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเชื่อมโยงด้วยกรดต่างชนิดกัน ได้แก่ กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิก ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ใช้กลีเซอรอล 15% โดยน้ำหนัก ผสมสารละลายทั้งหมดพร้อมทั้งให้ความร้อนและปั่นกวน จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อ จากผลการทดลอง พบว่าการใช้กรดทั้ง 3 ชนิดเป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้น โดยให้ค่าต่ำสุดในชิ้นงานฟิล์มแป้งที่ปรับปรุงด้วยกรดชนิดทริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าการเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงกรดที่ใช้ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง และพบว่าฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดชนิดทริกมีเสถียรภาพทางความร้อนดีที่สุด รองลงมาคือกรดมาลิกและกรดแลคติก นอกจากนี้จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า การเพิ่มปริมาณกรดส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้น และจากผลของชนิดของกรด พบว่ากรดชนิดทริกมีผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมากที่สุด รองลงมาคือกรดมาลิกและกรดแลคติก ตามลำดับ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**C. Menzel และคณะ** ทำการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันฝรั่งที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก เตรียมโดยนำแป้งมันฝรั่งมาผสมกับกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการปั่นกวนโดยให้ความร้อนและขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อขึ้นรูป จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเกิดการเชื่อมโยงผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดซิตริก ผลจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เติมลงไปพบว่ามวลโมเลกุลของแป้งมีค่ามากขึ้น มีสมบัติการละลายน้ำลดลง มีสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำมากขึ้น และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น [5]

**A. Akhavan และคณะ** ได้ทำการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มวัสดุประกอบจากแป้งที่มีการเชื่อมโยงด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์นาโนคอมโพสิตสำหรับการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ห่ออาหาร ทำโดยเตรียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) ผ่านเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำมาผสมกับแป้งมันฝรั่งและ PVA ในอัตราส่วนแป้งต่อ PVA เป็น 62 ต่อ 38 โดย PVA ในรูปสารละลาย เตรียมโดย PVA 2.5 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร นำของผสมปั่นกวนด้วยความเร็วสูง 6000 rpm แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อขึ้นรูป จากการตรวจวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาพบว่าซิงค์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์แป้งและ PVA และจากผลการตรวจโครงสร้างและหาหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR พบว่า มีการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างซิงค์ออกไซด์กับแป้งที่ผสม PVA ที่เลขคลื่นประมาณ  $470-520\text{ cm}^{-1}$  และผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าปริมาณของอนุภาคเสริมแรง คือ ซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มวัสดุประกอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ผลจากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์พบว่าสามารถต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ โดยมีประสิทธิภาพสูง 94.4% ในฟิล์มวัสดุประกอบที่มีซิงค์ออกไซด์ 1% โดยน้ำหนัก [7]

**J.J. Zhou และคณะ** ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติเฉพาะของฟิล์มวัสดุประกอบย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเวย์โปรตีน (Whey protein) โดยมีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน ( $TiO_2$  NPs) เป็นส่วนเสริมแรง เพื่อนำไปใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์จากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายได้ยาก ทำการเตรียมโดยใช้เวย์โปรตีน 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออน เดิมกลีเซอรอล 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}C$  เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5 - 4% โดยน้ำหนัก นำฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีพีคเอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในฟิล์มวัสดุประกอบเด่นชัดมากขึ้นจากปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากข้อมูลบ่งบอกได้ว่ามีรูปแบบผลึกตรงกับผลึกชนิดอนาเทส (Anatase) โดยมีขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 80 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยา (SEM) ซึ่งให้ผลว่ามีความขรุขระของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จากปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง โดยมีค่าตั้งแต่ 2.38 - 1.78 MPa และ 54.08 - 12.14 % ตามลำดับ แต่จะทำให้สมบัติการต้านทานต่อความชื้นลดลง นอกจากนี้จากการทดสอบสมบัติทางแสงผ่านยูวีสเปกโตรสโคปี สามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มวัสดุประกอบสามารถใช้เร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ โดยในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการทดสอบสมบัติดังกล่าวต่อเชื้อจุลชีพแต่อย่างใด [23]

R. Nassiri และ A.M. Nafchi ได้ศึกษาสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพและสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP testing) และการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจากฟิล์มวัสดุประกอบเจลาติน (Bovine gelatin) ที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน โดยใช้ซอร์บิทอล (Sorbitol) และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ผสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ทางเภสัชกรรมและบรรจุภัณฑ์ห่ออาหาร โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 5% โดยน้ำหนักของของแข็ง ผสมกับสารละลายเจลาติน 8% โดยน้ำหนัก เติมอัตราส่วนพลาสติกไซเซอร์ผสมซอร์บิทอลต่อกลีเซอรอล 3 ต่อ 1 ที่ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก นำฟิล์มที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่า การซึมผ่านของไอน้ำที่มีต่อฟิล์มลดลงเมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคขนาดนาโนทำให้ลดการซึมผ่านของน้ำได้เมื่อเปรียบเทียบกับเจลาตินเมทริกซ์บริสุทธิ์ เช่นเดียวกับผลสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกัน จากความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี (Photocatalytic) สามารถเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) หรือประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide anion) ซึ่งสารตระกูลดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียได้ โดยสามารถต้านทานได้สูงสุดในตัวอย่างที่มีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่า 84% ในแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* และ 76.5% ในแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* เป็นต้น [38]

A.M. Nafchi และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งสาคุ (Sago starch) ผสมเจลาติน (Bovine gelatin) ใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างซอร์บิทอลและกลีเซอรอล และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์นาโนโรด (ZnO nanorod) เตรียมโดยนำซิงค์ออกไซด์นาโนโรด ที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 1, 2, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับแป้งสาคุ 4% โดยน้ำหนัก และเจลาติน 8% โดยน้ำหนัก เติมพลาสติกไซเซอร์ผสมซอร์บิทอลและกลีเซอรอลในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ในปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก จากการหาปริมาณความชื้นในฟิล์ม พบว่าปริมาณซิงค์ออกไซด์นาโนโรดที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นในฟิล์มลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดนาโนไปแทรกอยู่ในช่องว่างในโมเลกุลแป้งส่งผลให้พื้นที่ที่น้ำเข้ามาแทรกลดน้อยลง และผลจากสมบัติเชิงกล พบว่า แป้งสาคุที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์นาโนโรดมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าเจลาตินที่เติมซิงค์ออกไซด์นาโนโรด แต่มีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่า เมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์นาโนโรดเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับมอดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) ในทางกลับกันเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มลดลงจากการมีซิงค์ออกไซด์นาโนโรดเป็นอนุภาคของแข็งขัดขวางอยู่ภายใน และจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน พบว่าแป้งสาคุและซิงค์ออกไซด์นาโนโรดไม่มีการสร้างพันธะใหม่ มีเพียงแรงทางกายภาพ (Physical interaction) อ่อนๆ เท่านั้น ทางด้านผลจากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพประเภทแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* พบว่า ฟิล์มตัวอย่างที่มีอนุภาคของแข็ง 5% โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานได้สูง 80% เนื่องด้วยสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V.D Alves และคณะ ได้ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อแป้งมันสำปะหลังที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลฟิล์มที่เตรียมได้ โดยปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้ คือ 5, 20, 32.5 และ 45 กรัม ต่อน้ำหนักแป้ง 100 กรัม และใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อขึ้นรูป ทำการตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ ความเครียด ณ จุดขาด พบว่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้ความเค้น ณ จุดขาดและมอดุลัสลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอล ให้ผลตรงกันข้ามกับสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอล เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมกลีเซอรอลให้เข้าไปแทรกอยู่ในโครงร่างตาข่ายระหว่างสายโซ่ เมทริกซ์จึงมีช่องว่างมากขึ้น เมื่อมีแรงมากระทำทำให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำออกลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งมีช่องว่างเพิ่มมากขึ้น สามารถดูดซับโมเลกุลน้ำเข้ามาในโมเลกุลได้มากขึ้น [41]

V.K. Kotharagannagari และคณะ ทำการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพจากแป้งและกรดอะมิโน สำหรับนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์ห่ออาหาร โดยใช้อนุภาคซิงค์ออกไซด์นาโนเป็นอนุภาคเสริมแรง เพื่อให้แป้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ลดความสามารถในการละลายน้ำและความว่องไวต่อความชื้นลง โดยแป้งที่นำมาทดลองนี้ คือ แป้งข้าวเจ้า ซึ่งเป็นแป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีปริมาณอะไมโลสสูง และใช้กรดอะมิโนไลซีนเชื่อมขวางโมเลกุลของแป้ง ทำการเตรียมโดยใช้แป้งปริมาณตั้งแต่ 3.75–4.00 กรัม ผสมกับไลซีน 1 กรัม ผสมและปั่นกวนที่ 55 °C จากนั้นเติมซิงค์ออกไซด์นาโนปริมาณตั้งแต่ 0–5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมวลรวม 5 กรัม แล้วเพิ่มอุณหภูมิในการผสมเป็น 90 °C และรอบการปั่นกวน 450 rpm เสร็จแล้วทำการหล่อฟิล์มด้วยวิธีหล่อขึ้นรูป จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในฟิล์มวัสดุประกอบ รวมทั้งให้สีขาวที่ฟิล์มมากขึ้น จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าจากการใส่ซิงค์ออกไซด์นาโน ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นตามปริมาณของซิงค์ออกไซด์นาโนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นอนุภาคของแข็งอนินทรีย์ที่มีความเสถียร มีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นสูง และจากการทดสอบสมบัติเชิงกล การใส่ซิงค์ออกไซด์นาโนช่วยเพิ่มมอดุลัสของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าในช่วง 34.32–96.55 MPa และลดเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 42–13 MPa [53]

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

1. แป้งข้าวเจ้า ตราช้างสามเศียร จากบริษัท โรงเส้นหมี่ขอเฮง จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า ตราช้างสามเศียร

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% w/w)
อะไมโลส	26.50
อะไมโลเพกติน	72.12
โปรตีน	0.50
ไขมัน	0.45
เถ้า	0.32
ความชื้น	0.11

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กรดซิตริก (Citric acid  $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของกรดซิตริก

Item	Unit	Standard data	Actual data
Description	-	Colorless crystal, White	As standard
Identification & Solubility	-	Pass test	Pass test
Readily carbonisable substances	-	Pass test	Pass test
Evaluation of insoluble	-	Pass test	Past test
Oder	-	Pass test	Pass test
Barium	%	Pass test	Pass test
Content	%	99.50 - 101.00	99.78
Water	%	7.5 - 9.0	8.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) องค์ประกอบของกรดซิตริก

Item	Unit	Standard data	Actual data
Heavy metal (As, Pb)	PPM	≤5	2
Oxalate	PPM	≤ 350	-
Aluminium	PPM	≤ 0.2	0.15
Iron	PPM	≤ 50	2
Arsenic	PPM	≤ 1.0	0.3
Mercury	PPM	≤ 1.0	0.24
Lead	PPM	≤ 0.5	0.2
Bacterial endotoxins	I.U./MG	≤ 0.5	0.3
Sulphated ask	%	≤ 0.1	0.03
Chloride	PPM	≤ 50	3
Calcium	PPM	≤ 200	4
Sulphate	PPM	≤ 150	40

3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba reagent Co., Ltd.
4. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO<sub>2</sub>) ขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba reagent Co., Ltd.
5. แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba reagent Co., Ltd.
6. โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate, NaNO<sub>3</sub>) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
7. กลีเซอรอล (Glycerol, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system Co., Ltd.
8. น้ำกลั่น (Distilled water)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วและบริพันธ์
2. เตาให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น C-MAG HS7 5000 จากบริษัท IKA Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น ML3002 จากบริษัท Mettler Toledo Co., Ltd.
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น ULM 600/I จากบริษัท MEMMERT Co., Ltd.
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น QC-536M1 จากบริษัท Comotech Testing Machine Co., Ltd.
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM รุ่น JSM-5410 จากบริษัท Jeol Co., Ltd.
7. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Pyris 1 จากบริษัท Perkin Elmer Co., Ltd.
8. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance จากบริษัท Bruker Co., Ltd.
9. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrum Photometer, IR) รุ่น Spectrum 200 GX Spectrometer
10. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonication) รุ่น WiseClean จากบริษัท Wisd Co., Ltd.

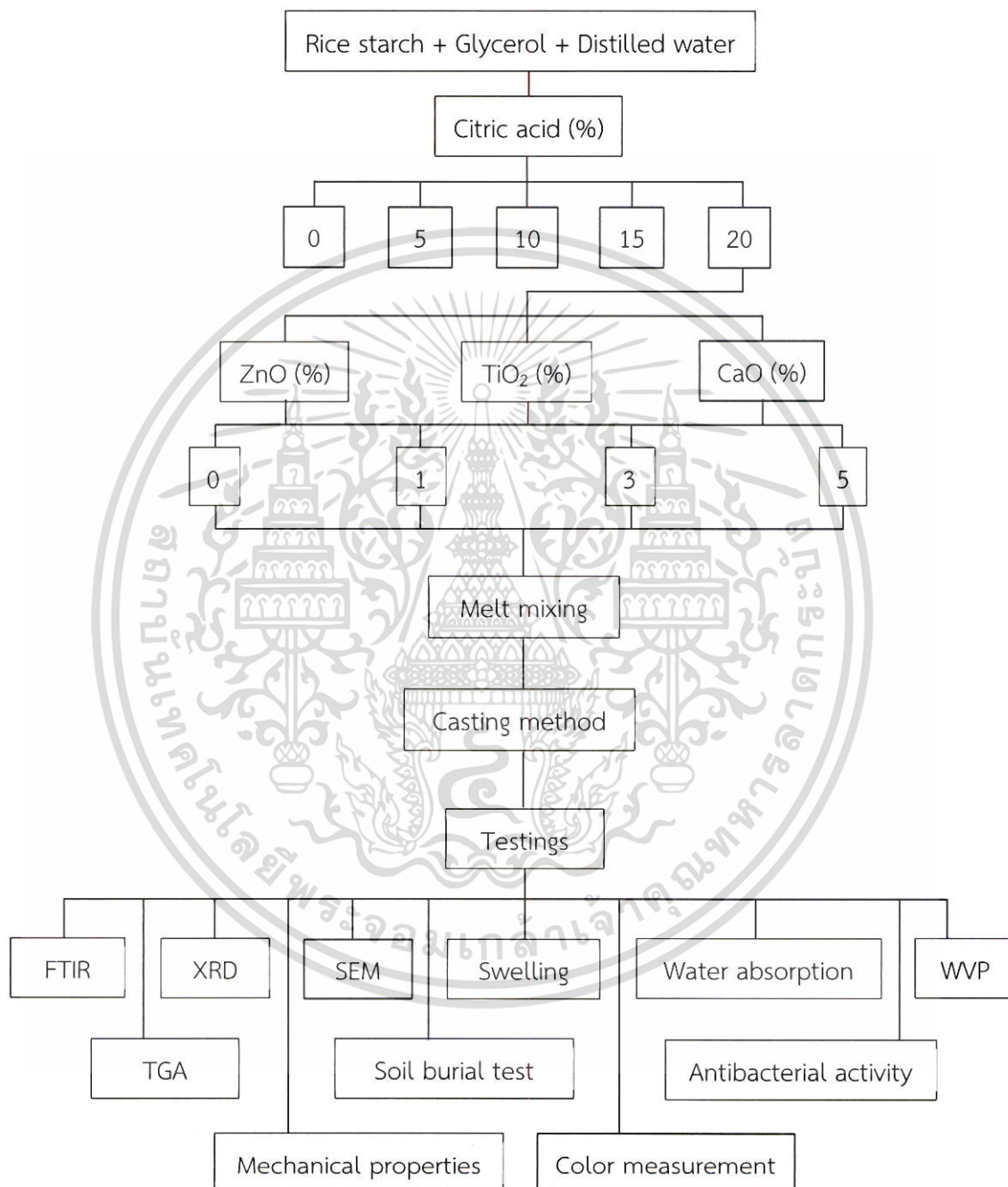


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 เค้าโครงการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานสำหรับงานวิจัยนี้ แสดงได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้า

ทำการเตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมโยง ใช้โลหะออกไซด์เป็นส่วนเสริมแรง และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ แสดงอัตราส่วนในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของวัสดุประกอบ

สูตร	แป้งข้าวเจ้า (กรัม)	กรดซิตริก (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ZnO/TiO <sub>2</sub> /CaO
					(กรัม)
Native RS	7.00	0	2.10	70	0
RS-CA5%	7.00	0.35	2.10	70	0
RS-CA10%	7.00	0.70	2.10	70	0
RS-CA15%	7.00	1.05	2.10	70	0
RS-CA20%	7.00	1.40	2.10	70	0
RS-CA20-ZnO1%	7.00	1.40	2.10	70	0.07
RS-CA20-ZnO3%	7.00	1.40	2.10	70	0.21
RS-CA20-ZnO5%	7.00	1.40	2.10	70	0.35
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	7.00	1.40	2.10	70	0.07
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	7.00	1.40	2.10	70	0.21
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	7.00	1.40	2.10	70	0.35
RS-CA20-CaO1%	7.00	1.40	2.10	70	0.07
RS-CA20-CaO3%	7.00	1.40	2.10	70	0.21
RS-CA20-CaO5%	7.00	1.40	2.10	70	0.35

1) ชั่งน้ำหนักแป้งข้าวเจ้า และกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือ 2.10 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) ตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ตามลงไปบีกเกอร์ ใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวนขนาด 4 เซนติเมตร (Magnetic bar) จากนั้นนำบีกเกอร์ของผสมไปวางบนเตาให้ความร้อน ตั้งอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิโดยเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่  $78 \pm 2$  องศาเซลเซียส พร้อมกับปั่นกวนที่รอบการปั่นกวน 450 rpm [53]

3) นำบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ใส่ซึ่งค็อกออกไซด์หรือไทเทเนียมไดออกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์ ตามอัตราส่วนดังตาราง เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนละลายเข้ากัน จากนั้นนำไปวางในเครื่องอัลตราโซนิกจนกระทั่งอุณหภูมิเกิดการกระจายตัว ประมาณ 10 นาที

4) นำบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ใส่กรดซิตริกตามอัตราส่วนดังตาราง แกว่งให้สารละลายเข้ากัน แล้วพักไว้

5) นำบีกเกอร์ที่เตรียมได้ในข้อ 3) เทลงในบีกเกอร์ของผสมในข้อ 2) จากนั้นให้ความร้อนจนสารละลายใกล้เกิดการเจลาติไนเซชัน จากนั้นยกลงออกจากเตาให้ความร้อน

6) นำบีกเกอร์กรดซัลฟิวริกที่ละลายเข้ากันแล้วในข้อ 4) เทลงบีกเกอร์ในข้อ 5) อย่างช้า ๆ พร้อมกับทำการคนด้วยแท่งแก้วจนเข้ากันเป็นเวลา 3 นาที [4]

7) เทของผสมลงในภาตหล่อขึ้นรูปพลาสติกที่ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว เกลี่ยสารละลายให้สม่ำเสมอทั่วทั้งภาต

8) ชั่งน้ำหนักของผสมภายในภาต โดยกำหนดให้น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ  $65 \pm 2$  กรัม เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มให้สม่ำเสมอทุก ๆ ตัวอย่าง

9) นำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง หรือจนกว่าฟิล์มจะแห้งสนิท

10) เมื่ออบครบกำหนดจนฟิล์มแห้งสนิทดีแล้ว นำมาอบต่อที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์

11) นำออกจากตู้อบลมร้อน พักไว้ให้เกิดการเย็นตัวแล้วจึงลอกฟิล์มออกจากภาต แล้วนำไปเก็บไว้ในถุงซิปล็อกที่อยู่ในเดซิเคเตอร์ เพื่อป้องกันการดูดความชื้นของชิ้นงานฟิล์ม

หมายเหตุ

- ได้ทำการศึกษาปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักแบ่งขั้วเจ้า พบว่าฟิล์มแบ่งขั้วเจ้าที่ขึ้นรูปได้มีความหนาที่ไม่แน่นอนและมีลักษณะไม่คงตัว จึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อ
- ได้ทำการศึกษาปริมาณของโลหะออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักแบ่งขั้วเจ้า พบว่าฟิล์มมีปริมาณของโลหะออกไซด์จับตัวกันที่ผิวของฟิล์มอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงไม่ได้ศึกษาต่อ

### 3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

#### 3.4.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ทำโดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างนำไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวเป็นแผ่นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว 0.2-0.5 กรัม นำใส่ลงในแม่พิมพ์และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^4$  kg/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์และนำไปวิเคราะห์ที่ช่วงเลขคลื่นเท่ากับ 400-4000 cm<sup>-1</sup> โดยทำการสแกน 16 ครั้งต่อตัวอย่าง ที่ความละเอียด 4 cm<sup>-1</sup>

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

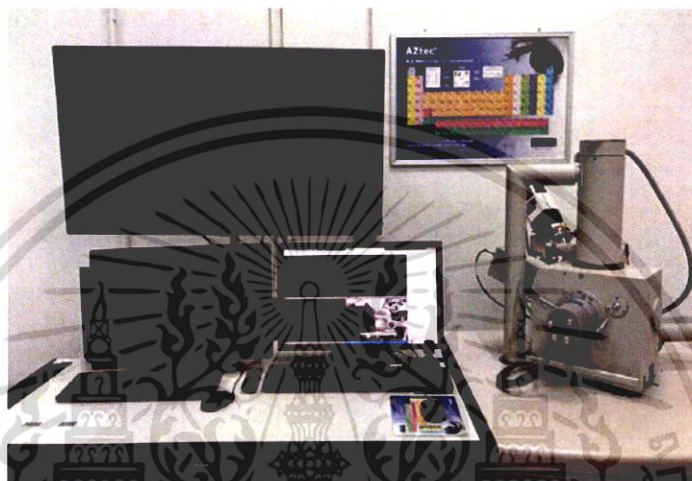
วิเคราะห์หาปริมาณผลึกของชิ้นงานตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่าง ๆ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ CuK $\alpha$  (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54 อังสตรอม) และใช้ขนาดของมุมตกกระทบสำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด (Net area) คือ  $2\theta = 5-60^\circ$  และสำหรับพื้นที่ที่สนใจ (Raw area) คือ  $2\theta = 10-30^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว 1°C/นาที โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%Crystallinity = (\text{Raw area} / \text{Net area}) \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะของภาคตัดขวางของชิ้นงานแบ่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำชิ้นงานมาหักในไนโตรเจนเหลว จากนั้นเคลือบทองคำก่อนนำเข้าเครื่องทดสอบ เพื่อศึกษาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงและวัสดุเสริมแรงชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.4.4 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

ในการศึกษาการบวมตัวทำได้โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด  $1 \times 1$  นิ้ว สูตรละ 3 ชิ้นงาน ชั่งน้ำหนักชิ้นงานและน้ำหนักของตะแกรงลวดปิดขนาด 200 เมช (Mesh) โดยละเอียด (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่น โดยวางในตะแกรงลวดปิดที่อุณหภูมิห้อง โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง และชั่งอีกครั้งที่ 72 ชั่วโมง โดยก่อนนำไปชั่งน้ำหนักให้ซับน้ำออกจากแผ่นฟิล์มให้หมดด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0 จากนั้นนำไปคำนวณร้อยละการบวมตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%Swelling = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดลอง

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

### 3.4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

การหาปริมาณการดูดซับความชื้น ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E104 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด  $2.5 \times 2.5$  เซนติเมตร จำนวนสูตรละ 2 ชิ้นงาน แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งความชื้นในชิ้นงานหมดไปหรือจนกระทั่งชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนักไว้ แล้วจึงนำชิ้นงานไปวางในภาชนะปิดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมตัวด้วยน้ำกลั่น ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 100 % เป็นเวลา 21 วัน โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$W_a (\%) = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $W_a$  คือ ร้อยละการดูดซับน้ำ  
 $W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดลอง  
 $W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

#### 3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ

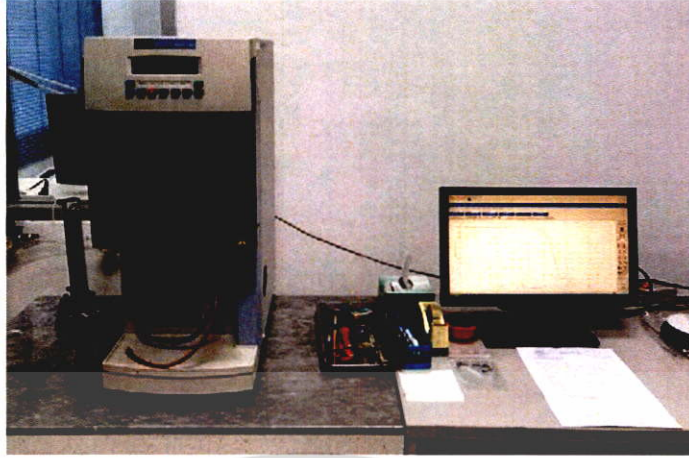
ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Rate of water vapor permeability, WVP) คืออัตราการซึมผ่านไอน้ำที่ผ่านหนึ่งของพื้นที่หรือความหนาของตัวอย่างต่อเวลา วัดจากค่าความแตกต่างของน้ำหนักภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน มีหน่วยเป็นกรัม·มิลลิเมตรต่อตารางเมตร·วัน·กิโลปาสกาล ทดสอบโดยใช้วิธี Desiccant method ตามมาตรฐาน ASTM E 96 ทำการทดสอบโดยการตัดฟิล์มเป็นวงกลมให้มีพื้นที่ประมาณ 7 ตารางเซนติเมตร ให้พอดีกับปากถ้วย วางปิดผนึกลงบนถ้วยที่บรรจุซิลิกาเจล 10 กรัมด้วยพาราฟิน แล้วนำไปวางไว้ในเดซิเคเตอร์โดยมี NaCl ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75% ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักถ้วยซิลิกาเจลทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$WVP = W \times X / A \times t \times \Delta P \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $W$  = ความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม)  
 $t$  = เวลาที่น้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง (วัน)  
 $\Delta P$  = ความแตกต่างของความดันไอ (75 MPa)  
 $X$  = ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานฟิล์ม (มิลลิเมตร)  
 $A$  = พื้นที่ผิวทั้งหมดของฟิล์ม ( $32.15 \times 10^{-3}$  ตารางเมตร)  
 $WVP$  = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม·มิลลิเมตรต่อตารางเมตร·วัน·กิโลปาสกาล)

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

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน เตรียมตัวอย่างโดยการบดแบ่งให้เป็นผงละเอียด จากนั้นตักใส่ในพาน (Pan) ที่เชื่อมต่อด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและละเอียดสูง เริ่มการวิเคราะห์โดยทำการให้ความร้อนตั้งแต่ 50-600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

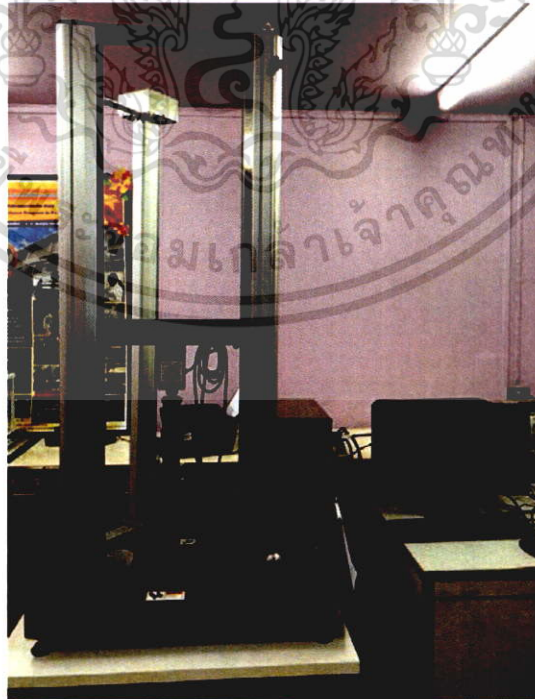


รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน

#### 3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ASTM D882-02 ที่อุณหภูมิตั้งที่ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% โดยกำหนดสภาวะทดสอบ ดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed)	50 mm/min
ระยะทดสอบ (Gauge length)	50 mm
โหลดเซลล์ (Load cell)	1 kN
จำนวนตัวอย่างทดสอบ	10 ชิ้นต่อสูตร



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{Tensile strength (MPa)} = F/A \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) คำนวณจาก

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times [(L-L_0)/L_0] \quad (3.6)$$

เมื่อ L คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (mm)

$L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

#### 3.4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ทำการทดสอบโดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $100 \times 15$  มิลลิเมตร ฝังในดินที่มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไปเพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการฝังดิน

#### 3.4.10 การวัดสี (Color Measurement)

เตรียมฟิล์มชิ้นงานที่ได้จากการเทหล่อขึ้นรูป โดยให้ชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร นำมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 แล้วเปรียบเทียบกับแถบมาตรฐาน 10 จุด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งแสดนหรือซินอน  $D 65/10^\circ$  โดย

$L^*$  : ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$  : perfect black sample

$L = 100$  : perfect white sample

$a^*$  : ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (Red-Green)

$a$  เป็น + สีจะไปในทิศทางของแดง

$a$  เป็น - สีจะไปในทิศทางของเขียว

$b^*$  : ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (Yellow-Blue)

$b$  เป็น + สีจะไปในทิศทางของเหลือง

$b$  เป็น - สีจะไปในทิศทางของน้ำเงิน

$C^*$  : ความสดใสของสี

สามารถคำนวณได้จาก  $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h^\circ$  : เป็นตัวเลขระบองศาของสี่ มีหน่วยเป็นองศา

สามารถคำนวณได้จาก  $h^\circ = \tan^{-1} [b^* / a^*]$

WI : ค่าดัชนีความขาว ใช้กำหนดสีขาว

WI = 100 : สีขาวที่คล้ายกับสีขาวมาตรฐาน

สามารถคำนวณได้จาก  $WI = (L^* - 3b^*) + 3a^*$

### 3.4.11 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial testing)

ทำการทดสอบเชิงปริมาณตามมาตรฐาน ASTM F895 - 11 (Agar diffusion method) โดยทดสอบหาบริเวณยับยั้งเชื้อ (Zone of Inhibition) ของฟิล์มตัวอย่างในอะการ์ที่เตรียมได้ในขนาด 1x1 เซนติเมตร ใช้ตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) ความเข้มข้น 1% และเอทานอลความเข้มข้น 95% เป็นสภาวะควบคุม ใส่ชิ้นงานบนกระดาษกรองปราศจากเชื้อ แล้วนำไปเพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อในจานเพาะ (Petri dish) โดยเชื้อจุลชีพที่ใช้ คือ แบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E.coli*) ATCC 25922 และชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ATCC 25923 เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่มีอุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่ยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.1) และตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ในปริมาณที่ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งข้าวเจ้า (ตารางที่ 4.1) จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อสารละลาย แล้วจึงนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การบวมตัว การดูดซับความชื้น อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการย่อยสลาย โดยการฝังดิน การวิเคราะห์สีของชิ้นงาน และสมบัติการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

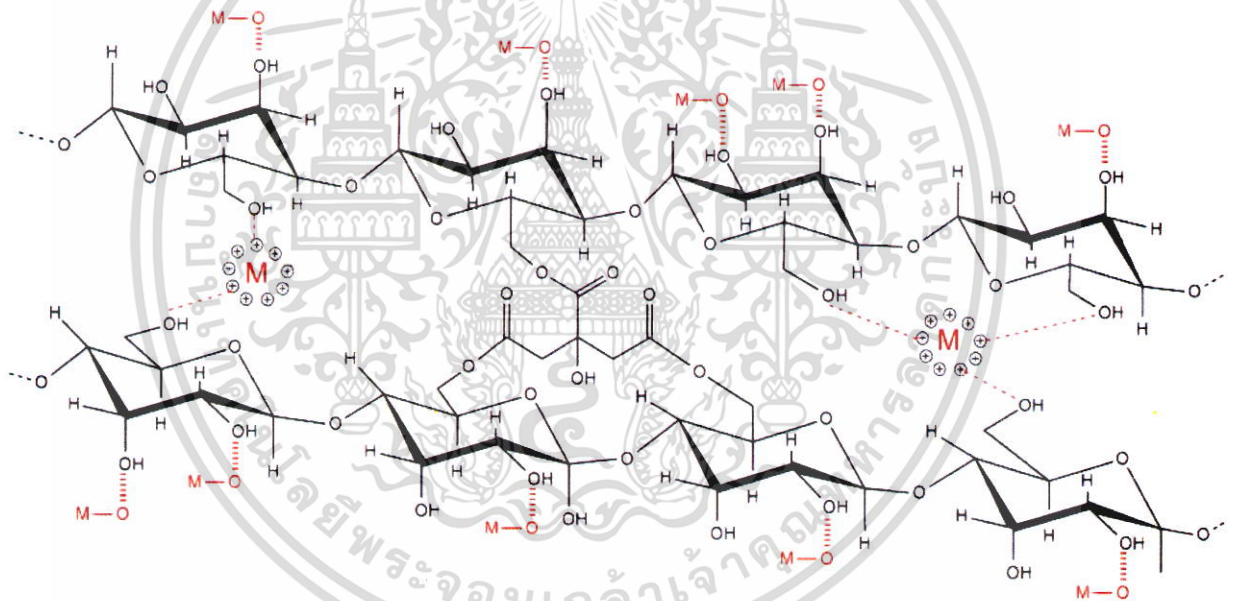
ลำดับ	สูตร/อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	Native RS	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก
2	RS-CA5%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 5 wt%
3	RS-CA10%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 10 wt%
4	RS-CA15%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 15 wt%
5	RS-CA20%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt%
6	RS-CA20-ZnO1%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 wt%
7	RS-CA20-ZnO3%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 3 wt%
8	RS-CA20-ZnO5%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%
9	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 wt%
10	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 3 wt%
11	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%
12	RS-CA20-CaO1%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคแคลเซียมออกไซด์ 1 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) อักษรย่อของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

13	RS-CA20-CaO3%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคแคลเซียมออกไซด์ 3 wt%
14	RS-CA20-CaO5%	ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20 wt% และใส่อนุภาคแคลเซียมออกไซด์ 5 wt%

โดยจากการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลิกของโมเลกุลกรด ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดพันธะเอสเทอร์ขึ้น และผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ อาจส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งผ่านพันธะไฮโดรเจนและ/หรืออาจเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุด้วย (Electrostatics) [42] โดยอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้ง กรดซิตริก และโลหะออกไซด์ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เติมกรดซิตริก และอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การศึกษาวិเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันก่อนและหลังจากการเชื่อมโยงด้วยกรดซिटริก และหลังจากการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พีคสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

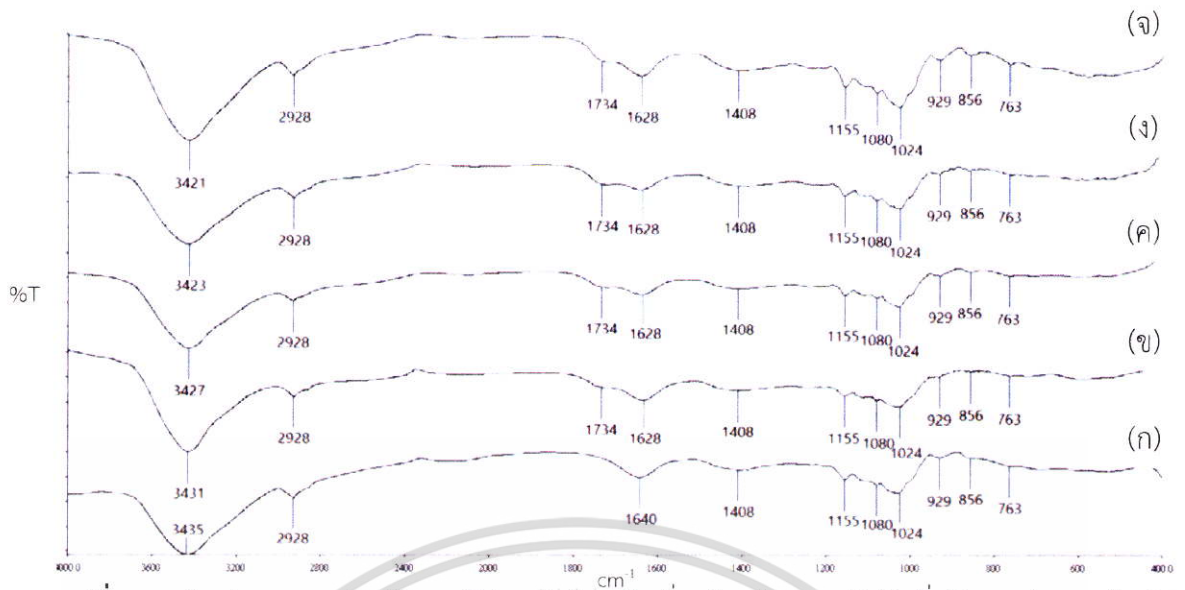
ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เตรียมได้

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะการสั่น
3200-3600 (b)	O-H stretching
2800-3000 (m $\rightarrow$ s)	Alkanes C-H stretching
1730-1750 (s)	Ester C=O stretching
1600-1630 (s)	Bound water
1445-1485 (m)	O-H bending
1000-1300 (s)	C-O-C stretching
1000-1200 (s)	C-O-H bending
900-940 (s)	C-H out-of-plane bending
800-860 (s)	C-H out-of-plane bending
700-770 (s)	C-H out-of-plane bending
450-550 (s)	Zn-O stretching
500-700 (s)	Ti-O stretching
435-450 (s)	Ca-O stretching

หมายเหตุ s คือ ความเข้มสูง m คือ ความเข้มปานกลาง และ b คือ ช่วงเลขคลื่นกว้าง

### 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิทริก

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิทริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% ทำได้โดยการตัดชิ้นงานฟิล์มนำไปบดร่วมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำมาอัดเม็ด ใช้สภาวะทดสอบที่ความยาวคลื่น  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) Native RS (ข) RS-CA5% (ค) RS-CA10% (ง) RS-CA15% และ (จ) RS-CA20%

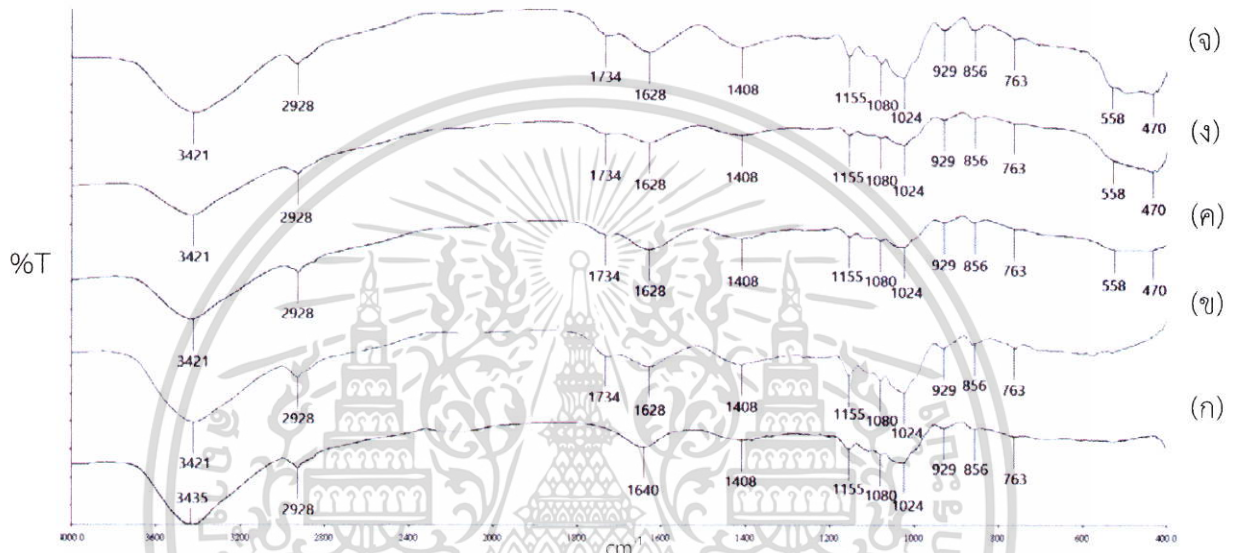
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่า อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มในทุก ๆ ตัวอย่าง มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นลักษณะที่ปรากฏตามโครงสร้างของแป้ง ดังนี้ พีคที่ความยาวคลื่น  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พีคในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ/หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง พีคที่  $1628-1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง พีคที่  $1425-1485\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H Bending ของแป้ง พีคช่วง  $1000-1300\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง พีคในช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending พีคช่วง  $800-940\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending และพีคช่วง  $763\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-H rocking [3, 37]

ทั้งนี้ผลจากการใส่กรดซิตริกลงไปในฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบความแตกต่างของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1734\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นรูปแบบการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าจากการเติมกรดลงในแป้งข้าวเจ้าทำให้เกิดการเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างโมเลกุลแป้งและโมเลกุลกรด [2, 37] แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยจากตารางในภาคผนวก ก.1 พบว่ามีพื้นที่ใต้กราฟของพีค  $1734\text{ cm}^{-1}$  มากขึ้นเมื่อปริมาณของกรดที่ใส่เข้าไปมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า การเติมกรดซิตริกทำให้สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นที่ลดลง เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาขึ้นมาใหม่ขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้ากับกรดซิตริกเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Y. Jiugao และคณะ [43] ที่ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวโพดเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 0, 0.6, 1, 2 และ 3% โดยนำหนักของแป้ง ผลการทดลองพบว่าเมื่อใส่กรดลงไป แป้ง โมเลกุลของกรดที่มีอะตอมไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับอะตอมออกซิเจนของแป้งที่มีค่าไอโธเนกาติวิตี (EN) สูงได้ และเมื่อปริมาณของกรด

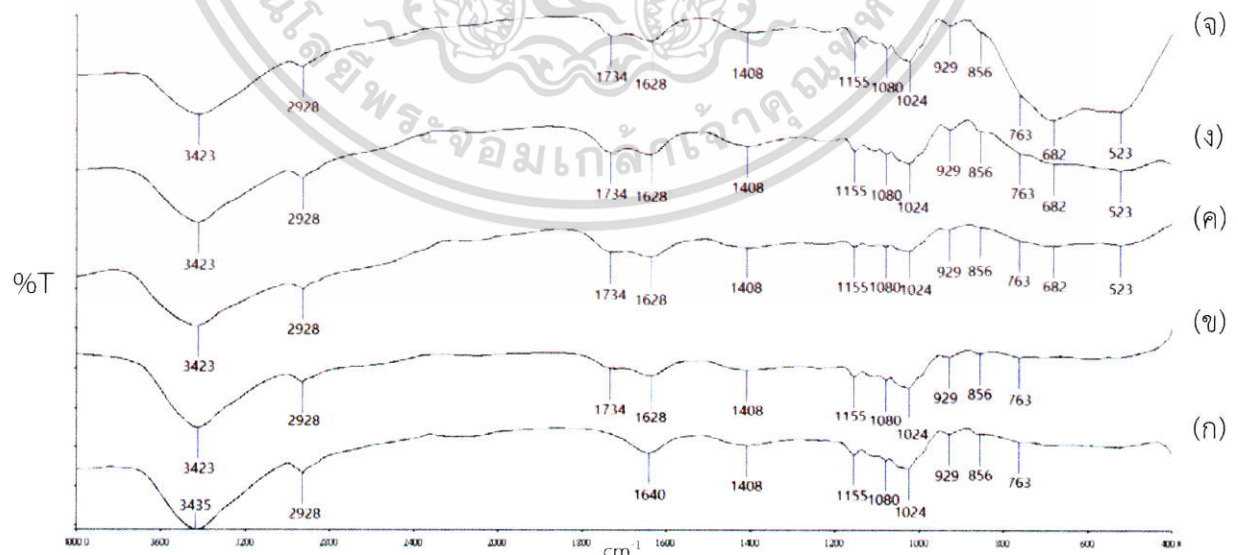
ที่ใส่เข้าไปมีค่ามากขึ้น โอกาสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนจึงมีมากขึ้นส่งผลให้พีคการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นที่ลดลงได้

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักและใส่อนุภาคของโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนักของแป้ง ให้ผลการทดลองดังนี้

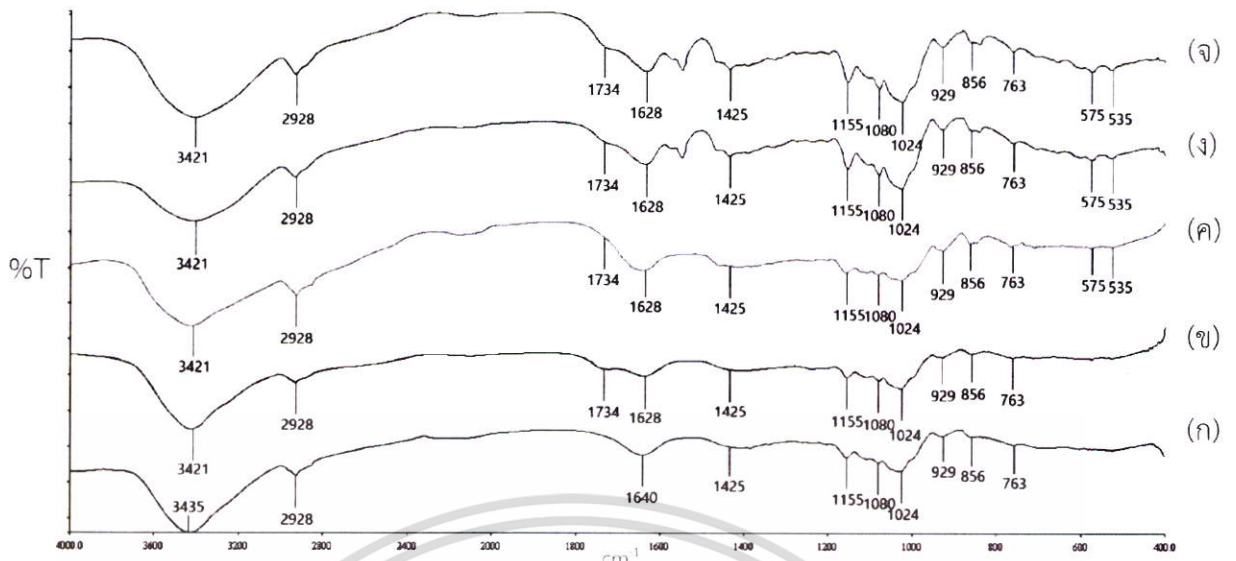


รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) Native RS (ข) RS-CA20% (ค) RS-CA20-ZnO1% (ง) RS-CA20-ZnO3% และ (จ) RS-CA20-ZnO5%



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) Native RS (ข) RS-CA20% (ค) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ง) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>3% และ (จ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งหากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่แคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) Native RS (ข) RS-CA20% (ค) RS-CA20-CaO1% (ง) RS-CA20-CaO3% และ (จ) RS-CA20-CaO5%

จากรูปที่ 4.3-4.5 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่โลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณต่าง ๆ กัน ผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมจากฟิล์มแป้งข้าวเจ้า (ก) ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรด (ข) และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงที่มีการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ (ค)-(จ) มีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างของแป้งและกลีเซอรอล ได้แก่ พีกในช่วง  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการสั่นแบบ O-H stretching พีกในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ/หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง พีกที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง เป็นต้น และผลจากการเติมกรดส่งผลให้พีกของ O-H stretching ที่ช่วง  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและกรด และเกิดพีกแสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยง คือ เกิดพีกในช่วง  $1734\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์

ผลจากการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ ลงในฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก รูปที่ 4.3-4.5 (ค)-(จ) พบว่าสเปกตรัมจากทุกสูตรพบพีกใหม่ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์หลักของอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิด ได้แก่ พีกในช่วง  $550-450\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกแสดงการสั่นของ Zn-O stretching (รูปที่ 4.3) [3] พีกในช่วง  $500-700\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกแสดงการสั่นของ Ti-O stretching (รูปที่ 4.4) [44] และช่วงพีกที่  $435-450\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกแสดงการสั่นของ Ca-O stretching (รูปที่ 4.5) [45] นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิดในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างแป้งเชื่อมโยงและอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ โดยพีกการสั่นของ Zn-O, Ti-O และ Ca-O stretching มีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Akhavan และคณะ [7] และ E.G. Ahanger และคณะ [46] ที่ทำการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโน ผลการทดลองพบว่าเกิดอันตร-

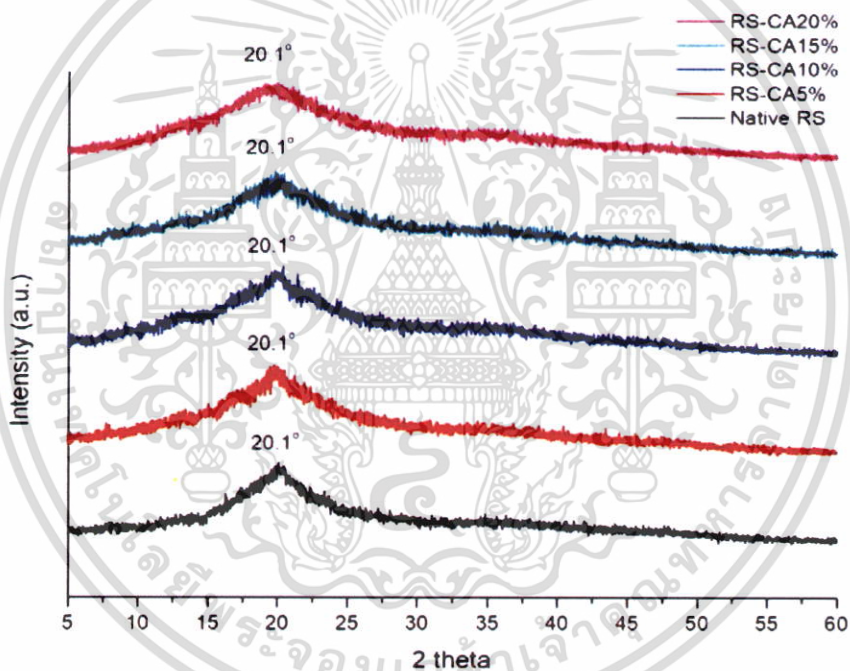
เอกสารที่ปรึกษาขึ้นระหว่างอนุภาคซิงค์ออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านพันธะไฮโดรเจน เนื่องจากอะตอมไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถไปจับอนุภาคซึ่งคือออกไซด์ซึ่งมีอะตอมออกซิเจนที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น เป็นสาเหตุให้หมู่ฟังก์ชัน Zn-O มีความเข้มของพีคขยายกว้างขึ้น

## 4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

### 4.2.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ขนาดของมุมตกกระทบสำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด (Net area) คือ  $2\theta = 5-60^\circ$  และสำหรับพื้นที่ที่สนใจ (Raw area) คือ  $2\theta = 10-30^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ/\text{นาท}$  ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดสูตรต่าง ๆ

สูตร	ปริมาณผลึก (%)
Native RS	43.02
RS-CA5%	41.12
RS-CA10%	39.74
RS-CA15%	38.61
RS-CA20%	37.44

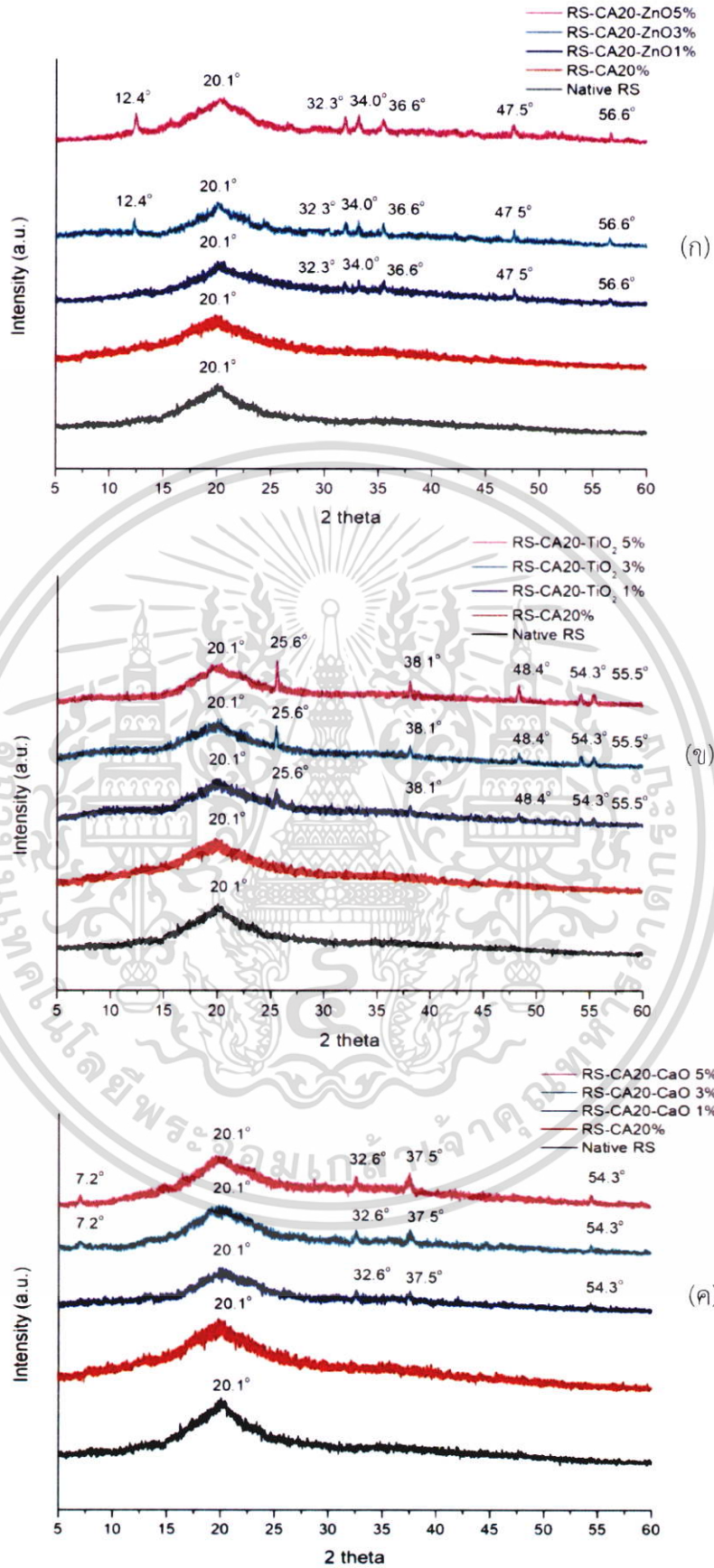
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรด-ซिटริก พบว่าดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.1$  อันเนื่องมาจากการนำแป้งมาเติมพลาสติกไซเซอรและผ่านกระบวนการเจลาที่ไนเซชันด้วยความร้อนและน้ำ ทำให้โครงผลึกของแป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากธัญพืช และมีโครงสร้างเป็นแบบ A type ถูกทำลาย และเกิดเป็นโครงผลึกใหม่แบบ Vh type [47] และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดซिटริกที่ใช้มากขึ้น พีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.1$  มีความเข้มลดน้อยลง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนของโครงสร้างผลึกของแป้งเมื่อเกิดการเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใช้มากขึ้น ปริมาณผลึกของแป้งมีแนวโน้มลดต่ำลง โดยชิ้นงานสูตร Native starch ที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงมีปริมาณผลึกมากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานสูตร RS-CA20% ซึ่งมีการใช้สารเชื่อมโยงมากที่สุดมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด โดยทั้งนี้เนื่องมาจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลของแป้งเกิดอันตรกิริยากับกรดซिटริกนั้น เกิดสายโซ่กึ่งทำหน้าที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของโมเลกุลแป้งและ/หรือรวมถึงอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลแป้งมีขนาดสั้นลงซึ่งส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลงได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ความเป็นผลึกของแป้งลดลงเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงทำให้เกิดแนวโน้มการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณสายโซ่กึ่งเพิ่มมากขึ้นและ/หรืออาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มมากขึ้นด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ J.Q. Mei และคณะ ที่ทำการเชื่อมโยงแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดซिटริก ผลการทดลองพบว่าปริมาณของสารเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้น ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงแบบเกิดกีดกันขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลแป้ง จัดเรียงเป็นผลึกได้ยากขึ้น ความเป็นผลึกจึงลดลง [48]

#### 4.2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซिटริกและใส่โลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกรดซिटริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง และนำมาเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก จากการทดลองให้ผลดังนี้



รูปที่ 4.7 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะ

ออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ (ก) ZnO (ข) TiO<sub>2</sub> และ (ค) CaO ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ

สูตร	ปริมาณผลึก (%)
Native RS	43.02
RS-CA20%	37.44
RS-CA20-ZnO1%	36.92
RS-CA20-ZnO3%	38.16
RS-CA20-ZnO5%	40.22
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	36.50
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	37.71
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	41.65
RS-CA20-CaO1%	36.10
RS-CA20-CaO3%	36.42
RS-CA20-CaO5%	40.23

จากรูปที่ 4.7 แสดงโครงผลึกของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนักและใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.1$  เช่นเดียวกับดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า นอกจากนี้ผลของการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบพีคเอกลักษณ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $12.4$ ,  $32.3$ ,  $34.0$ ,  $36.6$ ,  $47.5$  และ  $56.6$  บ่งบอกระนาบความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ [24, 52] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) พบพีคเอกลักษณ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $25.6$ ,  $38.1$ ,  $48.4$ ,  $54.3$  และ  $55.5$  บ่งบอกระนาบความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 (TiO<sub>2</sub> P25) [44] รูปที่ 4.8 (ข) และพบพีคเอกลักษณ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $7.2$ ,  $32.6$ ,  $37.5$  และ  $54.3$  บ่งบอกระนาบความเป็นผลึกของแคลเซียมออกไซด์ [56] รูปที่ 4.7 (ค) ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งที่มีการใส่โลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าความเข้มของพีคที่แสดงลักษณะความเป็นผลึกของโลหะออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคโลหะออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิดในปริมาณที่เท่ากันให้ค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณน้อยไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของแป้งอย่างมีนัยสำคัญในตัวอย่างการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ 1% และ 3% ตามลำดับ แต่จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ปริมาณโลหะออกไซด์ที่ 5% สอดคล้องกับงานวิจัยของ S.A. Oleyaei และคณะ ซึ่งได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันฝรั่งด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลการทดลองพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อยไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของแป้ง เนื่องจากเป็นอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีปริมาณน้อยมาก โอกาสในการจับกลุ่มหรือรวมตัวกันมีน้อย ไม่สามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของแป้งมันฝรั่งได้ [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สัณฐานวิทยา (Morphology)

#### 4.3.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มแข็งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มแข็งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ทำการทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 3000 เท่า โดยให้ผลการทดลองดังนี้



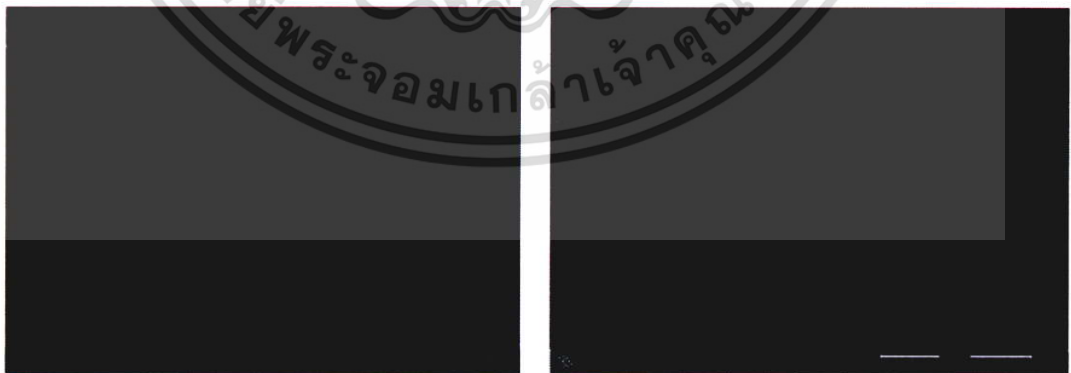
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ปริมาณต่างกัน (ก) Native RS (ข) RS-CA5% (ค) RS-CA10% (ง) RS-CA15% และ (จ) RS-CA20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าชิ้นงานสูตร Native RS รูปที่ 4.8 (ก) ที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีลักษณะขรุขระไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของแป้งข้าวเจ้ามีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเมื่อมีการใช้อุณหภูมิสูงและมีน้ำในสภาพที่เพียงพอ เม็ดแป้งในส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึกพองตัวและแตกออกไม่พร้อมกัน ส่วนที่เป็นอสัณฐานทนความร้อนและอุณหภูมิได้น้อยกว่าผลึก จึงอาจเกิดการแบ่งแยกของภูมิภาคผลึกและอสัณฐานอย่างไม่สม่ำเสมอและเห็นเป็นลักษณะขรุขระ แต่เมื่อเติมกรดซิตริกลงไปในฟิล์มแป้ง รูปที่ 4.8 (ข)-(จ) พบว่าสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งนั้นมีความเรียบมากขึ้น อันเนื่องมาจากกรดที่เติมลงไปมีหมู่คาร์บอกซิลิกอยู่ 3 หมู่ มีความเป็นกรดมากซึ่งสามารถไฮโดรไลซิสแป้งได้ โมเลกุลแป้งจึงมีขนาดสั้นลง ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปภายในเม็ดแป้งบางส่วนและแตกออกได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใส่เข้าไปมากขึ้น พบว่าภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมีแนวโน้มเรียบมากขึ้น โดยที่ฟิล์มแป้งสูตร RS-CA20% รูปที่ 4.8 (จ) ที่มีการเชื่อมโยงกรดที่ปริมาณมากที่สุด มีความเรียบเนียนของภาคตัดขวางของฟิล์มมากที่สุด เนื่องจากปริมาณของกรดที่มาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น นอกจากนี้การใส่กรดซิตริกที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง ส่งผลให้แป้งและกรดมีความเข้ากันได้ดี สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากเครื่อง FTIR รูปที่ 4.3 โดยพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งเกิดการเคลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ลดลง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดที่ส่งผลให้แป้งและกรดมีความเข้ากันได้ดี

#### 4.3.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์

การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก และใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนักของแป้ง ทดสอบโดยใช้กำลังขยาย 3000 และ 10000 เท่า ผลการทดลองแสดงดังนี้



(ก) Native RS, 3000X

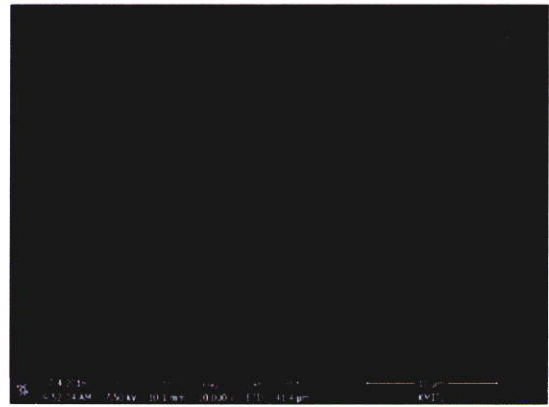
(ข) RS-CA20%, 3000X

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (ก) Native RS และ (ข) RS-CA20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



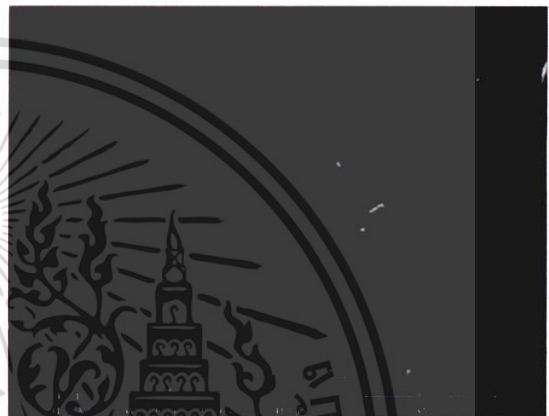
(ก) RS-CA20-ZnO1%, 3000X



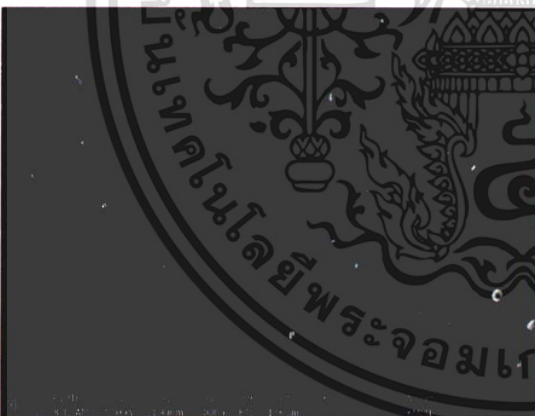
(ข) RS-CA20-ZnO1%, 10000X



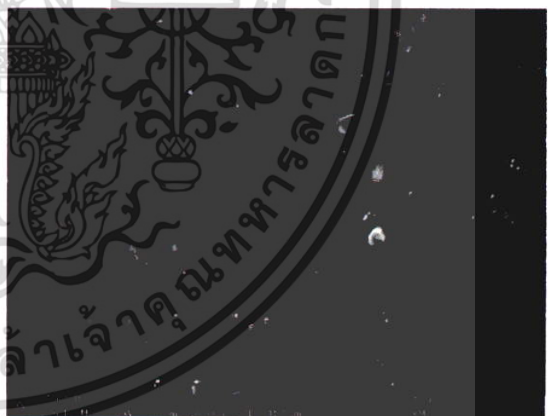
(ค) RS-CA20-ZnO3%, 3000X



(ง) RS-CA20-ZnO3%, 10000X



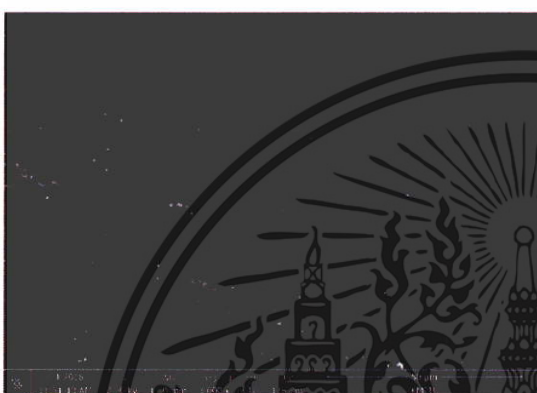
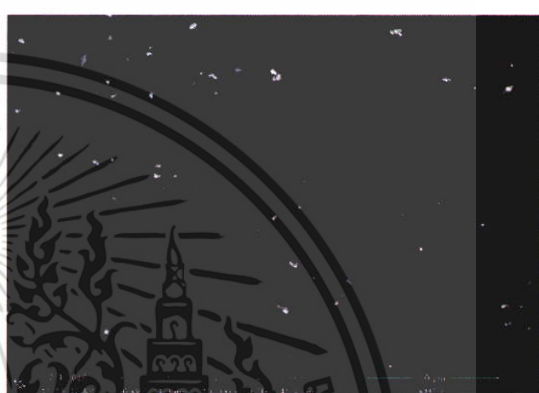
(จ) RS-CA20-ZnO5%, 3000X



(ฉ) RS-CA20-ZnO5%, 10000X

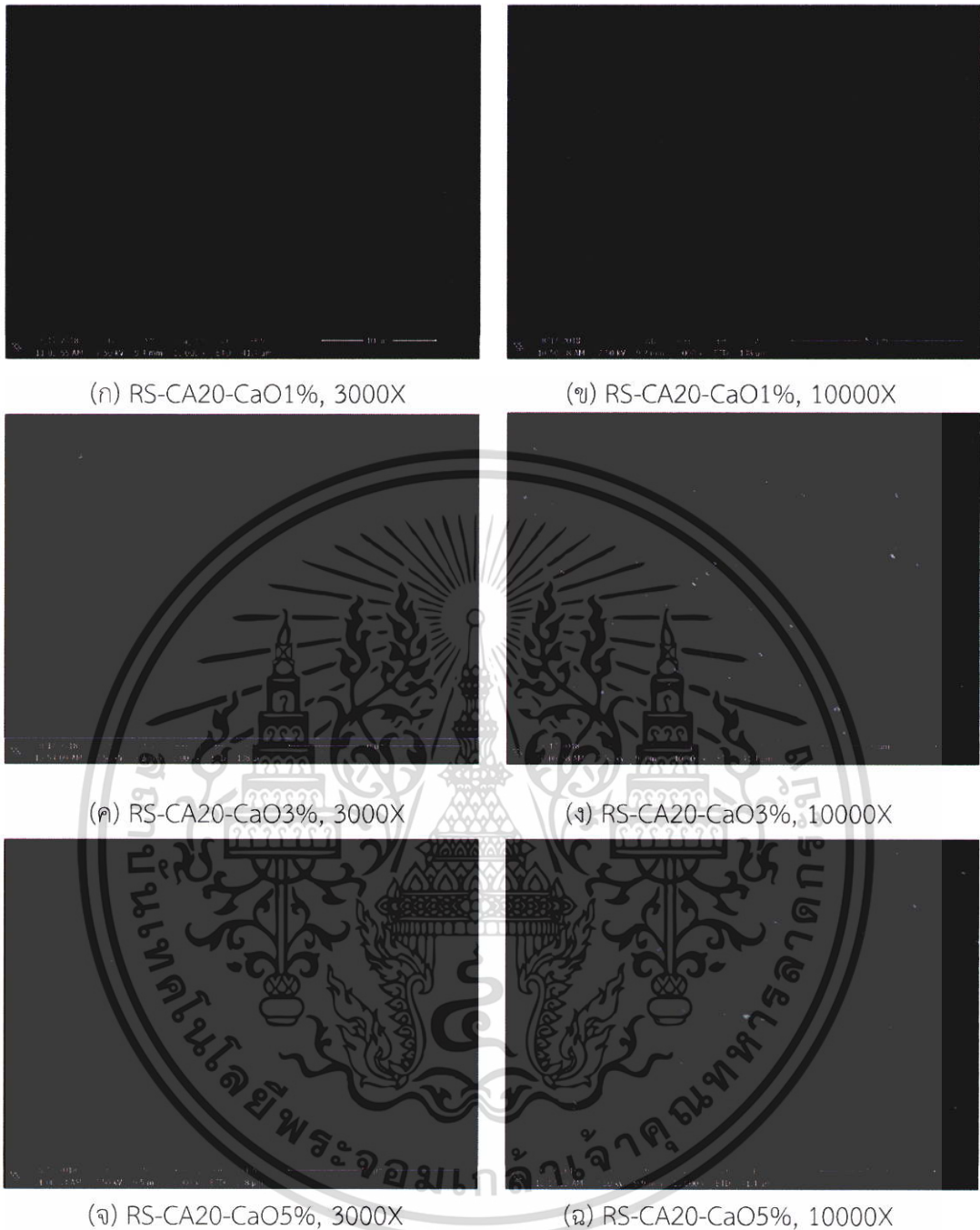
**รูปที่ 4.10** สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10,000 เท่า (ก)-(ข) RS-CA20-ZnO1% (ค)-(ง) RS-CA20-ZnO3% และ (จ)-(ฉ) RS-CA20-ZnO5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 3000X(ข) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 10000X(ค) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 3000X(ง) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 10000X(จ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 3000X(ฉ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub> 1%, 10000X

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10000 เท่า (ก)-(ข) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ค)-(ง) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>3% และ (จ)-(ฉ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3000 และ 10,000 (ก)-(ข) RS-CA20-CaO1% (ค)-(ง) RS-CA20-CaO3% และ (จ)-(ฉ) RS-CA20-CaO5%

รูปที่ 4.10-4.12 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 3000 และ 10000 เท่า ของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก พบว่ารูปแบบของสัณฐานวิทยาของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน ผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ภาคตัดขวางของชิ้นงานฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

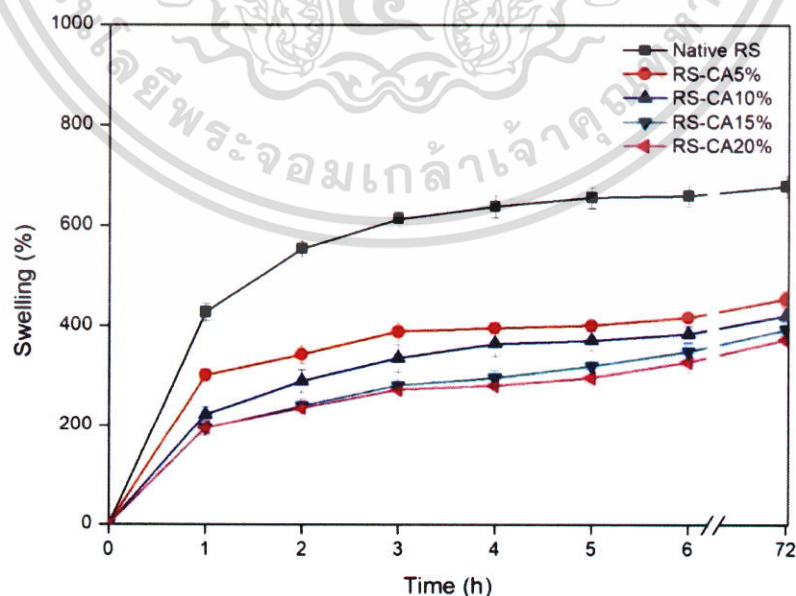
โดยขึ้นงานฟิล์มที่เติมโลหะออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของทุกสูตร มีความขรุขระมากที่สุด เนื่องจากมีเป็นปริมาณที่มากที่สุดที่เติมลงไป มีโอกาสที่จะเกิดการกระจายตัวหรือเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิด พบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ มีการกระจายตัวที่ดี ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นขั้วของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่ามากกว่าแคลเซียมออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ [6] เมื่อเติมอนุภาคเหล่านี้ลงไปในขณะที่บ่มสารละลายซึ่งมีความเป็นขั้วก่อนขึ้นรูป อนุภาคที่มีความเป็นขั้วที่ดีจะสามารถกระจายตัวได้ดีกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ W.B. Tsai และคณะ ที่ทำการศึกษาสมบัติการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายของเหลวโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (SHMP) และพอลิอะคริลิก แอซิด (PAA) ผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการกระจายตัวในสารละลายที่มีความเป็นขั้วของ SHMP ได้ดีกว่า PAA ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นขั้ว มีความสามารถในการละลายและกระจายตัวได้ดีกว่า [50]

#### 4.4 การทดสอบสมบัติการบวมตัว (Swelling)

การทดสอบสมบัติการบวมตัวเป็นการศึกษาความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงของสารเชื่อมโยง คือ กรดซิตริก ที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของแป้ง โดยอันตรกิริยาระหว่างแป้งและกรดซิตริกจะเกิดผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดหมู่เอสเทอร์เชื่อมระหว่างโครงสร้างโมเลกุลแป้ง แสดงในรูปที่ 4.1

##### 4.4.1 สมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

การทดสอบสมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ทำได้โดยการนำชิ้นงานฟิล์มตัวอย่างมาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองดังนี้



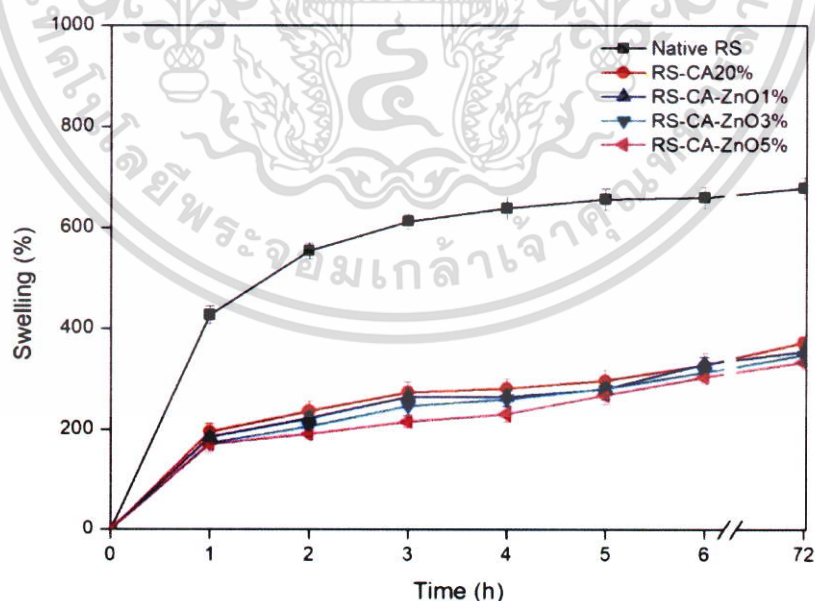
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงการบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณต่างกัน พบว่าชิ้นงานฟิล์มทุกสูตรมีการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบมากขึ้น โดยเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก และมีแนวโน้มเพิ่มช้าลงเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงถัดไป นอกจากนี้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยง เปอร์เซ็นต์การบวมตัวมีแนวโน้มลดต่ำลงในทุกช่วงเวลา โดยชิ้นงานสูตร Native RS ซึ่งเป็นฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการใส่สารเชื่อมโยง มีค่าการบวมตัวมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก ซึ่งเป็นหมู่ที่แสดงความเป็นขั้ว ทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำและสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี ในขณะที่ชิ้นงานสูตร RS-CA20% ซึ่งเป็นสูตรที่มีการใส่สารเชื่อมโยงในปริมาณมากที่สุดมีการบวมตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโมเลกุลแป้งเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดหมู่เอสเทอร์เชื่อมโครงสร้างตาข่ายขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยง โครงสร้างตาข่ายจึงมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถขัดขวางโมเลกุลน้ำที่จะเข้ามาในโครงสร้างของแป้งได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของสูตร RS-CA20% จึงมีค่าต่ำสุด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งพบว่าพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ  $3423\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงสมบัติความชอบน้ำลดลง เปลี่ยนโครงสร้างจากเส้นตรงเป็นโครงสร้างตาข่าย

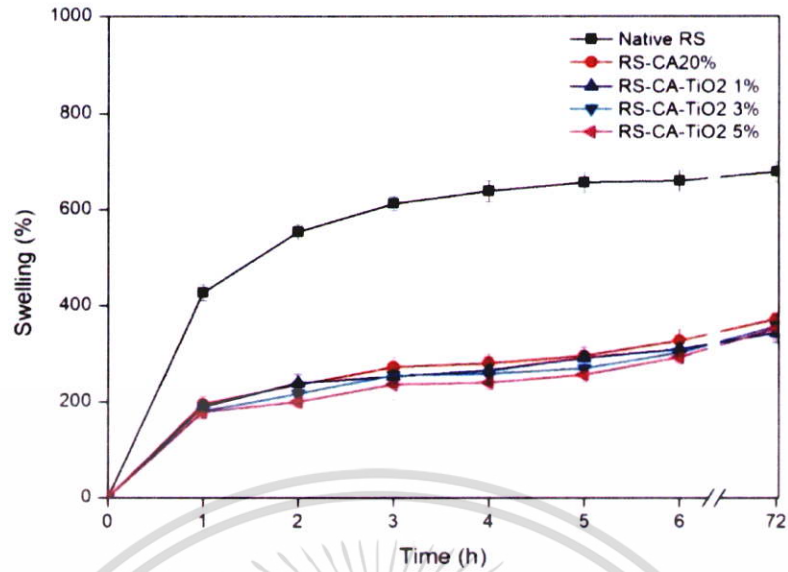
#### 4.4.2 สมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

การทดสอบการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

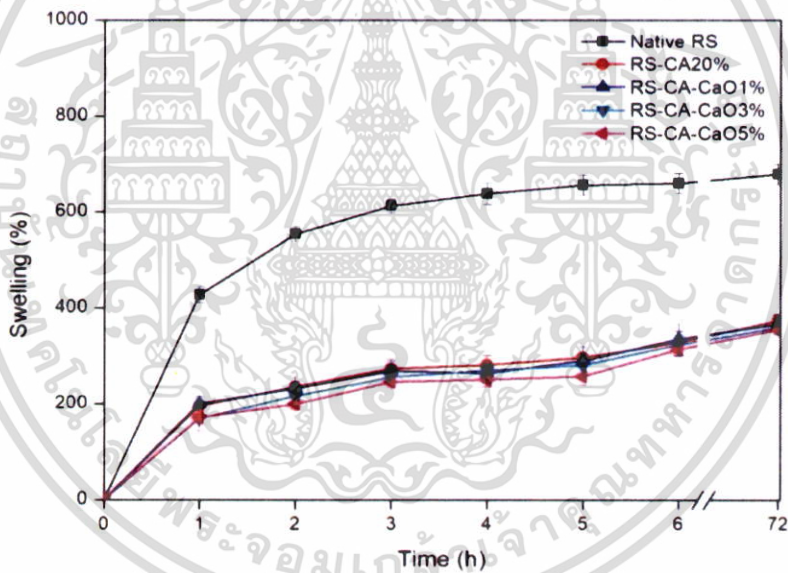


รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซिटริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิทริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.14-4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิทริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักแล้วนำมาเติมโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณต่างกัน พบว่าชิ้นงานฟิล์มหลังจากเติมโลหะออกไซด์แต่ละชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่มีแนวโน้มการบวมตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะออกไซด์ ทั้งนี้สันนิษฐานว่าอนุภาคโลหะออกไซด์อาจเกิดอันตรกิริยากับแป้งผ่านพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างประจุกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำให้การเข้ามาแทรกของน้ำในโครงสร้างแป้งที่มีการเชื่อมโยงอยู่อย่างหนาแน่นเกิดได้ยากขึ้น แต่เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ใส่ลงไปมีปริมาณน้อย ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวจึงไม่แตกต่างกันมากนักกับการบวมตัวของฟิล์มแป้งที่มีการเชื่อมโยงในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้จากการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

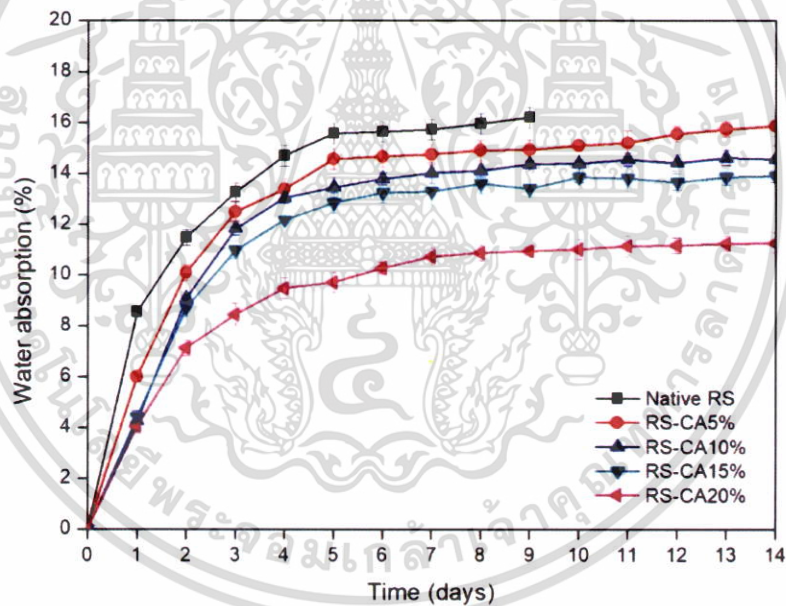
เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณและขนาดอนุภาคของโลหะออกไซด์มีค่าเท่ากัน ความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาหรือเข้าไปแทรกอยู่ในฟิล์มจึงมีเท่า ๆ กัน เปอร์เซ็นต์การบวมตัวจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน

#### 4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

การทดสอบหาปริมาณการดูดซับความชื้นโดยนำฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและมีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ทดสอบโดยการนำไปวางในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์  $99 \pm 1$  % นำฟิล์มมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักทุกวัน แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนดังนี้

##### 4.5.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ

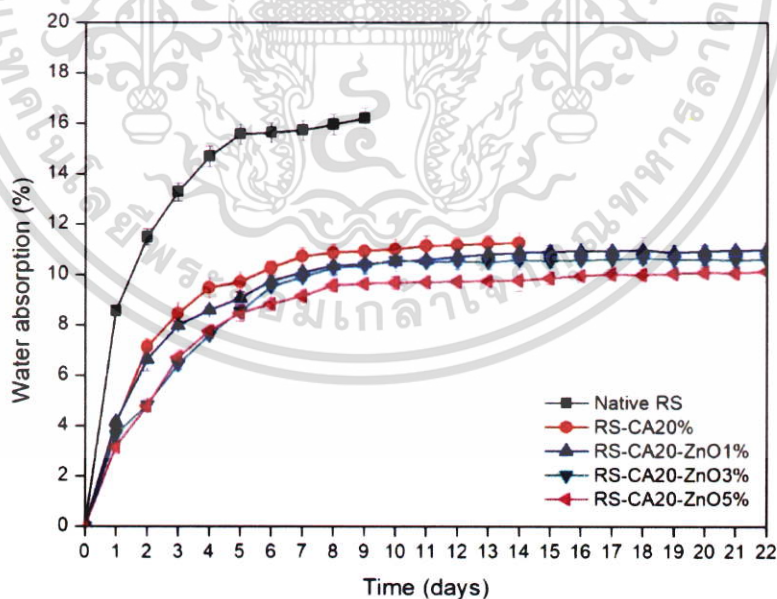
หมายเหตุ - ชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าสูตร Native RS ใช้เวลาในการทดสอบสูงสุดเท่ากับ 9 วัน เนื่องจากพบการขึ้นราของชิ้นงานฟิล์ม จึงหยุดทำการทดลอง

จากรูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณต่างกัน พบว่าชิ้นงานทุกสูตรมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรก หลังจากนั้นมีความเพิ่มช้าลงและมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานฟิล์มแบ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ ดูดซับความชื้นจนมีความอิ่มตัวของความชื้นอยู่เต็มโครงสร้าง จึงไม่สามารถดูดซับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นเพิ่มขึ้นไปอีก ค่าการดูดซับความชื้นจึงมีค่าคงที่ นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการเติมสารเชื่อมโยงลงไปในฟิล์มแบ่งที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ค่าการดูดซับความชื้นมีค่าลดลงในทุกช่วงเวลาทดสอบ โดยชั้นงานสูตร Native RS ที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยงมีค่าการดูดซับความชื้นมากที่สุด ในขณะที่ชั้นงานสูตร RS-CA20% ซึ่งใส่สารเชื่อมโยงในปริมาณมากที่สุดมีค่าการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารเชื่อมโยงกรดซิตริก ทำให้หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่มีสมบัติความชอบน้ำสูง ไปเกิดการทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดซิตริก เกิดการเชื่อมโยงเป็นหมู่เอสเทอร์ขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งจึงลดลง ทำให้สมบัติความชอบน้ำของฟิล์มแบ่งลดลงตามไปด้วย และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จินตภา เต็มสีคราม ที่ทำการศึกษสมบัติต่างของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังเชื่อมโยงด้วยกรด 3 ชนิด ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นองค์ประกอบ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดที่ใช้เชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นลดลง เนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาเกิดเอสเทอร์ฟิเคชันของหมู่ไฮดรอกซิลจากแป้งและหมู่คาร์บอกซิลิกจากกรด ส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างแป้งลดลง มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity) ลดลง ค่าการดูดซับความชื้นจึงลดลง [4]

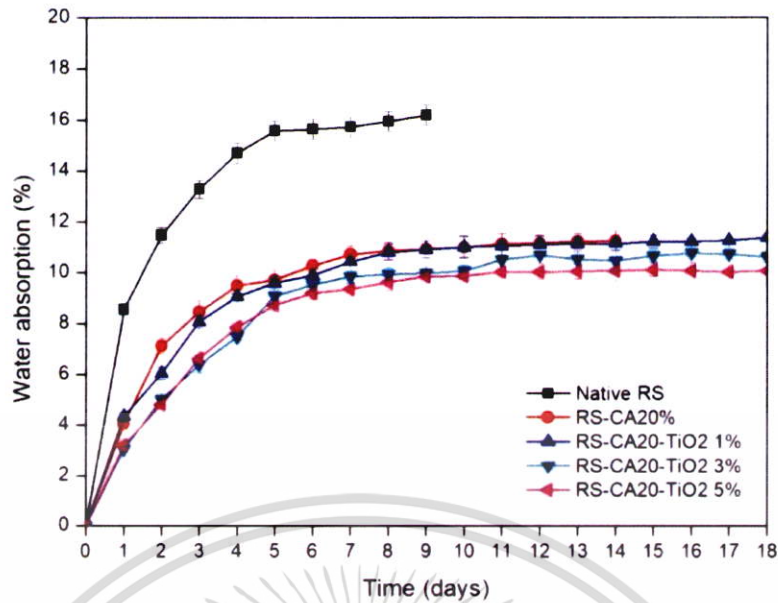
#### 4.5.2 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ

ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดกัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

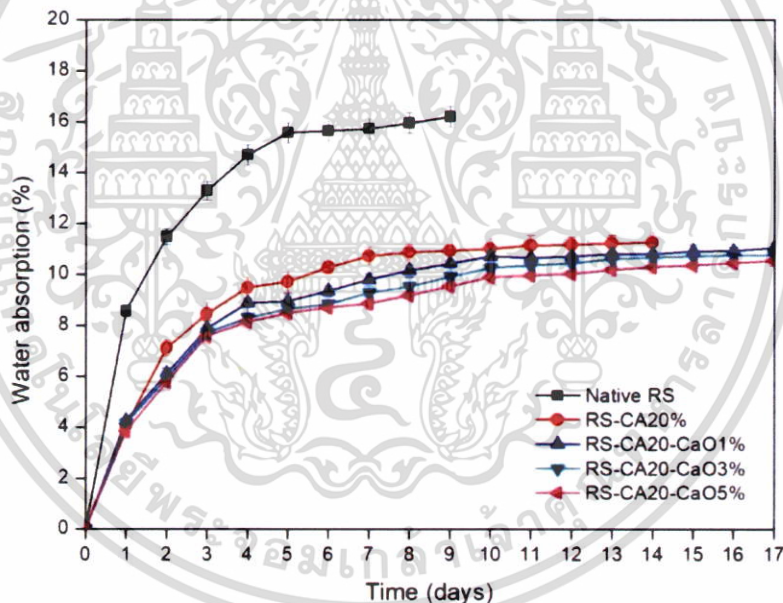


รูปที่ 4.18 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชั้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.20 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

จากรูปที่ 4.18-4.20 แสดงผลการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มในทุกสูตรเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อหลังจากเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงไป พบว่าค่าการดูดซับความชื้นมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคออกไซด์ที่เติมมีปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของฟิล์มแป้งผ่านพันธะไฮโดรเจน ทำให้ค่าสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity) ลดลง ค่าการดูดซับความชื้นจึงลดลง นอกจากนี้จากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีขนาดเล็กลงไปพบว่าอาจไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของแป้ง ขัดขวางการเข้ามาแทรกของน้ำได้มากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณที่ใส่เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบสัณฐานวิทยาในหัวข้อที่ 4.3 โดยพบว่าเมื่อเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคโลหะออกไซด์ภายในภาคตัดขวางชั้นงานมีมากขึ้น ซึ่งมีผลให้อาจขัดขวางความสามารถในการเข้ามาแทรกของน้ำได้มากขึ้น และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ A.M. Nafchi และคณะ ที่ทำการศึกษสมบัติของฟิล์มจากแป้งสาชูและเจลาตินจากหนังวัว (Bovine gelatin) ที่มีการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ชนิดแท่ง (nanorod) ผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งและเจลาตินที่มีหมู่ไฮดรอกซิลได้ ทำให้การดูดซับความชื้นมีค่าลดลง นอกจากนี้ขนาดอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีผลทำให้สามารถลดค่าการดูดซับความชื้นได้ เนื่องจากสามารถไปแทรกและกระจายอยู่ในฟิล์มแป้ง ซึ่งส่งผลต่อการขัดขวางโมเลกุลน้ำที่จะเข้ามาจับกับฟิล์มแป้ง ค่าการดูดซับความชื้นจึงลดต่ำลง [50] โดยเมื่อพิจารณาจากชนิดของโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปปริมาณที่เท่ากัน พบว่าให้ค่าการดูดซับความชื้นที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.6 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)

การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำโดยใช้วิธีดูดความชื้น (Desiccant method) โดยนำฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและมีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ทดสอบที่อุณหภูมิ  $38 \pm 1$  องศาเซลเซียสและควบคุมความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 1\%$  ด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ นำฟิล์มมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักในหน่วยกรัม·มิลลิเมตร/ตร.ม.·วัน·กิโลปาสคาล

##### 4.6.1 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

ทดสอบหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ

สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม·มิลลิเมตร/ตร.ม.·วัน·กิโลปาสคาล)
Native RS	11.17
RS-CA5%	10.88
RS-CA10%	11.11
RS-CA15%	10.98
RS-CA20%	10.52

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน พบว่าการเติมกรดลงไปส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากการเติมกรดลงไปทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งให้กลายเป็นหมู่เอสเทอร์ ส่งผลให้ความหนาแน่นของขนาดโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความเป็น Hydrophilicity ลดลง [54] ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าลดต่ำลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของกรดที่ใช้เชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดในตัวอย่างที่มีการเติมกรดซิตริกมากที่สุด (RS-CA20%) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัว ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของกรดที่ใช้เชื่อมโยงมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงทำให้ความชอบน้ำลดลงจากหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ จินตภา เต็มสีคราม และคณะ ที่ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิก ซึ่งพบว่าการใช้กรดทั้งสามชนิดเป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงร่างตาข่ายมีจำนวนพันธะเชื่อมโยงหนาแน่นมากขึ้น โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำที่เข้ามาแทรกจึงซึมผ่านเข้ามาในโครงสร้างได้ยาก อัตราการซึมผ่านไอน้ำจึงลดลง [4]

#### 4.6.2 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ

ทดสอบหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5% ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ

สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม·มิลลิเมตร/ตร.ม.·วัน·กิโลปาสกาล)
Native RS	11.17
RS-CA20%	10.52
RS-CA20-ZnO1%	10.59
RS-CA20-ZnO3%	9.92
RS-CA20-ZnO5%	9.52
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	10.89
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	10.85
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	9.68
RS-CA20-CaO1%	10.56
RS-CA20-CaO3%	10.28
RS-CA20-CaO5%	9.90

จากตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่างกัน พบว่าการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงไปส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ซึ่งส่งผลให้ค่าความเป็นขั้วลดลง นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงไปปริมาณมากขึ้น อาจส่งผลให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) ของฟิล์มแป้งลดลง เนื่องจากมีขนาดที่เล็ก อาจขัดขวางการเข้ามาแทรกของโมเลกุลน้ำได้ ในขณะที่ผลจากการเปลี่ยนชนิดของโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปปริมาณที่เท่ากัน พบว่าให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำไปในลักษณะไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีความสามารถในการไม่ว่องไวใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

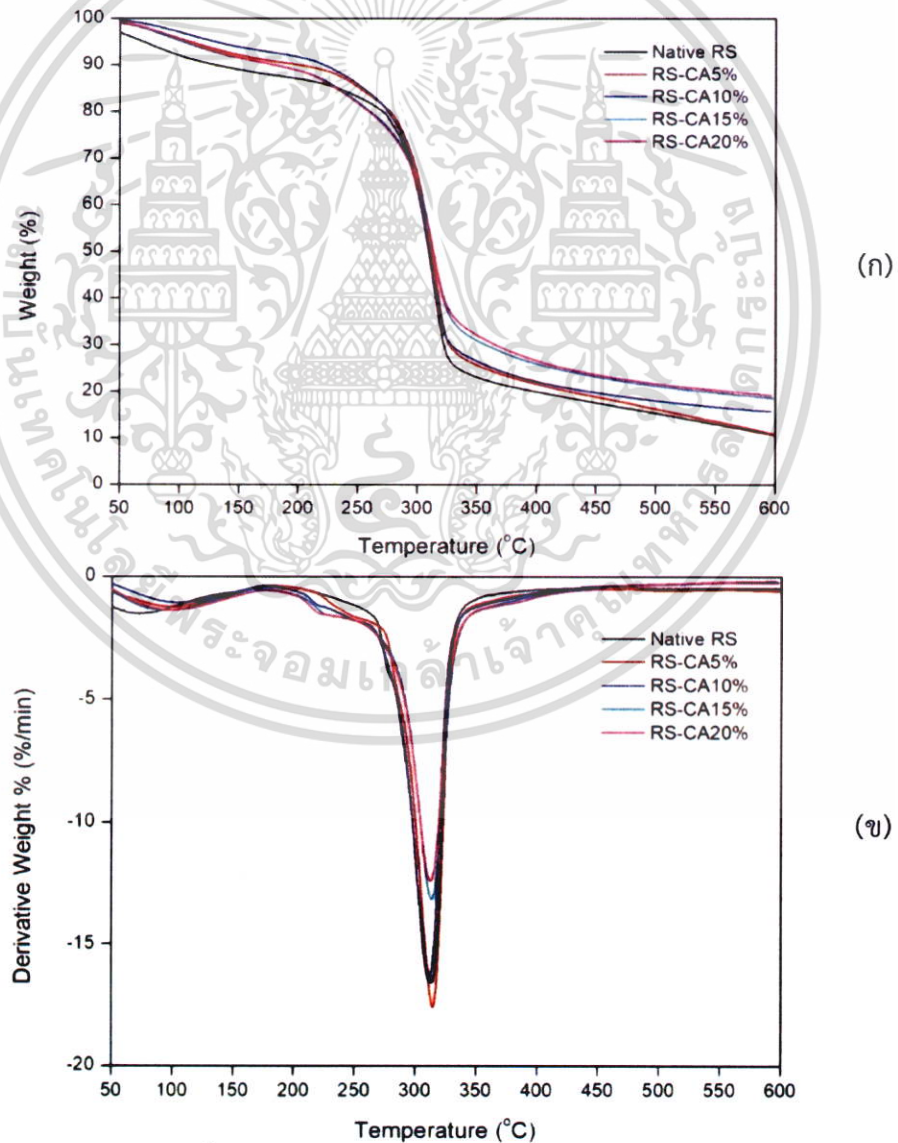
เกิดพันธะไฮโดรเจนได้เหมือนกัน และมีขนาดอนุภาคที่เท่ากัน ความสามารถในการลดปริมาตรอิสระ จึงมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

### 4.7 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน โดยศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอุณหภูมิในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

#### 4.7.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.21 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแข็งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสาร(ก) TGA และ(ข) DTG งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกสูตรต่าง ๆ

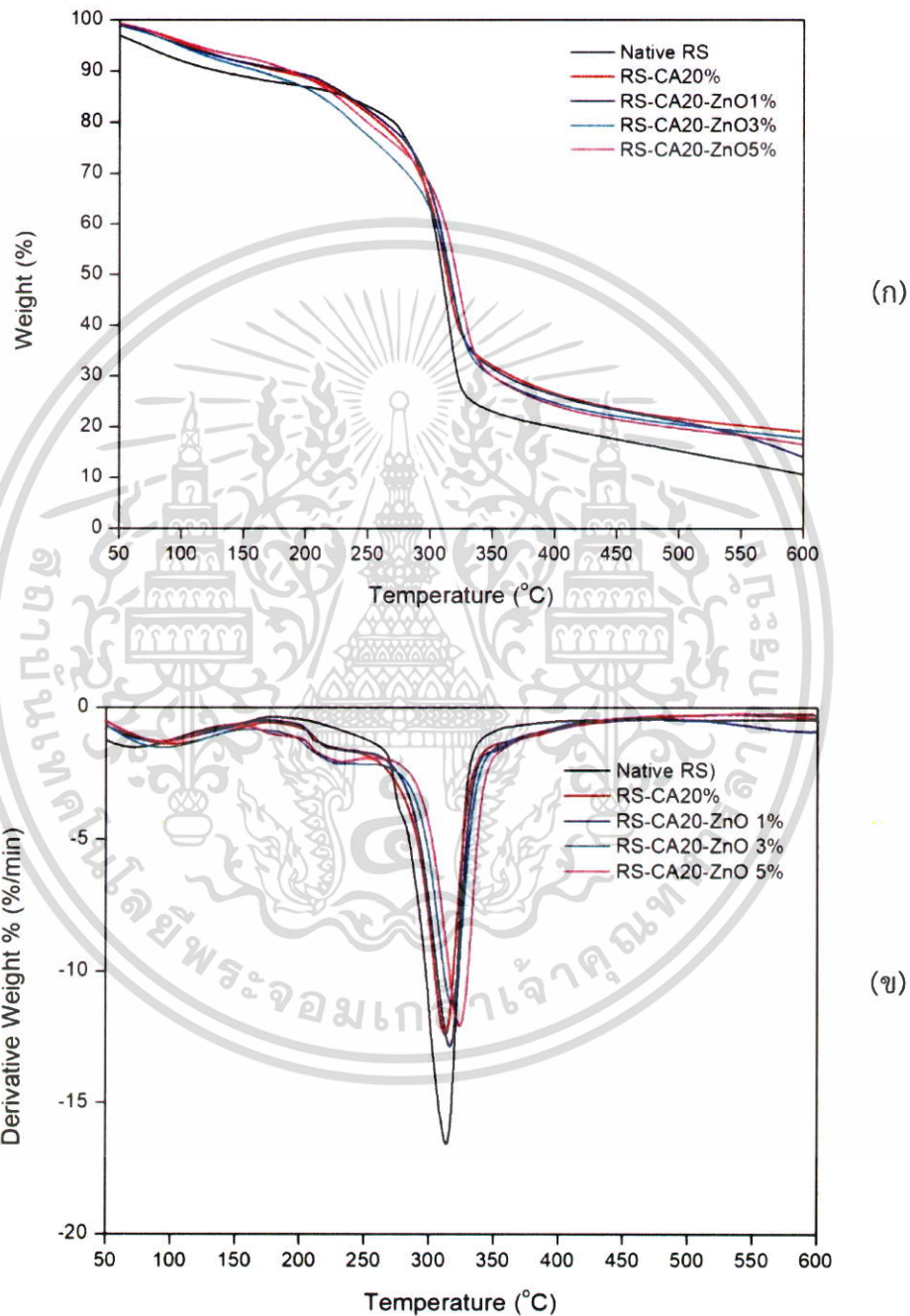
ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)					น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (แป้งที่เกิดการไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 4 (แป้ง)	ช่วงที่ 5 (แป้งที่เกิดการเชื่อมโยง)	
Native RS	80.39	217.57	-	308.84	-	68.49
RS-CA5%	94.76	191.34	250.52	310.72	363.85	61.26
RS-CA10%	96.43	192.27	247.73	311.37	365.43	55.80
RS-CA15%	92.53	193.13	243.82	313.60	367.42	52.37
RS-CA20%	97.55	194.14	242.59	312.49	368.87	50.36

รูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลจากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวได้เป็น 5 ช่วง เรียงลำดับตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าสูตร Native RS มีอุณหภูมิในการสลายตัวแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลน้ำที่ 80-100 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 190-220 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้งที่ 308-312 องศาเซลเซียส [22] และเมื่อทำการเติมกรดซิตริกลงไปพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวเพิ่มขึ้นมา 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้งที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากการเติมกรดซิตริกที่ 240-250 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 5 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยกรดที่ 363-368 องศาเซลเซียส และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดซิตริกที่ใช้เชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในการสลายตัวในช่วงที่ 4 และช่วงที่ 5 เพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติมกรดลงไปปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น ต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเชื่อมโยงส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวในช่วงที่ 3 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการใช้กรดในการเชื่อมโยงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (ช่วงที่ 3) ที่อะตอมออกซิเจนที่ต่อกับอะตอมคาร์บอนที่ตำแหน่งแอลฟา 1,6 และแอลฟา 1,4 กลูโคซิดิก ทำให้สายโซ่โมเลกุลแป้งสั้นลง น้ำหนักโมเลกุลน้อยลง ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวลดลง และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของกรดที่เติมลงไปมีปริมาณมากขึ้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

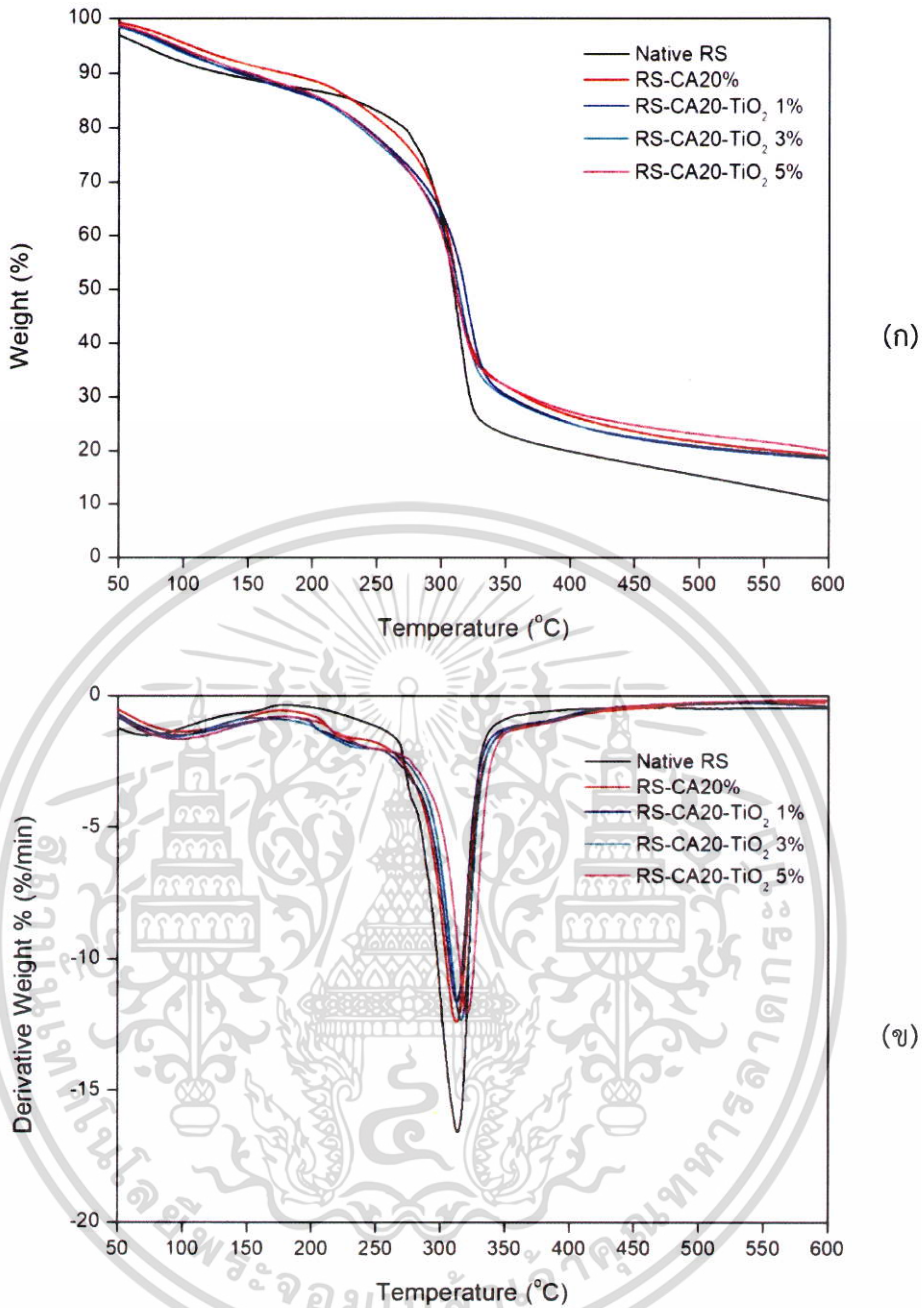
#### 4.7.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดกัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้



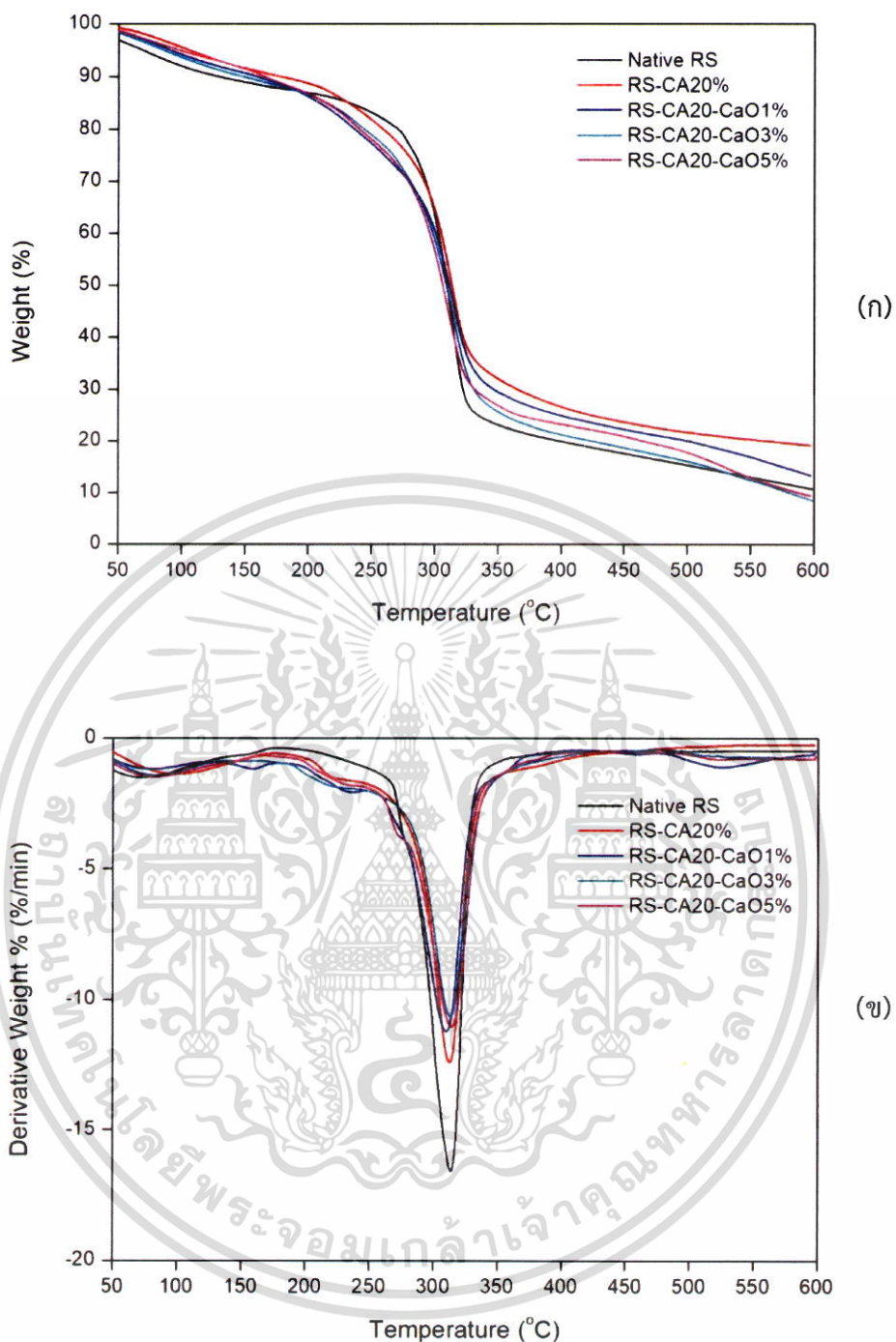
รูปที่ 4.22 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซिटริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชั้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)					น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (แป้งที่เกิดไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 4 (แป้ง)	ช่วงที่ 5 (แป้งที่เกิดการเชื่อมโยง)	
Native RS	80.39	217.57	-	308.84	-	68.49
RS-CA20%	94.76	191.34	250.52	310.72	368.87	61.26
RS-CA20-ZnO1%	94.77	195.05	241.78	316.13	371.25	50.19
RS-CA20-ZnO3%	94.14	195.53	240.26	317.23	391.43	47.95
RS-CA20-ZnO5%	95.68	182.53	233.73	323.91	397.38	45.30
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	94.77	205.35	242.91	312.75	384.84	48.79
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	90.27	183.71	237.27	316.13	385.97	47.12
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	96.46	205.17	235.58	321.20	387.09	45.37
RS-CA20-CaO1%	88.91	161.84	237.58	312.44	363.64	49.20
RS-CA20-CaO3%	83.51	175.88	235.88	313.31	380.06	48.46
RS-CA20-CaO5%	86.10	188.31	233.65	316.44	386.05	46.35

จากรูปที่ 4.22-4.24 และตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลจากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าชั้นงานฟิล์มในทุกสูตรมีอุณหภูมิในการสลายตัวแบ่งเป็น 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำที่ 80-100 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 160-220 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้งที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากการเติมสารเชื่อมโยงด้วยกรดที่ 230-250 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ 308-320 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 5 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ 368-391 องศาเซลเซียส โดยผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิดลงไป พบว่าส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มแบ่งดีขึ้น โดยพบอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งในช่วงที่ 4 และ ช่วงที่ 5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีของโลหะออกไซด์ คือ มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง สามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแบ่งได้ แต่ในทางกลับกันการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งที่เกิดการตัดสายโซ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ช่วงที่ 3) ลดลง เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนที่ดีของอนุภาคโลหะออกไซด์ ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลแป้งบางส่วน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะทำการอบเชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Hejri และคณะ ที่ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มจากแป้งข้าวโพดปรับปรุงด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนเสริมแรง ผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มแป้งได้ โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปแป้งข้าวโพดลดลงเมื่อปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับฟิล์มจากแป้งและพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ และยังพบว่าสมบัติทางความร้อนที่ดีของอนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ คือ มีจุดหลอมเหลว มีความเป็นผลึกและความหนาแน่นสูง ส่งผลให้อัตราการสลายตัวของฟิล์มแป้งเชื่อมโยงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ได้มีการเติมอนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ [52]

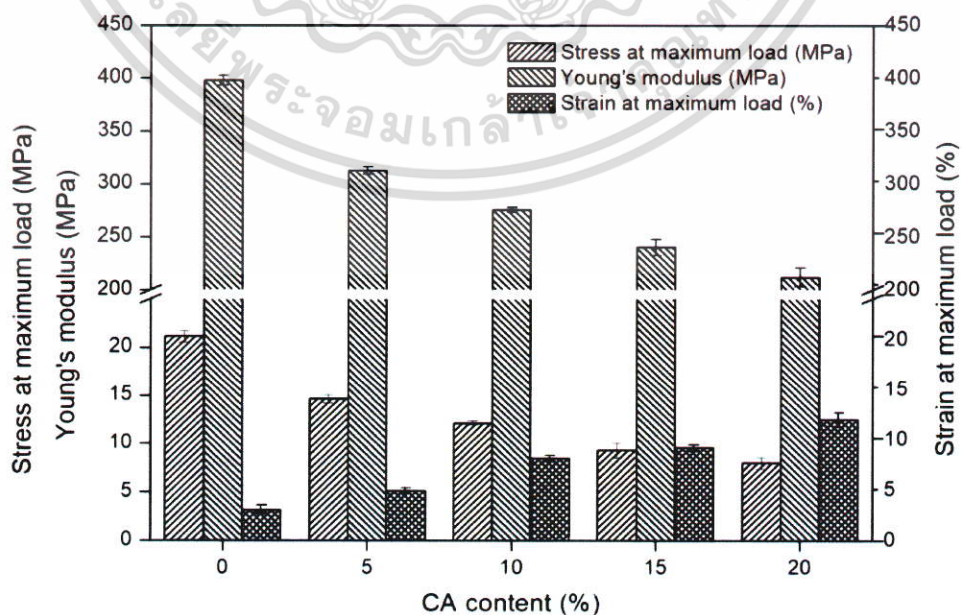
และเมื่อพิจารณาจากชนิดของโลหะออกไซด์ที่เติมลงไป พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปในแป้ง มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียม-ไดออกไซด์มีค่าสูงกว่า ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงจึงมีค่าสูงกว่า [26, 29, 31]

#### 4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดกันที่ปริมาณต่าง ๆ โดยศึกษาจากค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด โดยใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร

##### 4.8.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

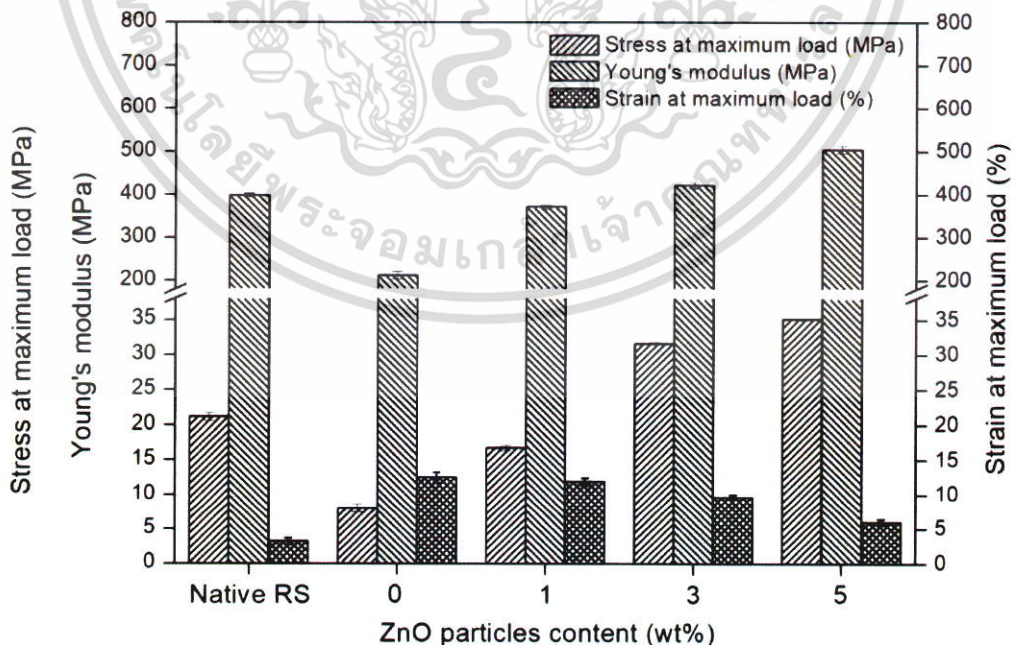


รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.25 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานสูตร Native starch ซึ่งเป็นฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยกรด มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสสูงที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด ในทางกลับกันผลจากการเติมกรด ทำให้ชิ้นงานสูตร RS-CA20% ซึ่งเป็นฟิล์มแป้งที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20% มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสต่ำที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยกรด เกิดอันตรกิริยาการเชื่อมโยงแบบโครงร่างตาข่าย ซึ่งอันตรกิริยาการเชื่อมโยงเหล่านี้ส่งผลให้โครงสร้างและโมเลกุลของแป้งถูกจำกัดการเคลื่อนที่ มีผลทำให้โมเลกุลแป้งสั้นและส่งผ่านแรงที่ได้รับมายากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสจึงลดต่ำลง และลดต่ำลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดที่ใช้เชื่อมโยงมากขึ้น ในทางกลับกันจากผลของการตัดสายโซ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหลังจากการเติมกรด จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น [4, 22] สอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งพบว่าการเติมสารเชื่อมโยงส่งผลให้ผลึกของชิ้นงานฟิล์มแป้งมีค่าลดลง ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสจึงลดต่ำลง และจากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนในหัวข้อ 4.7 พบว่าการเติมสารเชื่อมโยงในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ดึงยืดจึงเพิ่มขึ้น

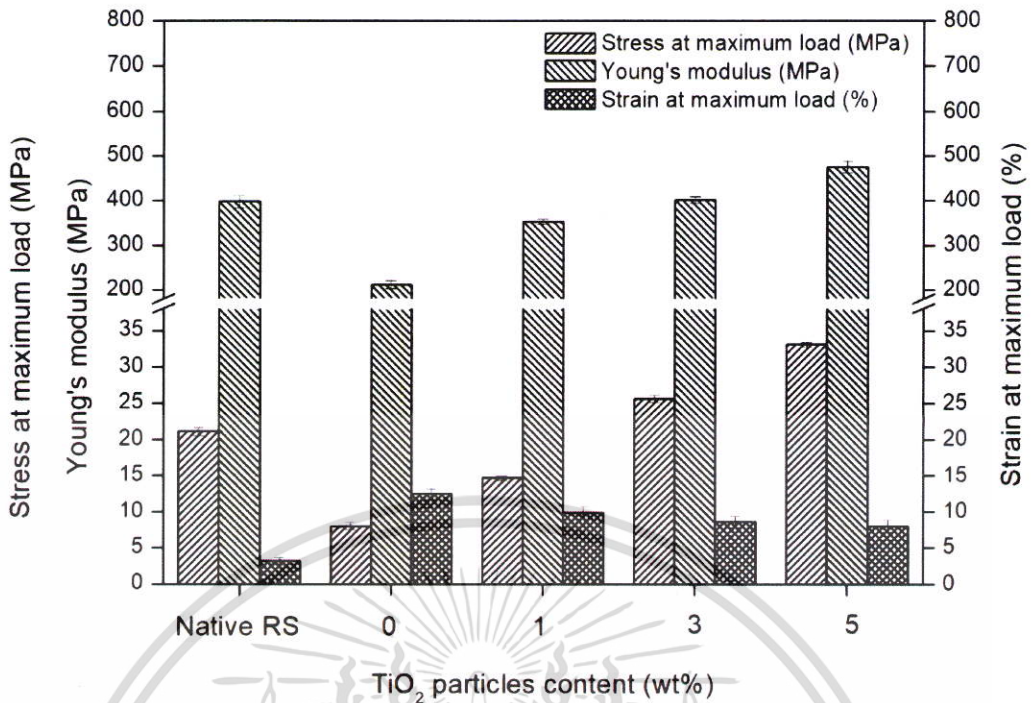
#### 4.8.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

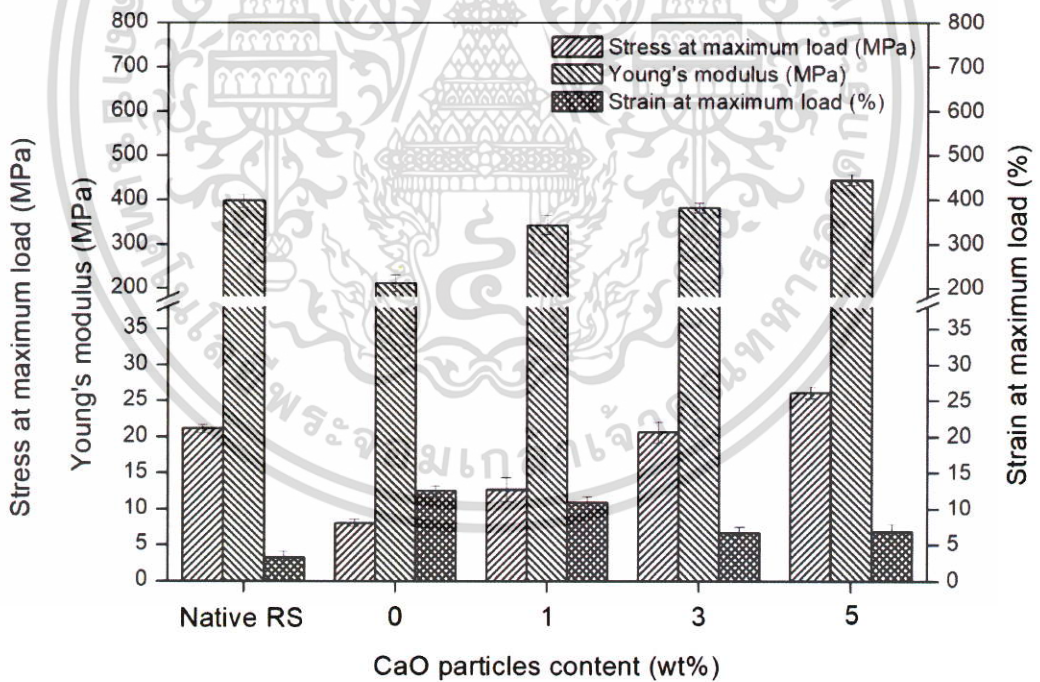


รูปที่ 4.26 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.28 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

จากรูปที่ 4.26-4.28 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลอง พบว่าการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงในฟิล์มแป้งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปเป็นอนุภาคอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อน ความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูง อีกทั้งยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กในระดับไมโครเมตร (200 นาโนเมตร หรือ 0.2 ไมโครเมตร) จึงมีพื้นที่ผิวมากสามารถช่วยส่งผ่านแรงได้ดี นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นงานฟิล์มมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มลดต่ำลงด้วย และจะมีค่าลดต่ำลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปมากขึ้น

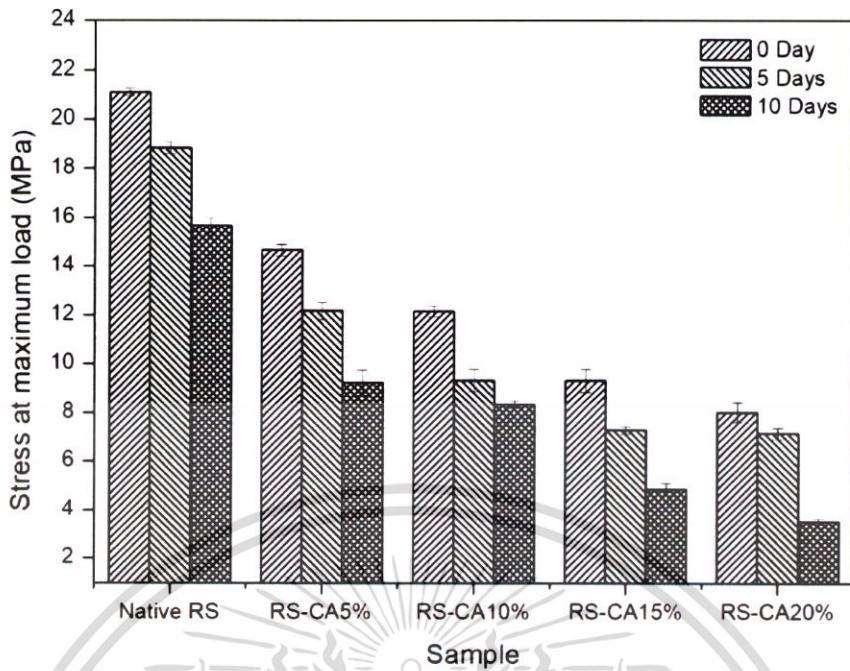
และเมื่อพิจารณาผลของชนิดของโลหะออกไซด์ที่เติมลงไป พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ส่งผลให้ฟิล์มชั้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด รองลงมา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีความหนาแน่นต่อน้ำหนักสูงสุด อีกทั้งจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.4) พบว่าฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีค่าความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นผลึกที่มากขึ้นช่วยในการรับและส่งผ่านแรงได้ดี ค่าความแข็งแรงดึงและค่า มอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

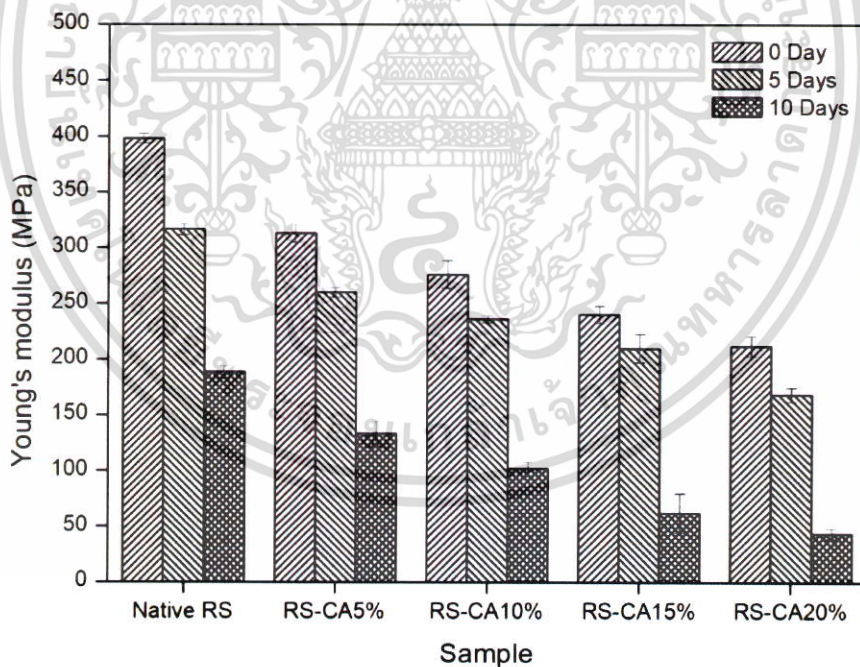
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและมีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ทำการทดลองโดยฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นบันทึกความเปลี่ยนแปลงของฟิล์มที่สังเกตเห็นได้ และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด เปรียบเทียบกับชั้นงานฟิล์มก่อนทำการฝังดิน

##### 4.9.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

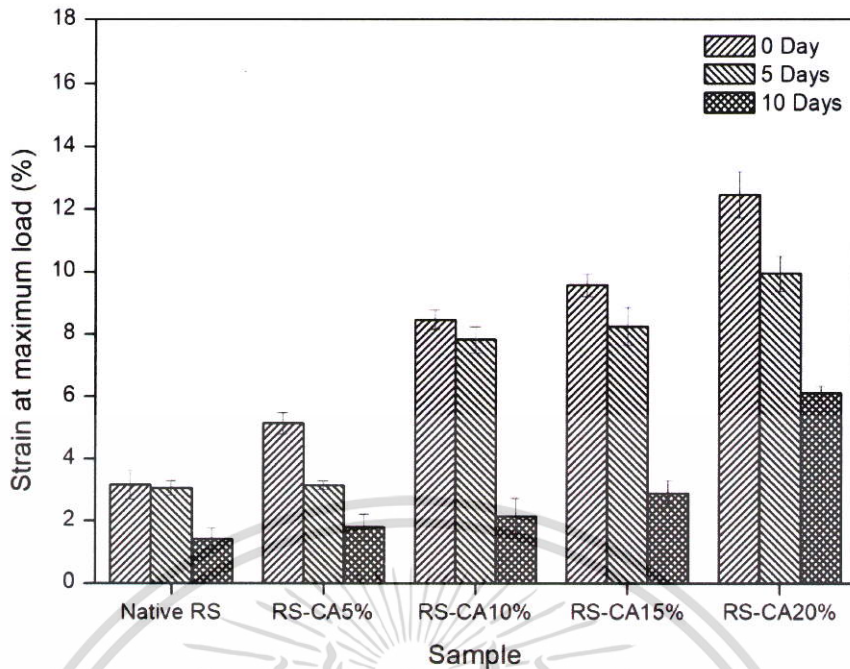


รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงดึงของชั้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 โมดูลัสของชั้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานฟิล์มแปงข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกภายหลังจากทำการฝังดินเป็นเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแปงข้าวเจ้าสูตรต่าง ๆ หลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

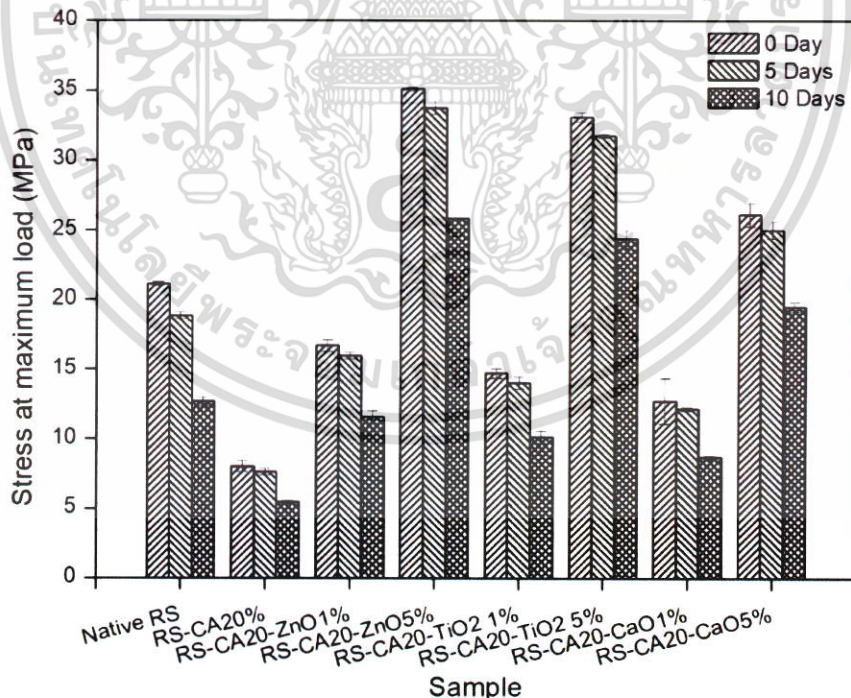
ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยึด	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยึด
Native RS	10.76	20.54	12.01	40.00	55.06	57.61
RS-CA5%	9.54	16.93	10.13	37.59	54.15	59.30
RS-CA10%	6.73	14.39	9.95	37.04	48.66	54.44
RS-CA15%	6.72	12.67	8.10	35.91	49.20	55.17
RS-CA20%	4.60	11.25	7.42	32.12	50.72	51.66

รูปที่ 4.28-4.31 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแปงข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน พบว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ อันได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดภายหลังจากการฝังดินมีแนวโน้มลดลงทุกสมบัติ และมีอัตราการลดลงของสมบัติมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการฝังดินมีค่ามากขึ้น โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดินประกอบ พบว่าชิ้นงานสูตรที่ไม่ได้มีการใช้สารเชื่อมโยง (Native RS) มีการสลายตัวหรือมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดินมากกว่าชิ้นงานในสูตรอื่น ๆ ในทุกช่วงเวลาทดสอบ และผลจากการใส่สารเชื่อมโยงลงไปปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แตกต่างกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใส่ลงไปมีค่ามากขึ้น โดยมีค่าลดลงต่ำสุดในชั้นงานสูตรที่ใส่สารเชื่อมโยงมากที่สุด (RS-CA20%) ทั้งนี้เนื่องจากภายในดินนั้นมีค่าความชื้นและอินทรีย์สารเป็นองค์ประกอบหลัก ประกอบกับโครงสร้างของแบงก์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้วอยู่มาก ทำให้มีสมบัติชอบน้ำสามารถดูดซับน้ำและความชื้นแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลแบงก์สั้นลงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย สมบัติเชิงกลต่าง ๆ จึงลดลง แต่เมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยงในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายมากขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลของแบงก์บางส่วนเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของสารเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้สมบัติความเป็น Hydrophilicity ของแบงก์ลดลงความสามารถในการดูดซับน้ำและความชื้นจากอินทรีย์สารในดินลดลง ค่าความสามารถในการย่อยสลายจึงมีค่าลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้นในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งพบว่าการใส่สารเชื่อมโยงในปริมาณที่มากขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลของแบงก์สามารถจับกับโมเลกุลน้ำลดลง ความเป็น Hydrophilicity ลดลง ความสามารถในการดูดซับความชื้นจึงมีแนวโน้มลดลง

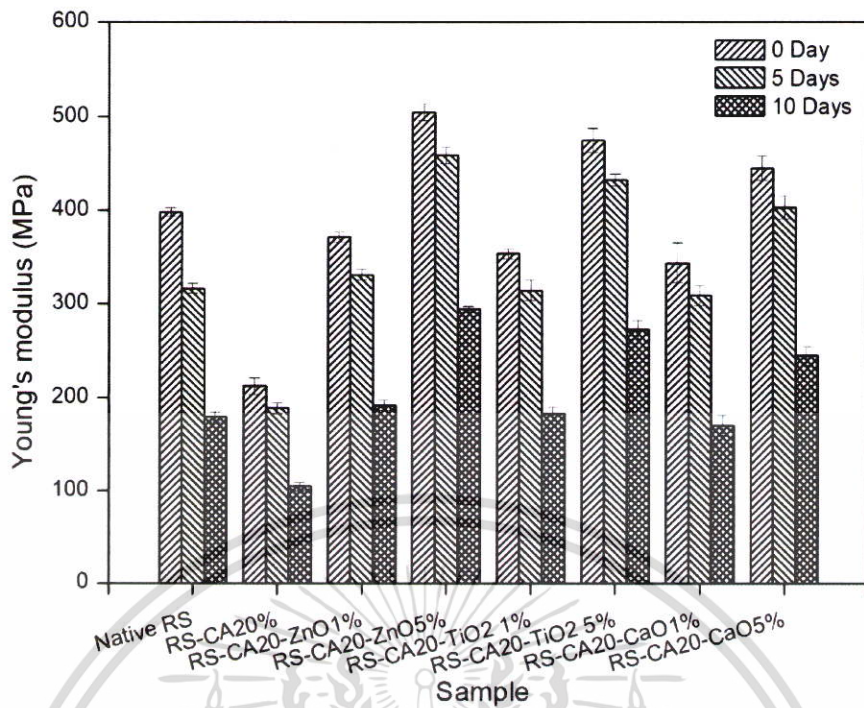
#### 4.9.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแบงก์ข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแบงก์ข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดกันที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

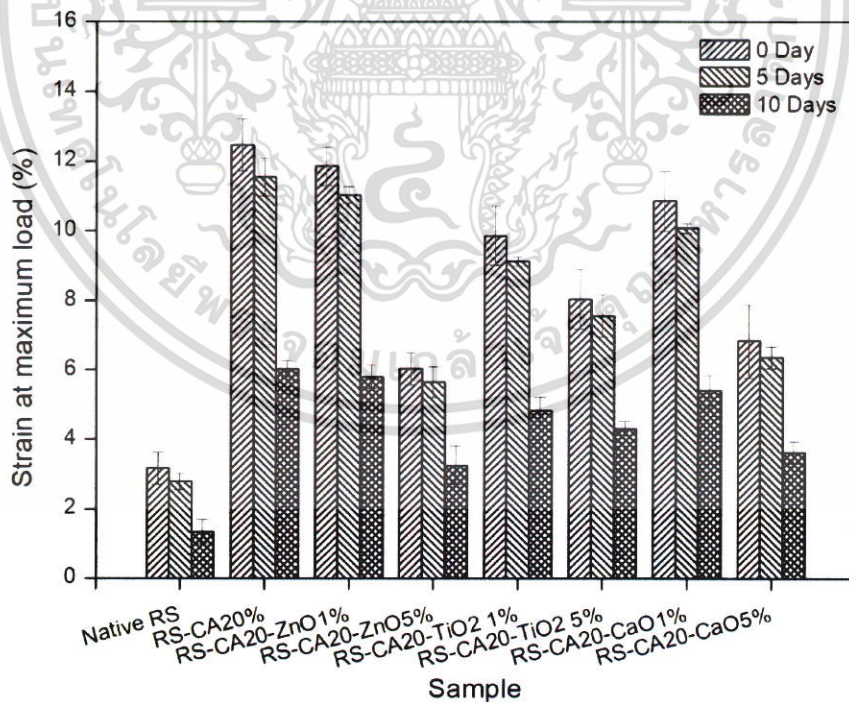


รูปที่ 4.32 ค่าความแข็งแรงดึงของชั้นงานฟิล์มแบงก์ข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 มอดุลัสของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การดัดยืดของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิดที่ปริมาณ 1% และ 5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าสูตรต่าง ๆ หลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน

ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ความแข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด	ความแข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด
Native RS	10.76	20.54	12.01	40.00	55.06	57.60
RS-CA20%	4.60	11.25	7.42	32.12	50.72	51.66
RS-CA20-ZnO1%	4.45	10.88	7.04	30.94	48.40	51.06
RS-CA20-ZnO5%	3.83	9.10	6.45	26.39	41.77	46.13
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	4.53	11.13	7.42	31.02	48.41	51.05
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	4.09	8.99	5.93	26.43	42.52	46.35
RS-CA20-CaO1%	4.36	10.12	7.14	31.58	50.57	50.13
RS-CA20-CaO5%	4.22	9.44	6.98	25.36	45.05	47.02

รูปที่ 4.32-4.34 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และทำการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่างกันภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งภายหลังจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการฝังดินมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน (ตารางที่ 4.10) พบว่ามีอัตราการย่อยสลายที่ลดลงหลังจากมีการใส่อนุภาคโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถอาจเกิดอันตรกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนหรือเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุกับอนุภาคโลหะออกไซด์ ส่งผลให้โมเลกุลน้ำเข้ามาจับกับแป้งได้ลดลง ทำให้ชิ้นงานฟิล์มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมีความสามารถในการดูดซับน้ำและความชื้นน้อยลง อัตราการย่อยสลายหลังจากเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์จึงช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ A.M. Nafchi และคณะ ที่ทำการศึกษาศสมบัติของฟิล์มจากแป้งสาคูผสมเจลาตินจากหนังวัวที่มีการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์แบบแห้ง ผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งและเจลาตินที่มีหมู่ไฮดรอกซิลได้ และยังสามารถไปแทรกและกระจายอยู่ในฟิล์มแป้ง ซึ่งส่งผลต่อการขัดขวางโมเลกุลน้ำที่จะเข้ามาจับกับฟิล์มแป้ง ค่าการดูดซับความชื้นจึงลดต่ำลง ซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราการสลายตัวและสมบัติเชิงกลได้ [50]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาชนิดของอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลหลังทำการฝังดิน พบว่าฟิล์มที่มีการใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีค่าอัตราการย่อยสลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากเมื่อทำการฝังดินชิ้นงาน ความชื้นและอินทรีย์สารเข้ามาเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้งในทุกสูตร เกิดการย่อยสลายโมเลกุลอสัณฐานของแป้งไปบางส่วน เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน ทำให้ค่าที่ได้จากการนำฟิล์มไปทดสอบสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.10 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurements)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ทำการเชื่อมโยงด้วยชิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันโดยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h^\circ$  แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.11-4.12

### 4.10.1 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดชิตริก

ทดสอบหาค่าความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสีของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดชิตริกที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.11 ค่าการวัดสีของชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดชิตริกที่ปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี					
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	WI
Native RS	45.10	0.33	1.10	0.62	73.23	42.80
RS-CA5%	42.06	0.46	1.17	0.79	68.54	39.93
RS-CA10%	41.28	0.44	1.40	1.07	72.68	38.40
RS-CA15%	40.76	0.63	1.38	1.15	65.46	38.51
RS-CA20%	40.59	0.74	1.54	1.45	64.41	38.19

หมายเหตุ ค่า  $L^*$  กำหนดค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า  $a^* > 1$  แสดงสีแดง และถ้า  $a^* < 1$  แสดงสีเขียว ค่า  $b^*$  กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า  $b^* > 1$  แสดงสีเหลือง และถ้า  $b^* < 1$  แสดงสีน้ำเงิน ค่า  $C^*$  แสดงค่าความสดใสของสี ค่า  $h^\circ$  ระบุตำแหน่งของสีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน และ WI แสดงค่าดัชนีความขาว

จากตารางที่ 4.11 แสดงค่าการวัดสีของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าหลังจากทำการเชื่อมโยงด้วยกรดชิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าชิ้นงานฟิล์มแป้งสูตร Native RS ให้ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) และค่าดัชนีความขาวมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มแป้งสูตร RS-CA20% ให้ค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวน้อยที่สุด เนื่องจากฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงมีโมเลกุลอะมิโลสสายโซ่ตรงยาว สามารถจัดเรียงแพ็คตัวหนาแน่นเป็นผลึกได้ จึงมีความทึบและความสว่างขาวมาก ในขณะที่ภายหลังจากการเติมกรดชิตริกเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของฟิล์มแป้งและกรดทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบกึ่ง ซึ่งส่งผลขัดขวางต่อการจัดเรียงเป็นผลึกของแป้งและนอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (หัวข้อที่ 4.7) พบว่าฟิล์มแป้งเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่หลังจากใส่สารเชื่อมโยง ทำให้น้ำหนักของสายโซ่โมเลกุลแป้งลดลง การจัดเรียงเป็นผลึกจึงลดลง ชิ้นงานฟิล์มแป้งหลังจากเชื่อมโยงจึงมีความขาวน้อยลง ค่าความสว่างจึงลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของกรดที่ใช้เชื่อมโยงมีปริมาณมากขึ้น เช่นเดียวกับค่าความสดใส ( $C^*$ ) ซึ่งพบว่าความสดใสของสีลดลงเมื่อปริมาณผลึกของฟิล์มลดลง ในขณะที่ค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  ซึ่งบ่งบอกถึงค่าที่แสดงความเป็นสีแดง-เขียว และสีเหลือง-น้ำเงินตามลำดับ พบว่าฟิล์มหลังจากใส่สารเชื่อมโยงไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีแดง-เขียวและเหลือง-น้ำเงินอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากค่า  $h^\circ$  สามารถบอกโดยรวมได้ว่าฟิล์มแบ่งที่ไมได้มีการเชื่อมโยงมีความขาวมากที่สุดและสดใส น้อยที่สุด ในขณะที่ความขาวลดลงและความสดใสมากที่สุดเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากที่สุด

#### 4.10.2 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณต่างกัน

ทดสอบหาค่าความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสีของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักแล้วเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ผลการทดลอง แสดงดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าการวัดสีของชิ้นงานฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี					
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	WI
Native RS	45.10	0.18	1.10	0.62	73.23	42.80
RS-CA20%	40.59	0.74	1.54	1.45	64.41	38.19
RS-CA20-ZnO1%	48.54	0.98	1.28	1.30	52.56	47.64
RS-CA20-ZnO3%	53.49	1.06	1.15	1.22	47.47	53.21
RS-CA20-ZnO5%	60.76	1.17	1.05	1.33	42.03	61.11
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	70.64	1.20	1.12	1.34	43.14	70.86
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	80.25	1.24	1.07	1.34	40.79	80.76
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	88.38	1.35	1.09	1.40	38.79	89.18
RS-CA20-CaO1%	49.39	1.03	1.15	1.19	48.03	49.05
RS-CA20-CaO3%	54.60	1.25	0.99	1.27	38.38	55.38
RS-CA20-CaO5%	61.62	1.37	1.18	1.32	40.72	69.19

หมายเหตุ ค่า  $L^*$  กำหนดค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า  $a^* > 1$  แสดงสีแดง และถ้า  $a^* < 1$  แสดงสีเขียว ค่า  $b^*$  กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า  $b^* > 1$  แสดงสีเหลือง และถ้า  $b^* < 1$  แสดงสีน้ำเงิน ค่า  $C^*$  แสดงค่าความสดใสของสี ค่า  $h^\circ$  ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน และ WI แสดงค่าดัชนีความขาว

จากตารางที่ 4.12 แสดงการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแบ่งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณต่างกัน พบว่าการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ส่งผลให้ชิ้นงานฟิล์มมีค่าความสว่าง ค่าดัชนีความขาวและค่าความสดใสมากขึ้น โดยชิ้นงานฟิล์มสูตรที่มีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ค่าความสว่าง ค่าดัชนีความขาวและค่าความสดใสมากที่สุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเห (Refractive Index) สูงสุด รองลงมา คือ ซิงค์ออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการเติมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคโลหะออกไซด์ไม่มีผลต่อการแสดงความเป็นสีเขียว-แดงและสีเหลือง-น้ำเงินแต่อย่างใด โดยจากค่า  $h^\circ$  สามารถบ่งบอกได้ว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณมากที่สุดเป็นฟิล์มที่มีความขาวสว่างมากที่สุด โดยมีความขาวสว่างมากที่สุดในชั้นงานฟิล์มสูตร RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5% และฟิล์มที่มีความขาวน้อยที่สุด คือ ฟิล์มสูตร RS-CA20% ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดแต่ไม่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์

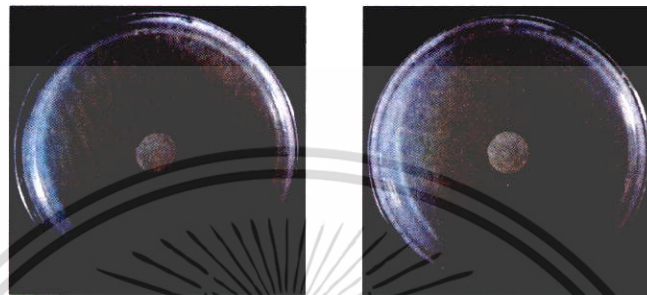
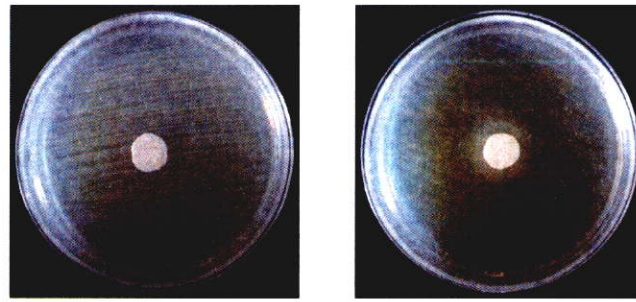
#### 4.11 การทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial activity)

ทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลชีพของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างกัน ปริมาณต่าง ๆ ทำการทดสอบโดยใช้วิธี Agar diffusion เพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อจุลชีพชนิดแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* และชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ให้ผลการทดลองดังนี้

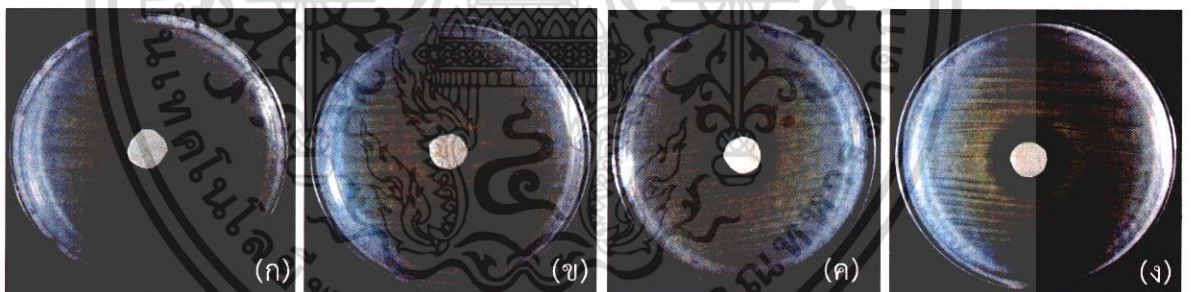
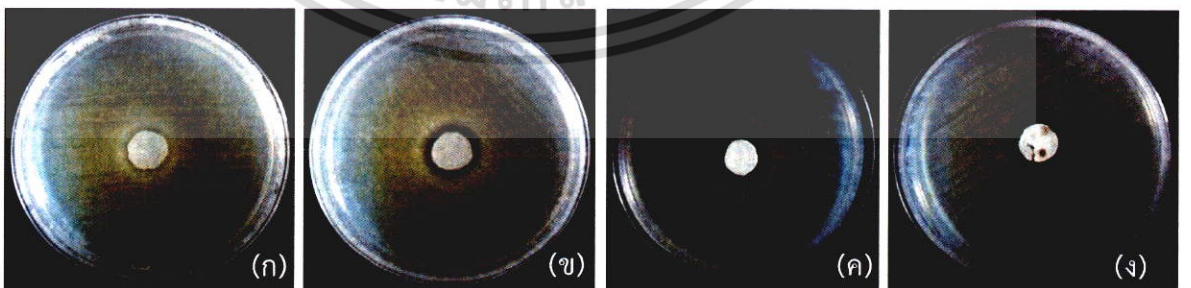
ตารางที่ 4.13 แสดงระยะในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	บริเวณการต้านทานเชื้อ (มิลลิเมตร)		การต่อต้านเชื้อ
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>	
Native RS	-	-	Non-active
RS-CA20%	-	-	Non-active
RS-CA20-ZnO1%	13.9	12.4	Active
RS-CA20-ZnO3%	18.0	17.6	Active
RS-CA20-ZnO5%	28.1	26.2	Active
ZnO particles	34.5	32.1	Active
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	12.1	12.5	Active
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	14.5	15.3	Active
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	26.2	21.8	Active
TiO <sub>2</sub> particles	32.2	29.3	Active
RS-CA20-CaO1%	11.4	12.3	Active
RS-CA20-CaO3%	12.8	13.3	Active
RS-CA20-CaO5%	22.5	18.8	Active
CaO particles	27.1	28.8	Active

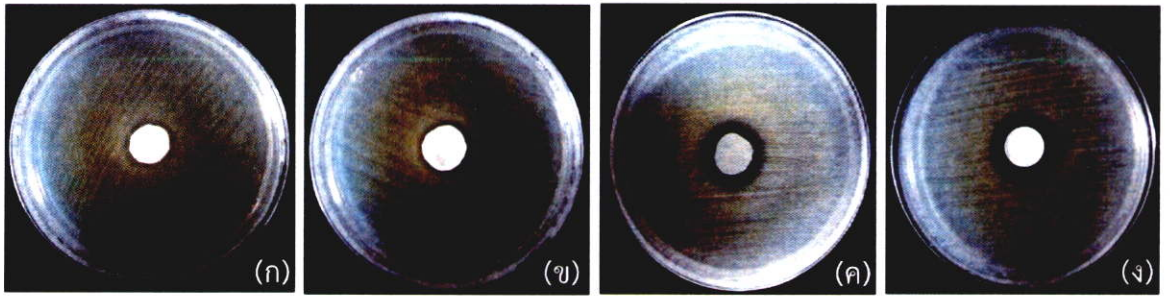
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Escherichia coli**Staphylococcus aureus*

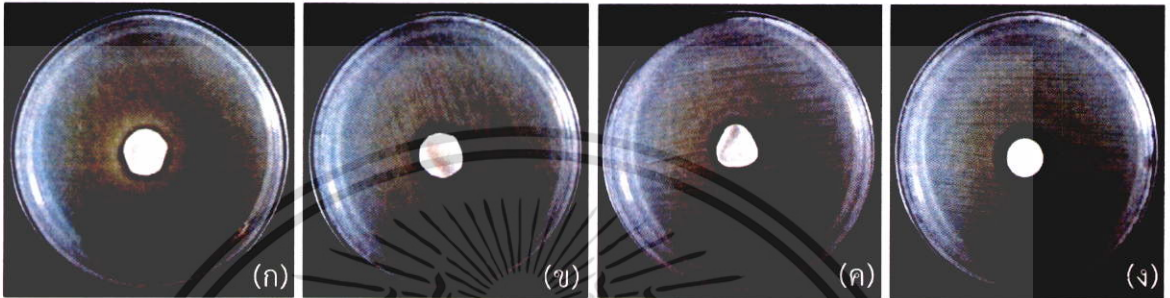
รูปที่ 4.35 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแข็งข้าวเจ้าต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (บน) Native RS และ (ล่าง) RS-CA20%

*Escherichia coli**Staphylococcus aureus*

รูปที่ 4.36 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (ก) RS-CA20-ZnO1% (ข) RS-CA20-ZnO3% (ค) RS-CA20-ZnO5% และ (ง) ZnO particles เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

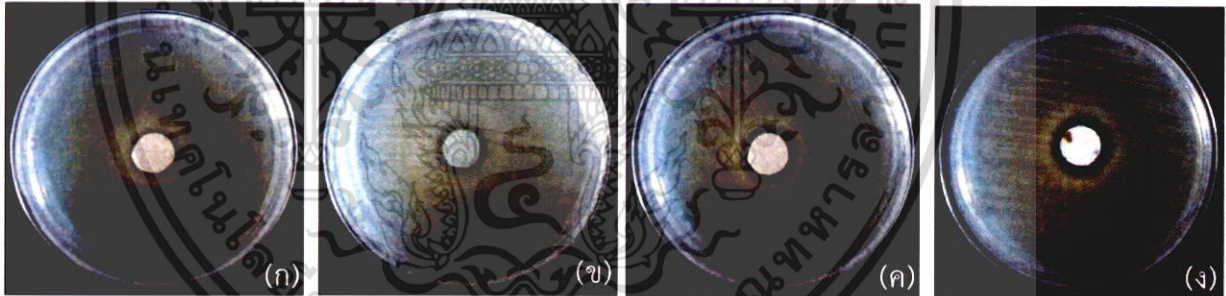


*Escherichia coli*

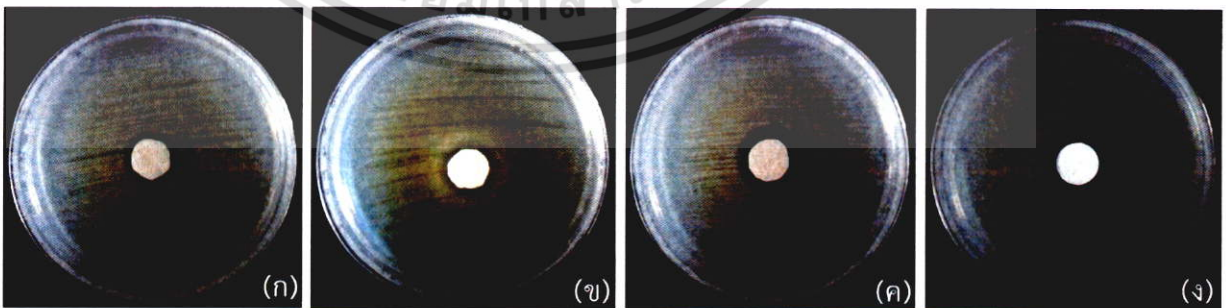


*Staphylococcus aureus*

รูปที่ 4.37 ระยะเวลาการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (ก) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ข) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>3% (ค) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5% และ (ง) TiO<sub>2</sub> particles



*Escherichia coli*



*Staphylococcus aureus*

รูปที่ 4.38 ระยะเวลาการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (ก) RS-CA20-CaO1% (ข) RS-CA20-CaO 3% (ค) RS-CA20-CaO 5% และ (ง) CaO particles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.36-4.38 และตารางที่ 4.13 แสดงระยะการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดให้ผลในลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยพบว่าเมื่อปริมาณของอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาชนิดของอนุภาคโลหะออกไซด์ พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีค่าแสดงระยะการต้านทานเชื้อได้มากที่สุด รองลงมา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเซลล์ของแบคทีเรียของโลหะออกไซด์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งแปรผันตามปริมาณของโปรตอนของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด ซึ่งเมื่อปริมาณโปรตอนมีค่ามาก ความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียยิ่งมากตามไปด้วย [57] โดยคาดว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคโลหะออกไซด์เกิดการแตกตัวในน้ำที่สภาวะเบส เกิดเป็นอนุภาคโลหะไอออนและสารออกซิไดซ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยประจุบวกของโลหะออกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นมีการจับกับประจุลบของผนังเซลล์แบคทีเรีย ทำให้สารออกซิไดซ์บางส่วนสามารถแพร่ทะลุผ่านผนังเซลล์ไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ภายในเซลล์ ทำให้เซลล์แบคทีเรียทำงานผิดปกติและตายในที่สุด โดยเมื่อพิจารณาปริมาณของโปรตอนจากเลขอะตอมของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด พบว่าซิงค์ออกไซด์มีปริมาณโปรตอนมากที่สุด รองลงมา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาชนิดของแบคทีเรียที่มีต่อค่าระยะการต้านเชื้อของอนุภาคโลหะออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมีแนวโน้มสูงกว่าแบคทีเรียแกรมบวกในทุกสูตรการทดลอง เนื่องจากกระบวนการฆ่าเชื้อจะเป็นการรบกวนระบบเมตาบอลิซึม (Metabolism) ภายในเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย โดยการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ภายในเซลล์ ซึ่งแบคทีเรียแกรมลบมีผนังเซลล์ 2 ชั้น คั่นด้วยชั้นของเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ที่มีความบางมาก ( $>10$  nm) ในขณะที่แบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์ 1 ชั้น แต่มีความหนาของชั้นเพปทิโดไกลแคนมากกว่า ( $<80$  nm) การเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกจึงผ่านได้ยากกว่าค่าแสดงระยะการต้านทานจึงมีแนวโน้มที่จะต้านแบคทีเรียแกรมลบได้มากกว่า โดยแสดงความแตกต่างของแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวกได้ในตารางที่ 2.17 และในรูปที่ 2.18

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มแข็งชีวภาพที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก และมีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งภายหลังจากการทำวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปผลการวิจัยทั้งหมดได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน พบว่ามีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1734\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ พีคที่ตำแหน่ง  $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ลดลง และจากผลการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิด พบว่ามีพีคแสดงการสั่นเป็นพีคเอกลักษณ์ของซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ในช่วง  $400\text{--}550\text{ cm}^{-1}$  ผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น เกิดอันตรกิริยาทางกายภาพระหว่างอนุภาคโลหะออกไซด์กับแป้งได้

2. จากการศึกษาผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มแข็งชีวภาพที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยกรด โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจะลดลงเมื่อปริมาณของกรดที่เติมมีค่าเพิ่มขึ้น และจากผลการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงไป พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของชิ้นงานฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแข็งชีวภาพหลังการเติมกรดซิตริกมีลักษณะเรียบขึ้น และมีความเรียบมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น และพบว่าการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ส่งผลให้ฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น และมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์แป้ง

4. จากการศึกษาการบวมตัว พบว่าฟิล์มแข็งชีวภาพที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลง โดยฟิล์มแข็งชีวภาพที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าการบวมตัวต่ำที่สุด และจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

5. จากการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์มแข็งชีวภาพที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มของค่าการดูดซับความชื้นลดลง และจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

6. จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าฟิล์มแข็งชีวภาพที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มของอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง และจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของชิ้นงานฟิล์มมีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าปริมาณของกรดซิตริกที่ใช้เชื่อมโยงแป้งข้าวเจ้าในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของแป้งและแป้งที่ผ่านการเชื่อมโยงมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่มีแนวโน้มลดลง จากผลการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ พบว่าอนุภาคโลหะออกไซด์สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นงานฟิล์มให้ดีขึ้น โดยส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของแป้งและแป้งเชื่อมโยงให้เพิ่มขึ้น และส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง โดยซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพต่อสมบัติทางความร้อนดีที่สุด

8. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสลดลง และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้น การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลงต่ำลง โดยทั้ง 3 ชนิดให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

9. จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า การเติมสารเชื่อมโยงกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายช้าลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย่อยสลาย อัตราการย่อยสลายมีมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการฝังดินมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ พบว่าส่งผลให้อัตราการย่อยสลายช้าลงและอัตราการลดลงของสมบัติเชิงกลช้าลง โดยผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าสมบัติเชิงกลหลังการฝังดินไม่แตกต่างกัน

10. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสี พบว่าการเติมสารเชื่อมโยงกรดซิตริกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่าง ความสดใส และดัชนีความขาวมีแนวโน้มลดลง และเมื่อทำการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณต่างกัน พบว่าปริมาณของอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชั้นงานฟิล์มมีความสว่าง และค่าดัชนีความขาวเพิ่มมากขึ้น โดยฟิล์มชั้นงานทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี ไนโทเจนสีแดง/เขียว และเหลือง/น้ำเงินแต่อย่างใด

11. จากการศึกษาสมบัติการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวและชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถแสดงระยะการต่อต้านเชื้อต่อแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureous* ได้ เมื่อทำการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ พบว่าที่ปริมาณสูงสุดของการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ แสดงระยะการต่อต้านได้ดีที่สุด โดยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการต้านทานที่ดีที่สุด และมีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *E.coli* ได้ดีที่สุด

จากการทดสอบสมบัติทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่า ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมกรดซิตริก 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบการบวมตัว การดูดซับความชื้น อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติการต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์เพื่อใช้เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ ดังนี้

1. ศึกษาการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น ซิลเวอร์นาโน เป็นต้น ซึ่งน่าจะให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า
2. ศึกษาการใช้แป้งชนิดอื่นที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง เช่น แป้งข้าวเหนียว (Waxy starch) หรือแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy maize starch) ซึ่งอาจจะช่วยให้ฟิล์มมีลักษณะใสหรือโปร่งแสงมากขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น
3. ศึกษาการเชื่อมโยงแป้งโดยใช้เกลือของกรด เช่น โซเดียมซัคซิเนต เพื่อลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งอาจส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การดักจับของชิ้นงานฟิล์มให้ลดน้อยลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] กษิตศ อิมประไพ, อรพิน เกิดชูชื่น และณัฐรา เลหากุลจิตต์. 2553. “การศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง.” ว. วิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 41 ฉบับที่ 3/1 คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ. 609-612.
- [3] Ma, X. Chang, P.R. Yu, J. and Stumborg, M. 2009. “Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites.” *Carbohydrate Polymers*. 75 : 1-8.
- [4] จินตภา แต้มสีคราม. 2558. “สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Menzel, C. Olsson, E. Plivelic, T.S. Andersson, R. Johansson, C. Kuktaite, R. Jarnstrom, L. and Koch, K. 2013. “Molecular structure of citric acid cross-linked starch films.” *Carbohydrate Polymer*. 96 : 270-276.
- [6] Hoseinnejad, M. Jafari, S.M. and Katouzian, I. 2017. “Inorganic and metal nanoparticles and their antimicrobial activity in food packaging applications.” *Critical Reviews in Microbiology*.
- [7] Akhavan, A. Khoylou, F. and Ataeivarjovi, E. 2017. “Preparation and characterization of gamma radiated starch/PVA/ZnO nanocomposite films.” *Radiation Physics and Chemistry*. 138 : 49-53.
- [8] วิไลวรรณ โพล้งมี. 2552. “การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาติค.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] ไพโรจน์ ไบตาเฮ. 2555. “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2553. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [11] จุฬากานต์ บุญมี. ม.ป.พ. “พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastics) ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.” *วารสารสิ่งแวดล้อม*. 16(2) : 15-19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Whistler, R.L. Bemiller, J.N. and Paschall, E.F. 1984. **Starch : chemistry and technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Florida : Academic Press.
- [13] ศิริวิมล สุขสวัสดิ์. 2556. “การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแล็กไทด์ที่ผ่านการใช้งานโดย แอคติโนมายซีสต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [14] ภัทรารุช มนต์วิเศษ. ม.ป.พ. **พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer)**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] สุขลี รอดทั้ง. 2548. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/แป้ง/แป้งตัดแปรง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] อริญา ลากโคกสูง. 2555. “ผลของปริมาณอะไมโลสและโครงสร้างอะไมโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งหนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [17] ธนากร รัตนธรรมธร. 2559. “ผลของการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยของแป้ง.” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 21(2) : 246-259.
- [18] คีนจันทร์ ณ นคร. 2552. “ผลของปริมาณอะไมโลสและสถานะการผลิตต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชข้าวพรีเจลาติไนท์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [19] นรศิษฐ์ จันทรวงศ์. 2547. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวตัดแปรงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [20] อนงค์ เจษฎาญาณเมธา. 2534. “แป้งมันสำปะหลังตัดแปรง : การแทนที่และการเชื่อมขวาง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] ภัทรา ปกรณ์สมบูรณ์. 2550. “การใช้กรดอินทรีย์ทดแทนโซเดียมเบต้าไซลไฟต์ในการฟอกขาวเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำจากข้าว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [22] อัจจิมา สุทธิชูจิต. 2560. “สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งท้าวย้ายมอมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] ปิยพรรณ ปาณศรี. 2554. “การปลูกผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลบนวัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลต/บิวทิลอะคริเลต ที่มีการฝังซิงค์ออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] Material safety data sheet. 2004. **Zinc Oxide**. [Online]. Available : <http://italmarth.com/web/EnCH0565.htm>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25/พ.ย./60.
- [25] กัณฑ์นิษฐ์ ผิวแดง. 2557. “การสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยวิธีตกตะกอนร่วม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] บุชบา พิพิชวัฒน์วงศ์, ปทุมพร เชิดฉาย และสุปราณี โคลดประโคน. 2552. “การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] ชลลดา อีรการุณวงศ์. 2555. “ไทเทเนียมไดออกไซด์ : วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย.” *KKU Science Journal*. 40(4). 1049–1058.
- [28] Material safety data sheet. 2004. **Titanium dioxide**. [Online]. Available : <http://italmarth.com/web/EnCH0243.htm>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25/พ.ย./60.
- [29] จันทร สาททอง, นันทิวัฒน์ ตระการสุข และชุตินา พิริยะอังกูร. 2551. “การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] Material safety data sheet. 2004. **Calcium Oxide**. [Online]. Available : <http://www.italmarth.com/web/EnCH0404.htm>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 10/พ.ย./61.
- [31] ชิตสุปรีย์ กตาทิการกุล. 2556. “ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารเอชพีคิวเอ็มในยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมเสริมแรงผงเขม่าดำ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [32] Fairbrother, R. W. and Taylor, G. 1962. **A Text-Book of Bacteriology**. 9<sup>th</sup> ed. Massachusetts : Butterworth-Heinemann.
- [33] นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. 2541. **ลักษณะและโครงสร้างละเอียดของแบคทีเรีย : จุลชีววิทยาทั่วไป**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
- [35] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล : การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง*. 23(2) : 140-159.
- [36] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2559. **Glycerol**. [Online]. Available : <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1568>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 11/พ.ย./60.
- [37] Zhou, J.J. Wang, S.Y. and Gunasekaran, S. 2009. “Preparation and characterization of whey protein film incorporated with TiO<sub>2</sub> nanoparticles.” *Journal of Food Science*. 74 : N50-N56.
- [38] Nassiri, R. and Nafchi, A.M. 2013. “Antimicrobial and barrier properties of bovine gelatin films reinforced by nano TiO<sub>2</sub>.” *Journal of Chemical Health Risks*. 3(3) : 12-28.
- [39] Nafchi, A.M. Nassiri, R. Sheibani, S. and Ariffin, F. 2013. “Preparation and characterization of bionanocomposite films filled with nanorod-rich zinc oxide.” *Carbohydrate Polymers*. 96 : 233-239.
- [40] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2557. **กรดซิตริก**. [Online]. Available : <http://ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/146-6034.pdf>
- [41] Alves, V.D. Mali, S. Belei, A. Victoria, M. and Grossman, E. 2007. “Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties.” *Food engineering*. 78 : 941-946.
- [42] Zamiri, R. Zakaria, A. Ahangar, H.A. Darroudi, I. Zakd, A.K. and Drummen Gregor P.C. 2012. “Aqueous starch as a stabilizer in zinc oxide nanoparticle synthesis via laser ablation.” *Journal of Alloys and Compounds*. 516 : 41– 48.
- [43] Jiugao, Y. Ning, W. and Xiaofei, M. 2005. “The effects of citric acid on properties of plasticized thermoplastic starch plasticized by glycerol.” *Starch*. 57 : 494–504.
- [44] Oleyaei, S.A. Zahedi, Y. Ghanbarzadeh, B. and Moayedi, A.A. 2016. “Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 89 : 256–261.
- [45] Butt, A.R. Ejaz, S. Baron, J.C. Kram, M. and Ali, I.S. 2014. “CaO Nanoparticles as a potential drug delivery agent for biomedical applications.” *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructure*. 10 (3) : 799-809.
- [46] Ahanger, E.G. Abbaspour-fard, M.H. Shahtahmasebi, N. Khojastehpour, M and Maddahi, P. 2014. “Preparation and characterization of PVA/ZnO nano-composite.” *Journal of Food Processing and Preservation*. 39 : 1442–1451.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] ยศธร ธเนศรุ่งโรจน์. 2557. “ผลของชนิดของแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] Mei, J.Q. Zhou, D.N. Jin, Z.Y. Xu, X.M. and Chen, H.Q. 2015. “Effect of citric acid esterification on digestibility, structural and physicochemical properties of cassava starch.” *Food Chemistry*. 187 : 378-384.
- [49] Tsai, W.B. Kao, J.Y. Wu, T.M. and Cheng, W.T. 2016. “Dispersion of titanium oxide nanoparticles in aqueous solution with anionic stabilizer via ultrasonic wave.” *Journal of Nanoparticles*. 1-9.
- [50] Nafchi, A.M. Nassiri, R. Sheibani, S. Ariffin, F. and Karim, A.A. 2013. “Preparation and characterization of bionanocomposite films filled with nanorod-rich zinc oxide.” *Carbohydrate Polymers*. 96 : 233–239.
- [51] Reddy, N. and Yang, Y. 2010. “Citric acid cross-linking of starch films.” *Food Chemistry*. 118 : 702-711.
- [52] Hejri, Z. Seifkordi, A.A. Ahmadpour, A. Zebarjad, S.M. and Maskooki, A. 2013. “Biodegradable starch/poly (vinyl alcohol) fillm reinforced with titanium dioxide nanoparticles.” *International Journal of Minerals; Metallurgy and Materials*. 20 (7) : 1-11.
- [53] Kotharangannagari, V.K. and Khrishnan. 2016. “Biodegradable hybrid nanocomposites of starch/lysine and ZnO nanoparticles with shape memory properties.” *Materials and Design*. 109 : 590-595.
- [54] Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2013. “The effects of cross-linked starch on the properties of thermoplastic starch.” *Materials and Design*. 45 : 586-589.
- [55] Jegan, A. Ramasubbu, A. Karunakaran, K. and Vasanthkumar, S. 2012. “Synthesis and characterization of zinc oxide - agar nanocomposite.” *International Journal of Nano Dimension*. 2 (3) : 171-176.
- [56] Roy, A. Gauri, S.S. Bhattacharya, M. and Bhattacharya, J. 2013. “Antimicrobial activity of CaO nanoparticles.” *Journal of Biomedical Nanotechnology*. 9 : 1–8.
- [57] Sirelkhatim, A. Mahmud, S. Seeni, A. Mohamad, N.H. Ann, K.C. Khadijah, S. Bakhori, M. Hasan, H. and Mohamad, D. 2015. “Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism.” *Nano-Micro Letters*. 7(3) : 219–242.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 พื้นที่ใต้กราฟของพีคจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค $1734\text{ cm}^{-1}$ ( $\text{A cm}^{-1}$ )
Native RS	-
RS-CA5%	12.61
RS-CA10%	13.38
RS-CA15%	14.47
RS-CA20%	14.68
RS-CA20-ZnO1%	14.24
RS-CA20-ZnO3%	14.12
RS-CA20-ZnO5%	14.50
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	14.83
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 3%	15.02
RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	14.79
RS-CA20-CaO1%	12.61
RS-CA20-CaO3%	14.13
RS-CA20-CaO5%	14.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 เเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยง ด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)				
	Native RS	RS-CA5%	RS-CA10%	RS-CA15%	RS-CA20%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	427.16	301.52	222.65	194.12	195.26
2	553.78	342.66	289.41	240.03	235.65
3	612.69	388.18	335.65	281.51	273.37
4	637.81	395.45	364.32	296.26	280.50
5	655.95	401.24	371.15	320.70	296.90
6	659.02	416.57	383.83	348.98	328.44
72	678.21	453.33	421.14	393.66	373.25

ตารางที่ ข.2 เเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยง ด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ ปริมาณต่าง ๆ กัน ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้ง RS-CA20% สูตรต่าง ๆ (%)								
	ZnO	ZnO	ZnO	TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	CaO	CaO
	1%	3%	5%	1%	3%	5%	1%	3%	5%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	185.24	172.66	170.20	190.24	180.66	178.20	200.24	168.66	170.20
2	222.05	206.40	190.45	239.05	216.40	199.45	232.05	216.40	198.45
3	263.64	246.06	215.64	253.64	256.06	235.64	268.64	256.06	245.64
4	264.08	259.90	230.15	266.08	259.90	240.15	264.08	269.90	250.15
5	280.00	280.33	267.22	292.00	270.33	257.22	290.00	281.33	257.22
6	330.55	313.32	303.55	310.55	303.32	293.55	334.55	323.32	313.55
72	355.33	348.71	334.11	345.33	358.71	354.11	366.33	358.71	354.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้า  
เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิด  
เป็นระยะเวลา 14 วัน

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	Native RS	RS-CA5%	RS-CA10%	RS-CA15%	RS-CA20%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	8.56	6.00	4.27	4.42	4.05
2	11.49	10.07	9.08	8.71	7.12
3	13.27	12.50	11.83	10.99	8.44
4	14.69	13.39	13.04	12.17	9.48
5	15.56	14.56	13.47	12.86	9.71
6	15.64	14.64	13.80	13.26	10.28
7	15.73	14.73	14.01	13.31	10.73
8	15.95	14.90	14.12	13.61	10.87
9	16.20	14.92	14.35	13.41	10.94
10	-	15.08	14.38	13.85	11.01
11	-	15.19	14.55	13.82	11.14
12	-	15.55	14.41	13.67	11.16
13	-	15.74	14.61	13.87	11.24
14	-	15.86	14.56	13.90	11.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

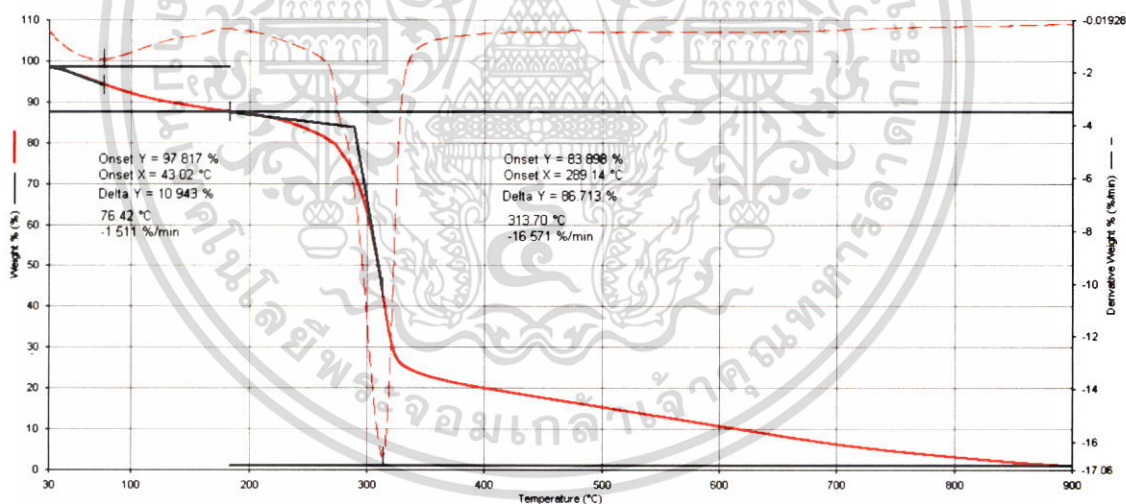
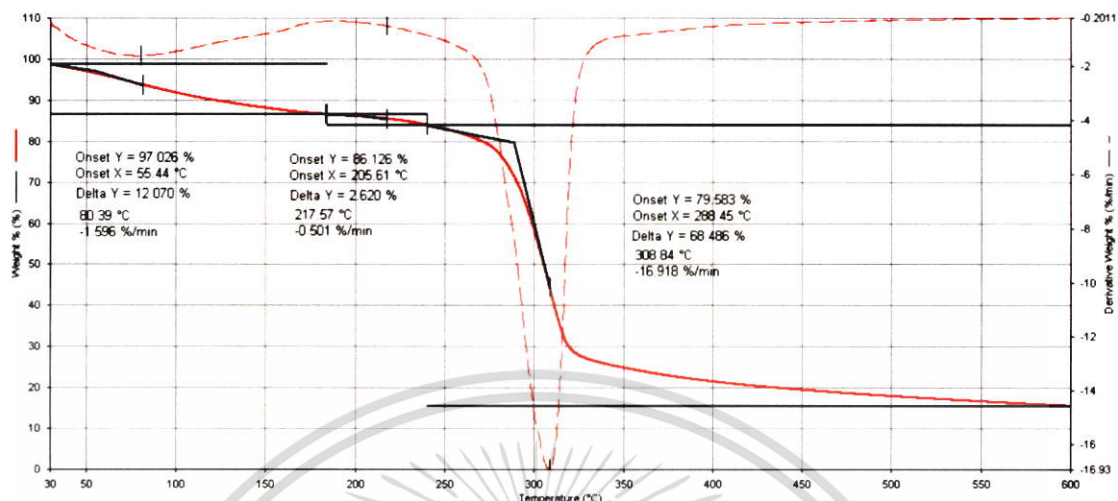
ตารางที่ ค.2 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งข้าวเจ้า เชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ ต่างชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ภายหลังจากการภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบ ปิดเป็นระยะเวลา 22 วัน

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชั้นงานฟิล์มแป้ง RS-CA20% สูตรต่าง ๆ (%)								
	ZnO 1%	ZnO 3%	ZnO 5%	TiO <sub>2</sub> 1%	TiO <sub>2</sub> 3%	TiO <sub>2</sub> 5%	CaO 1%	CaO 3%	CaO 5%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	4.16	3.66	3.15	4.33	3.04	3.19	4.26	4.16	3.85
2	6.62	4.84	4.78	6.05	5.00	4.81	6.12	5.94	5.78
3	7.99	6.44	6.70	8.06	6.39	6.63	7.88	7.74	7.60
4	8.58	7.60	7.74	9.05	7.47	7.85	8.88	8.30	8.14
5	9.08	8.54	8.46	9.59	9.07	8.72	8.93	8.65	8.46
6	9.74	9.53	8.83	9.88	9.53	9.19	9.34	8.83	8.68
7	10.09	9.91	9.15	10.43	9.84	9.35	9.79	9.28	8.85
8	10.35	10.28	9.57	10.81	9.94	9.61	10.15	9.53	9.16
9	10.43	10.36	9.63	10.92	9.98	9.85	10.43	9.91	9.53
10	10.52	10.57	9.68	11.01	10.06	9.86	10.72	10.26	9.88
11	10.58	10.50	9.71	11.06	10.52	10.01	10.66	10.35	9.95
12	10.72	10.53	9.72	11.12	10.70	10.03	10.72	10.45	10.02
13	10.81	10.50	9.75	11.14	10.54	10.04	10.81	10.60	10.17
14	10.87	10.57	9.78	11.15	10.47	10.06	10.80	10.68	10.28
15	10.92	10.54	9.86	11.22	10.68	10.10	10.92	10.71	10.36
16	10.93	10.59	9.95	11.24	10.79	10.06	10.93	10.76	10.45
17	10.95	10.61	10.03	11.28	10.73	10.03	11.05	10.76	10.53
18	10.98	10.64	10.00	11.38	10.62	10.06	-	-	-
19	10.87	10.60	10.04	11.42	10.59	10.04	-	-	-
20	10.95	10.61	10.09	-	-	-	-	-	-
21	10.96	10.59	10.06	-	-	-	-	-	-
22	10.99	10.60	10.14	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ (-) ภายใตตารางหมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเกิดเชื้อราขึ้นที่ชั้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

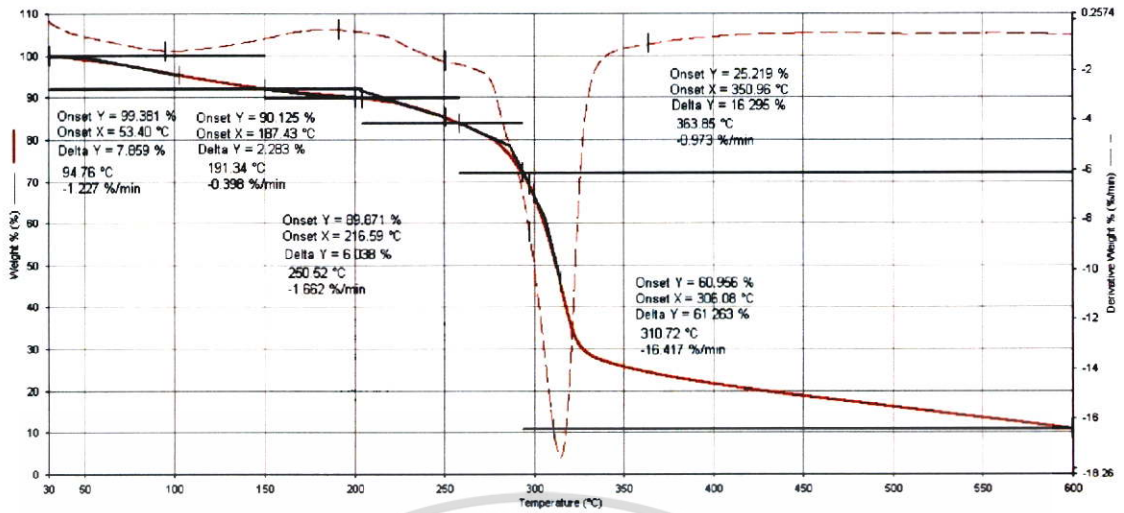
## ภาคผนวก ง



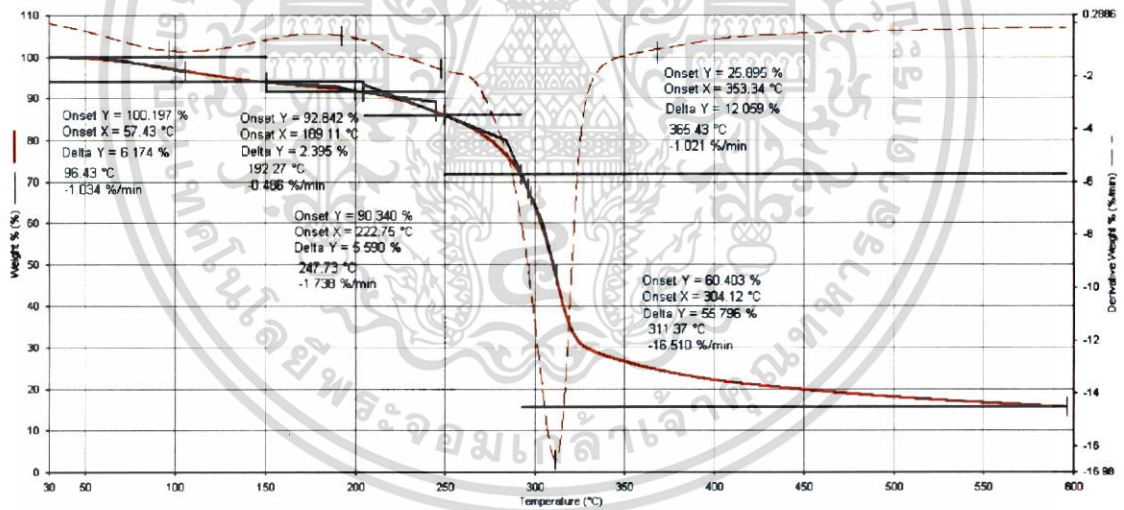
(ข)

รูปที่ ง.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก โดยอุณหภูมิในการทดสอบสูงสุดต่างกัน (ก) 600 °C (ข) 900 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

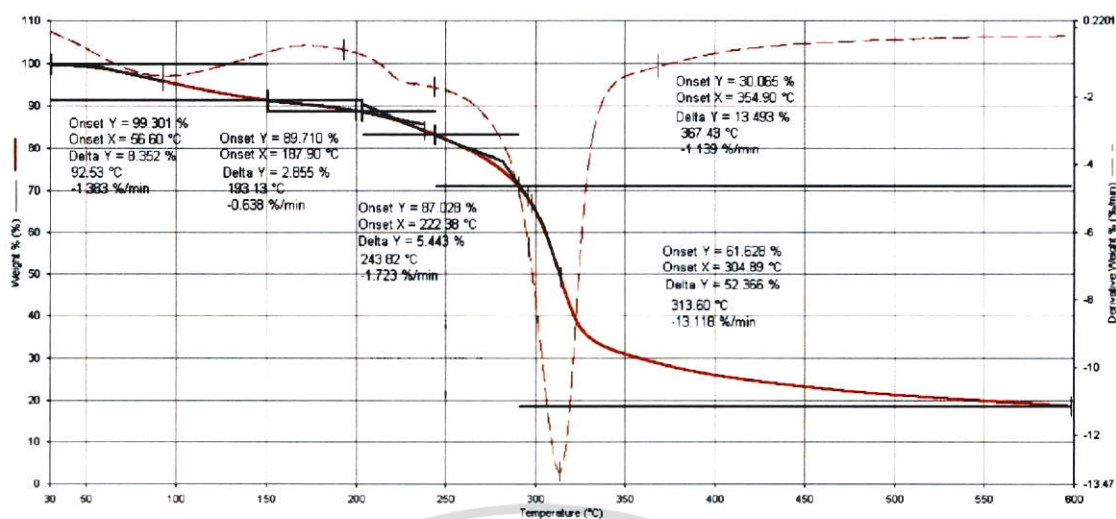


รูปที่ ง.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C

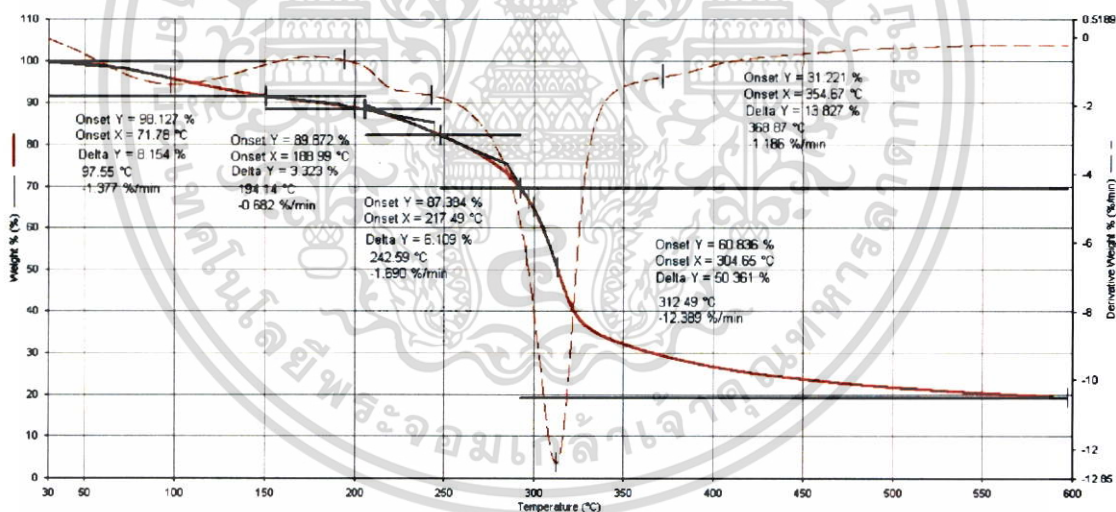


รูปที่ ง.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชั้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

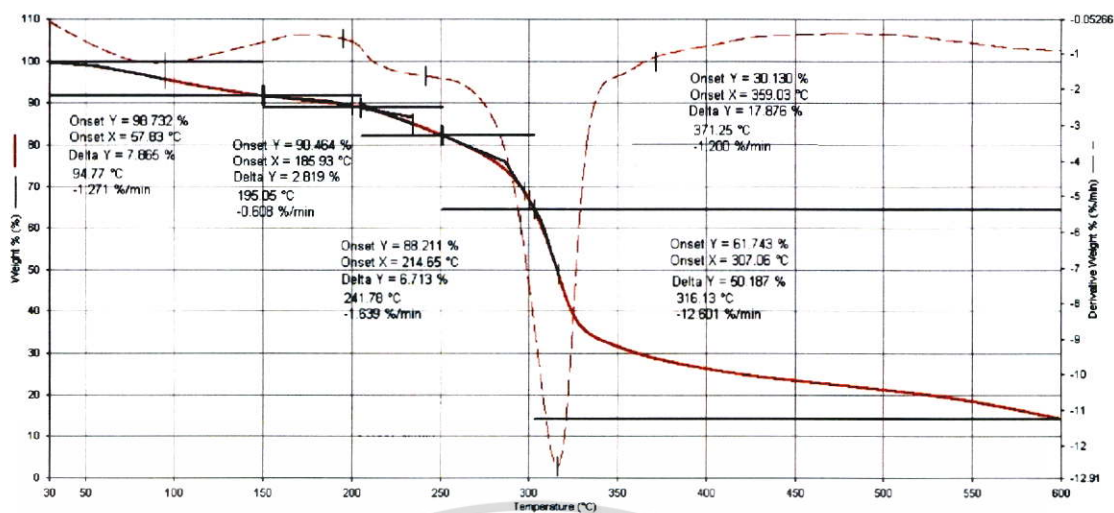


รูปที่ ง.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C

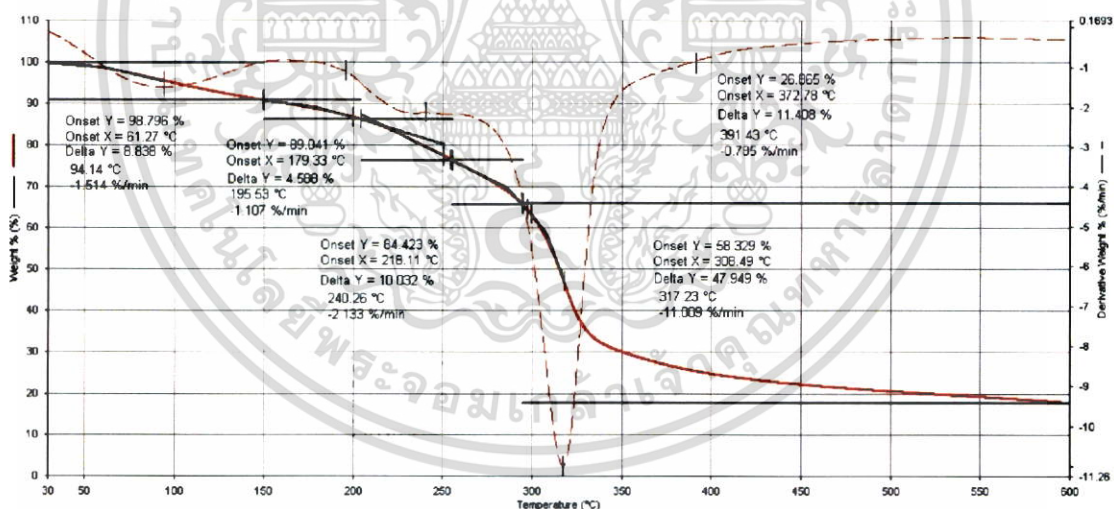


รูปที่ ง.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการทดสอบสูงสุด 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

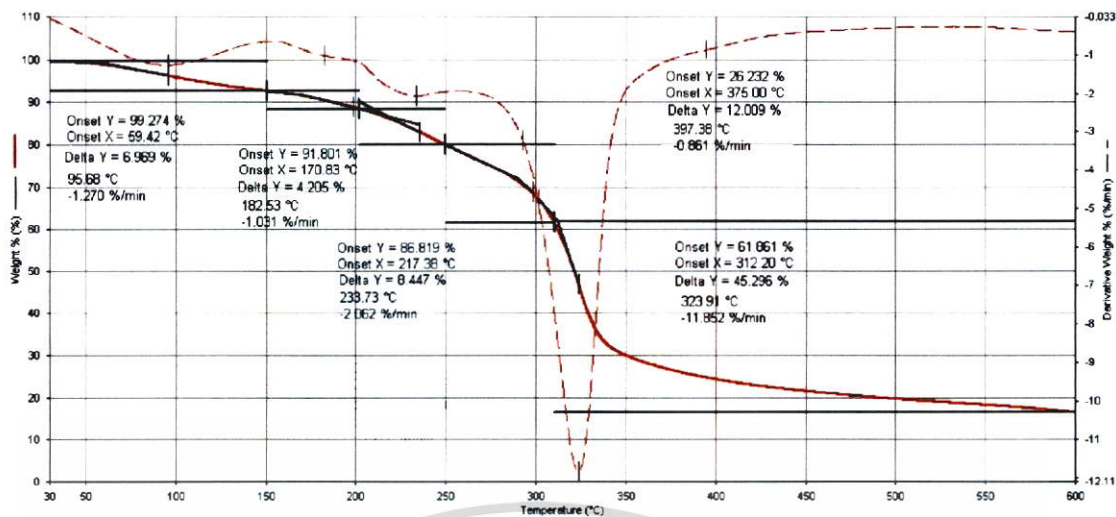


รูปที่ 3.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

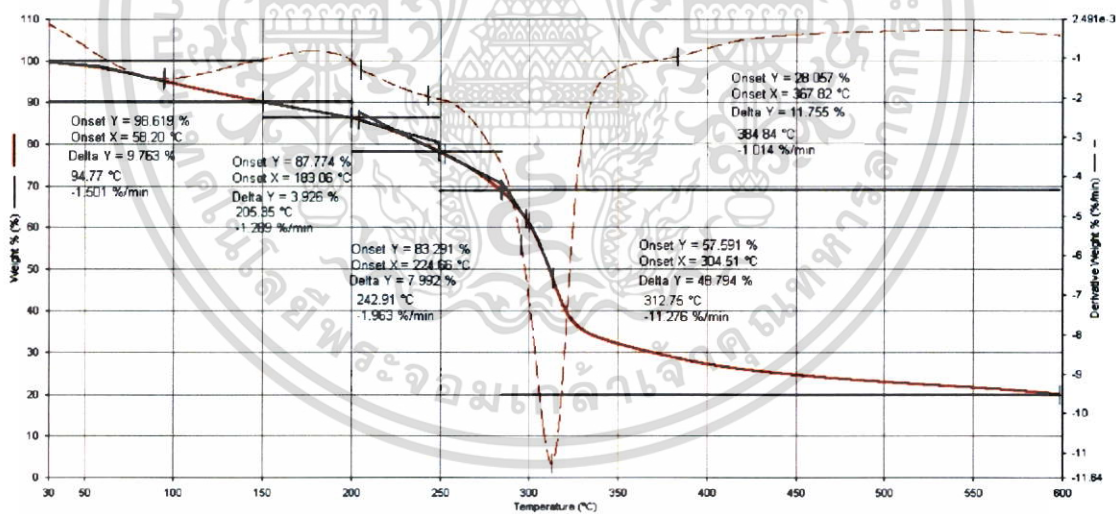


รูปที่ 3.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

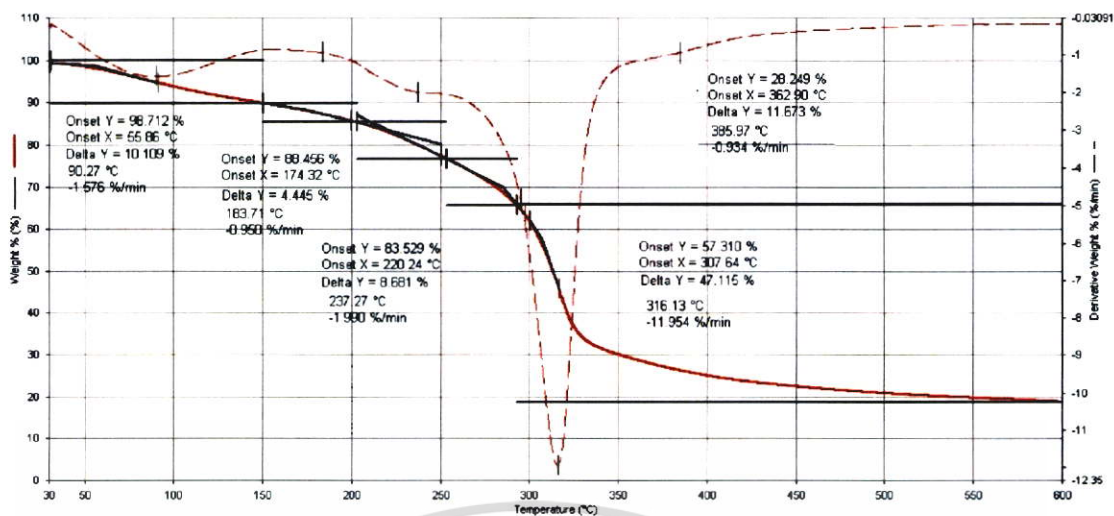


รูปที่ ง.8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

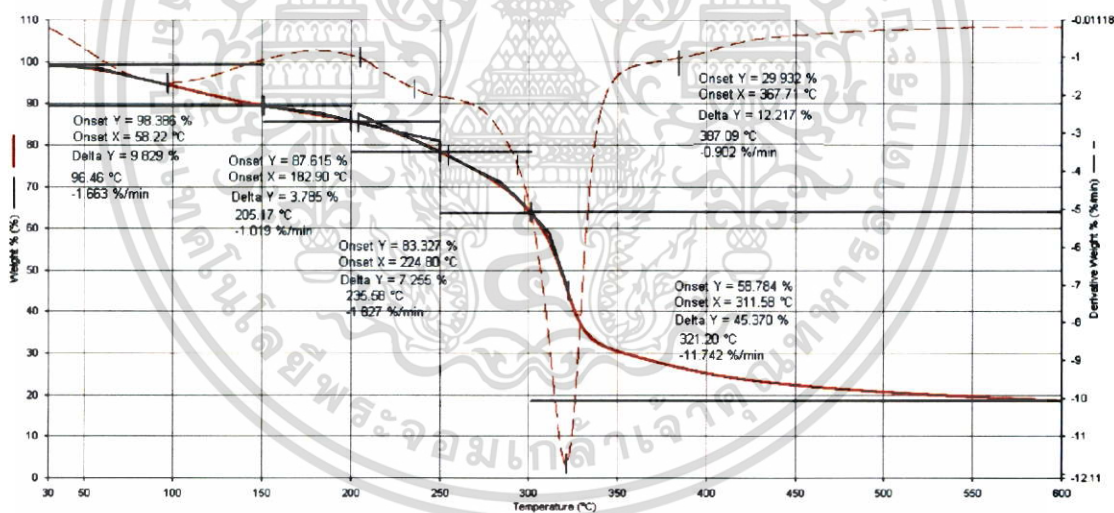


รูปที่ ง.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

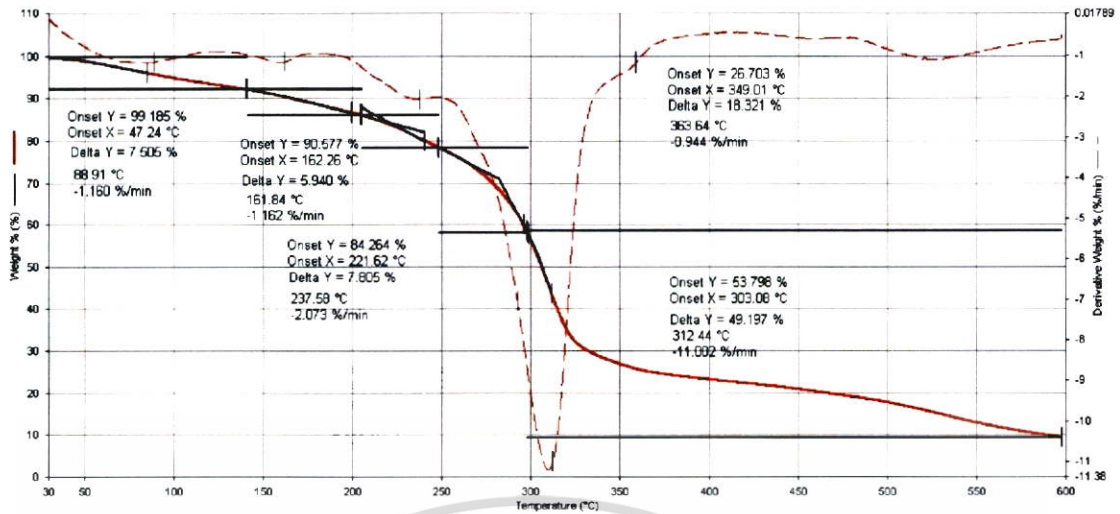


รูปที่ ง.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

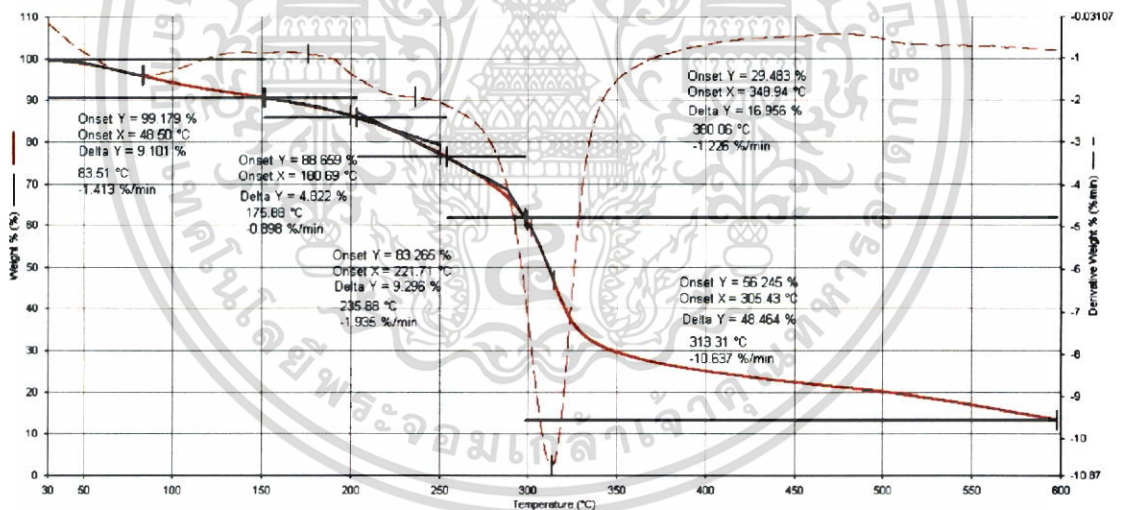


รูปที่ ง.11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

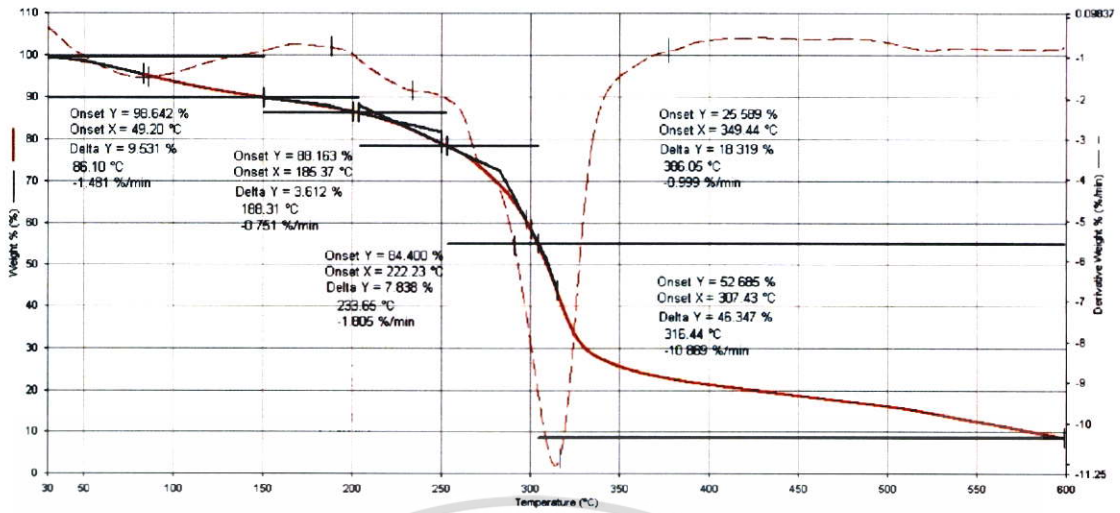


รูปที่ ง.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C



รูปที่ ง.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้ อุณหภูมิในการทดสอบ 600 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
ความแข็งแรงดึง (MPa)	Native RS	21.13±0.56	18.85±0.24	12.68±0.31
	RS-CA5%	14.66±0.43	13.26±0.35	9.15±0.52
	RS-CA10%	12.15±0.20	11.33±0.45	7.65±0.15
	RS-CA15%	9.33±0.76	8.70±0.15	5.98±0.25
	RS-CA20%	8.02±0.60	7.65±0.23	5.45±0.12
มอดุลัส (MPa)	Native RS	398.12±4.46	316.32±5.16	178.91±5.26
	RS-CA5%	313.03±3.23	260.02±4.16	143.52±7.03
	RS-CA10%	275.88±2.41	236.16±1.10	141.63±3.24
	RS-CA15%	240.21±7.67	209.78±7.59	122.02±8.45
	RS-CA20%	212.22±8.80	188.35±3.23	104.59±4.46
เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (%)	Native RS	3.17±0.46	2.79±0.24	1.34±0.35
	RS-CA5%	5.13±0.33	4.61±0.14	2.09±0.42
	RS-CA10%	8.46±0.30	7.62±0.43	3.86±0.56
	RS-CA15%	9.56±0.35	8.79±0.61	4.29±0.43
	RS-CA20%	12.47±0.74	11.54±0.55	6.03±0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

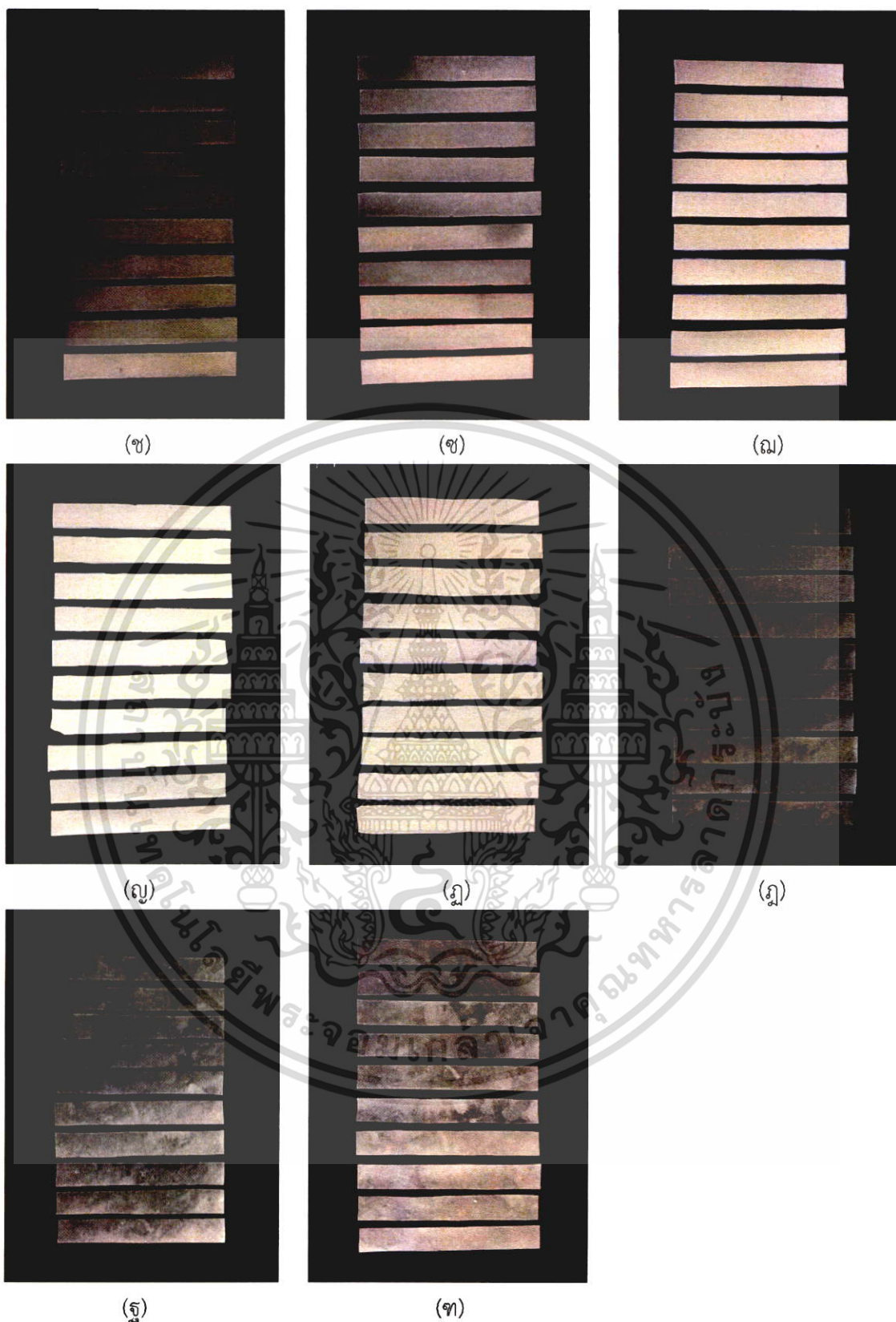
ตารางที่ จ.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดที่ปริมาณต่างกัน ก่อนและหลัง ทำการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
ความแข็งแรงดึง (MPa)	Native RS	21.13±0.56	18.85±0.24	12.68±0.31
	RS-CA20%	8.02±0.60	7.65±0.23	5.45±0.12
	RS-CA20-ZnO1%	16.72±0.41	15.98±0.23	11.55±0.46
	RS-CA20-ZnO5%	35.12±0.12	33.77±0.46	25.85±0.01
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	14.72±0.34	14.05±0.45	10.15±0.42
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	33.12±0.32	31.77±0.13	24.37±0.61
	RS-CA20-CaO1%	12.72±1.64	12.16±0.13	8.70±0.13
	RS-CA20-CaO5%	26.12±0.82	25.02±0.62	19.49±0.32
มอดุลัส (MPa)	Native RS	398.12±4.46	316.32±5.16	178.91±5.06
	RS-CA20%	212.22±8.80	188.35±3.23	104.59±4.46
	RS-CA20-ZnO1%	371.65±5.46	331.22±6.14	191.78±6.15
	RS-CA20-ZnO5%	505.16±8.88	459.20±9.12	294.15±3.15
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	353.65±5.47	314.30±11.01	182.46±7.42
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	475.16±12.40	432.45±6.14	273.12±9.45
	RS-CA20-CaO1%	343.65±21.46	308.88±11.01	169.87±11.05
	RS-CA20-CaO5%	445.16±12.87	403.15±12.30	244.60±10.15
เปอร์เซ็นต์ดึงยืด (%)	Native RS	3.17±0.46	2.79±0.24	1.34±0.35
	RS-CA20%	12.47±0.74	11.54±0.55	6.03±0.23
	RS-CA20-ZnO1%	11.86±0.54	11.02±0.24	5.80±0.34
	RS-CA20-ZnO5%	6.04±0.45	5.65±0.45	3.25±0.55
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 1%	9.86±0.85	9.13±0.13	4.82±0.40
	RS-CA20-TiO <sub>2</sub> 5%	8.03±0.80	7.56±0.61	4.31±0.21
	RS-CA20-CaO1%	10.75±0.78	10.08±0.14	5.41±0.45
	RS-CA20-CaO5%	6.73±1.05	6.36±0.32	3.62±0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

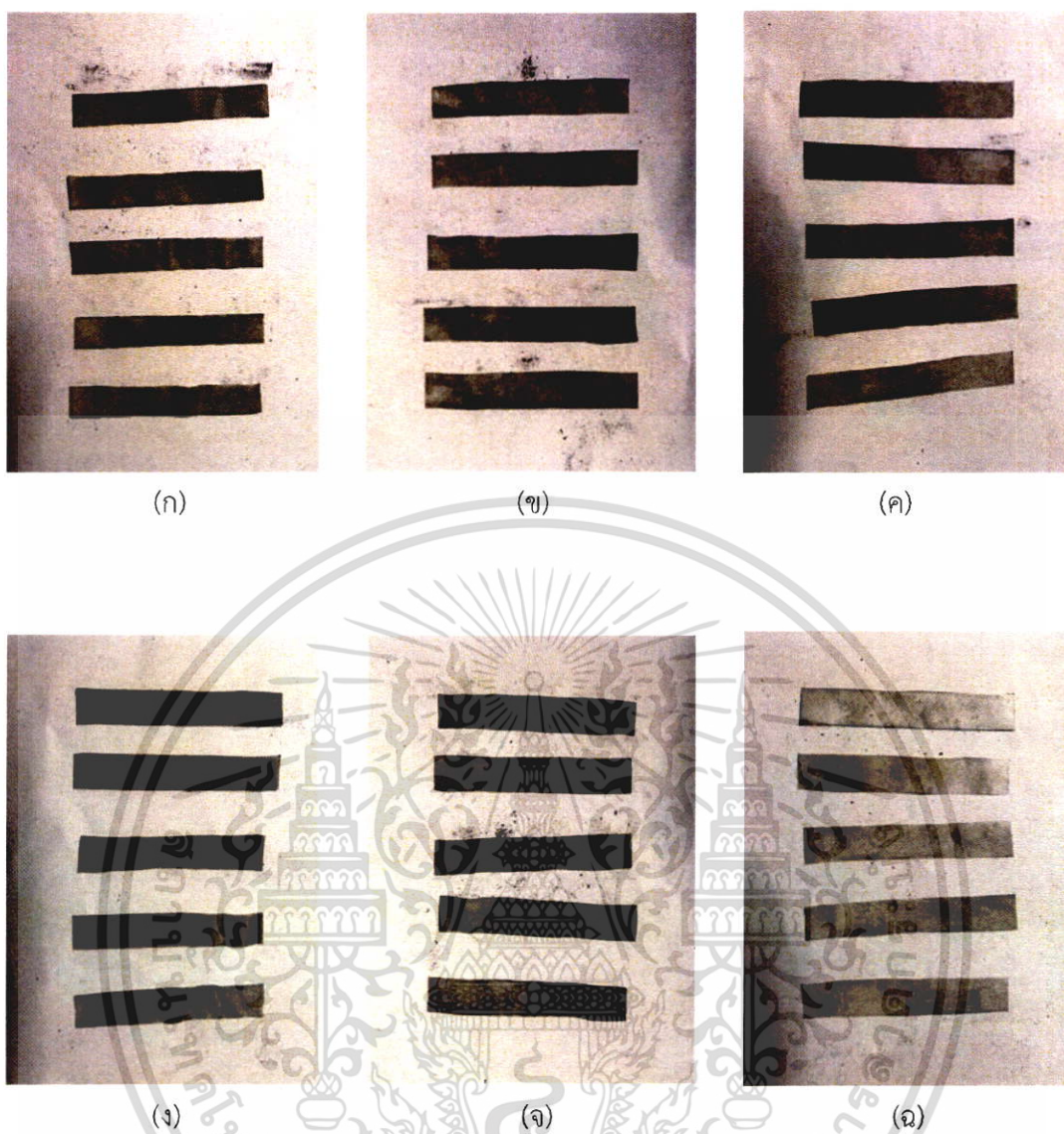


รูปที่ จ.1 ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะ ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ก่อนทำการย่อยสลายโดยการฝังดิน (ก) Native RS (ข) RS-CA5% (ค) RS-CA10% (ง) RS-CA15% (จ) RS-CA20% และ (ฉ) RS-CA20-ZnO1%



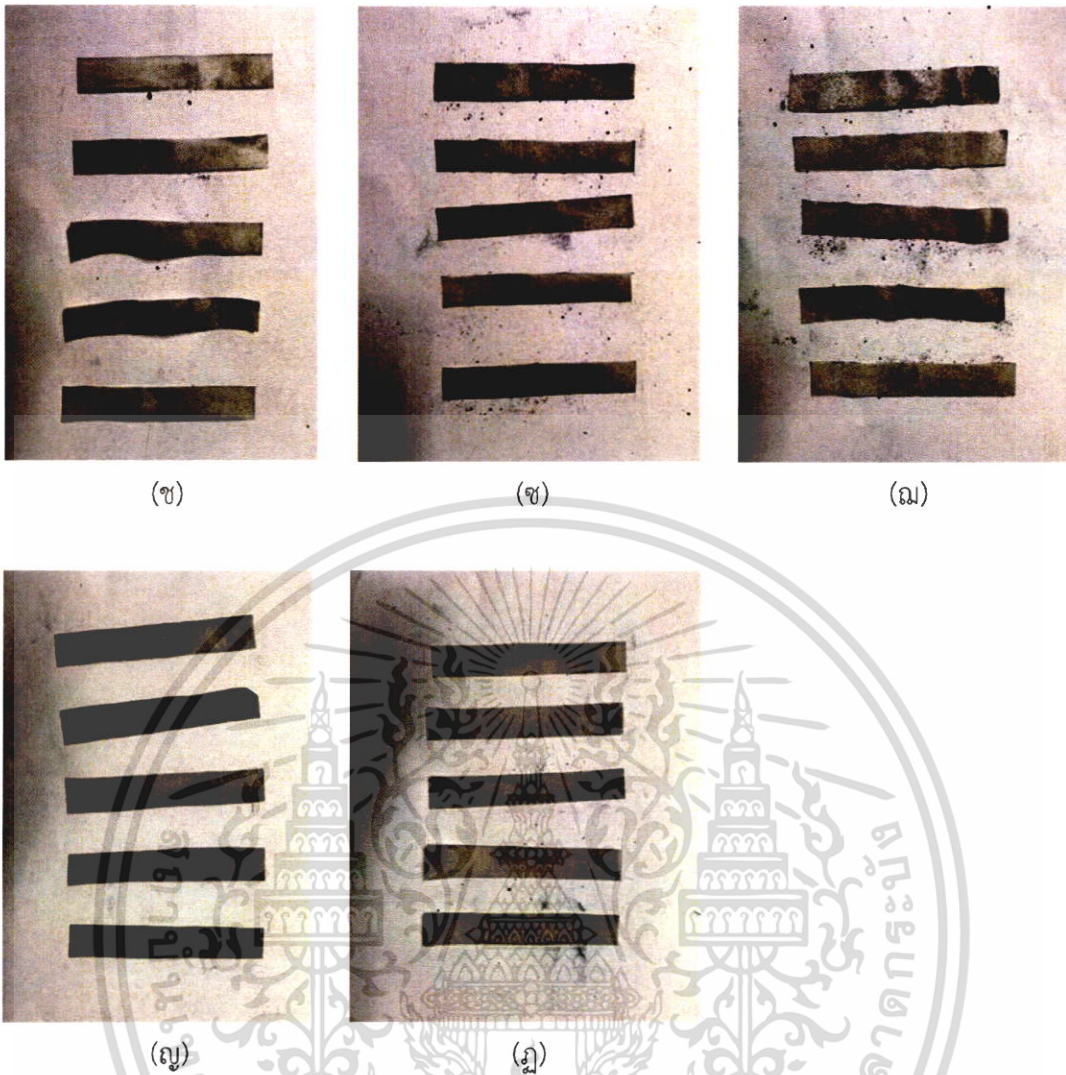
รูปที่ จ.2 ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ ก่อนทำการย่อยสลายโดยการฝังดิน (ข) RS-CA20-ZnO3% (ค) RS-CA20-ZnO5% (ง) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ฉ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>3% (ช) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5% (ฉ) RS-CA20-CaO1% (ฐ) RS-CA20-CaO3% และ (ฑ) RS-CA20-CaO5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



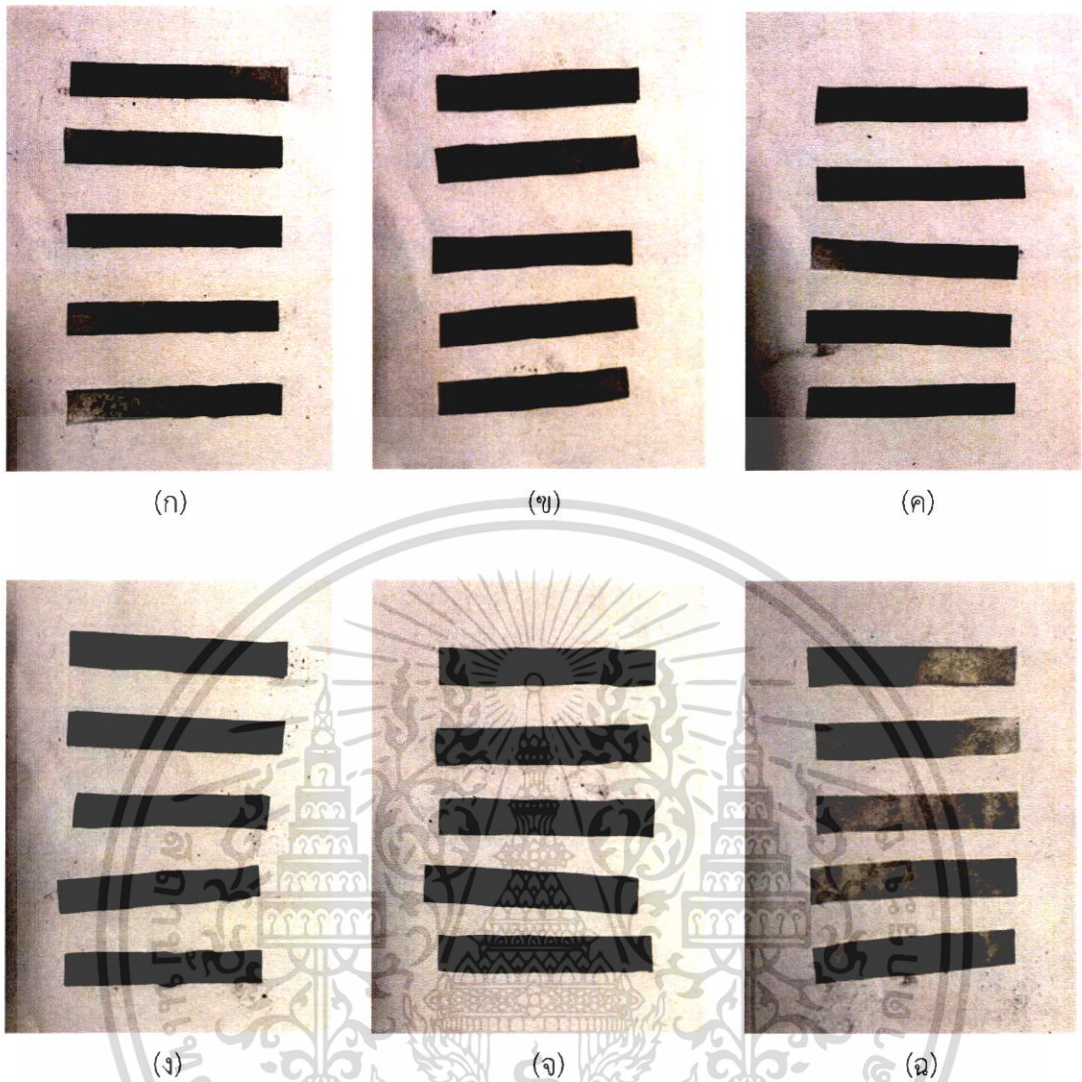
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน (ก) Native RS (ข) RS-CA5% (ค) RS-CA10% (ง) RS-CA15% (จ) RS-CA20% และ (ฉ) RS-CA20-ZnO1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.4 ชั้นงานฟิล์มแป้งขาวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิดริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน (ช) RS-CA20-ZnO5% (ซ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ฅ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5% (ญ) RS-CA20-CaO1% และ (ฎ) RS-CA20-CaO5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๕.๕ ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าและฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน (ก) Native RS (ข) RS-CA5% (ค) RS-CA10% (ง) RS-CA15% (จ) RS-CA20% และ (ฉ) RS-CA20-ZnO1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ซ)

(ช)

(ณ)



(ญ)

(ฎ)

รูปที่ จ.6 ชั้นงานฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังทำการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน (ซ) RS-CA20-ZnO5% (ช) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>1% (ณ) RS-CA20-TiO<sub>2</sub>5% (ญ) RS-CA20-CaO1% และ (ฎ) RS-CA20-CaO5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	กิตติชัย ศรีสำแดง
วัน เดือน ปีเกิด	8 กุมภาพันธ์ 2536
ภูมิลำเนา	เพชรบูรณ์
ที่อยู่ปัจจุบัน	123 หมู่.3 ต.บัววัฒนา อ.หนองไผ่ จ.เพชรบูรณ์ 67140
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมต้น-ปลาย โรงเรียนพระสุทธรมยานเถระวิทยา จ.อุทัยธานี - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) สาขาวิชาเทคโนโลยี-พอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	- Sornsumdang, K. and Prachayawarakorn, J. 2018. "Preparation and Properties of Biodegradable Citric Acid Modified Thermoplastic Rice Starch Films" 126-129. In International Polymer Conference of Thailand 2018 (PCT-8). Bangkok.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้