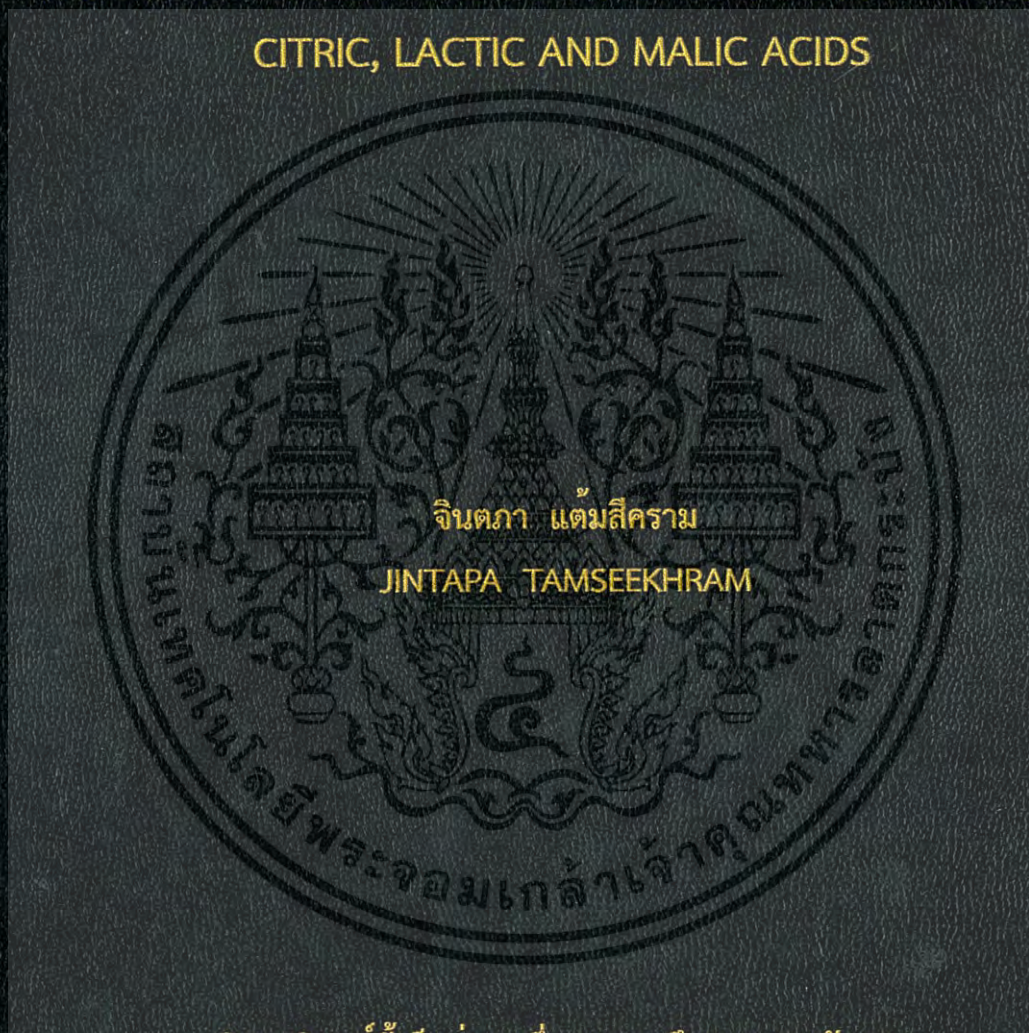


สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก
และกรดมาลิก

PROPERTIES OF CASSAVA STARCH FILMS CROSS-LINKED BY
CITRIC, LACTIC AND MALIC ACIDS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-014-021

สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก
และกรดมาลิก

PROPERTIES OF CASSAVA STARCH FILMS CROSS-LINKED BY
CITRIC, LACTIC AND MALIC ACIDS



T144005



จินตภา แท้มสีคราม

JINTAPA TAMSEEKHRAM

00266987

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144005
วันเดือนปี 10 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

PROPERTIES OF CASSAVA STARCH FILMS CROSS-LINKED BY
CITRIC, LACTIC AND MALIC ACIDS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN TECHNOLOGY POLYMER
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABUNG
2016

KMITL-2016-SC-M-014-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



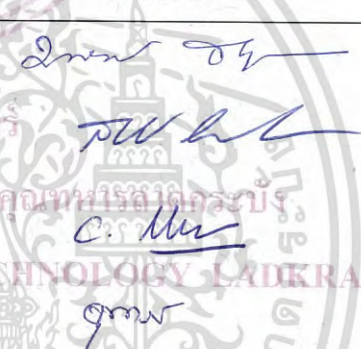
COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิก”
“PROPERTIES OF CASSAVA STARCH FILMS CROSS-LINKED BY CITRIC, LACTIC AND MALIC ACIDS”
ชื่อนักศึกษา นางสาวจินตภา เต็มสี่คราม
รหัสประจำตัว 56605043
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ ประธานกรรมการ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 มิถุนายน พ.ศ.2559 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬารัตน์วัลย์ลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดิษณี ธนะบริพัตน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 25 เดือน 119 พ.ศ. 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก
นักศึกษา	นางสาวจินตภา เต็มสีคราม
รหัสประจำตัว	56605043
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก โดยศึกษาปริมาณกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังนี้ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 1737 cm^{-1} ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดการเชื่อมโยงระหว่างแป้งกับกรด และ O-H stretching เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์การเติมกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกเข้าไปในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังนั้นทำให้ปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมกรด และเมื่อเติมปริมาณกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง จากฐานันฐานวิทยาของชิ้นงานมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกรด จากการดูดซับน้ำและการบวมตัวพบว่า เมื่อปริมาณกรดเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับน้ำลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแต่ละชนิดทำให้ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสลดลงในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดทั้งสามชนิดมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน นอกจากนี้ฟิล์มแป้งที่ปรับปรุงด้วยกรด ย่อยสลายเร็วกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรด จากงานวิจัยพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20% โดยน้ำหนักแสดงสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลทดสอบการบวมตัว การดูดซับน้ำ อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลาย

คำสำคัญ : ฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพ, กรดซิตริก, กรดแล็กติก, กรดมาลิก, แป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Properties of cassava starch films cross-linked by citric, lactic and malic acids
Student	Jintapa Tamseekhram
Student ID	56605043
Degree	Master of Science
Program	Polymer technology
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

Increasing awareness of environmental damage has led to development of environmental friendly plastic film. This research focused on preparation and properties of cassava starch film modified by citric acid, lactic acid and malic acid. Different casted films were modified using different contents of citric acid, lactic acid and malic acid, i.e. 0, 1, 2, 5, 10 and 20% , using casting technique. It was found from FT-IR spectra, that there was the new peak at 1737 cm^{-1} assigned for the C=O stretching of the carboxylic and ester group. The result confirmed the formation of chemical linkages between the starch and the acid. In addition, the O-H stretching peak also shifted to lower wavenumber. X-ray diffraction patterns of the cassava starch film modified by citric acid, lactic acid and malic acid showed lower crystallinity by higher contents of the acids. From SEM micrographs, the addition of three different types of acid into the cassava starch films led to smoother surface. Water absorption and swelling of different cassava starch films clearly decreased with increasing acid contents. When the content of the acids increased, the stress at maximum load and Young's modulus decreased. On the contrary, the strain at maximum load of the cassava starch films increased significantly. For thermal property, thermal degradation temperature of different acid-modified starch films did affect either by the addition of the acids or by the contents of the acids. Finally, the acid-modified starch films degraded faster than the non-modified film. From this study, the starch film modified by 20% citric acid showed the greatest overall properties, determined from swelling, water absorption, water vapor transmission rate, tensile properties, thermal properties and biodegradation.

Keywords : Biodegradable film; Citric acid, Lactic acid , Malic acid, Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และผศ.ดร.ชิตชนก มีใจซื่อ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่กฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งทางด้าน สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ชาวพอลิเมอร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะ และเป็นกำลังใจ และบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์



นางสาวจินตภา แต้มสีคราม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวโน้มการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมไปสู่การผลิตโดยกลไกทางชีวภาพ.....	4
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.2.1 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้.....	7
2.2.2 ข้อดีของพลาสติกย่อยสลายได้.....	11
2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	12
2.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน.....	12
2.3.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป.....	12
2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	12
2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	13
2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	13
2.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	13
2.4 แป้งมันสำปะหลัง.....	14
2.4.1 องค์ประกอบของแป้ง.....	16
2.4.2 สมบัติที่สำคัญของแป้ง.....	17
2.4.2.1 การพองตัวและการละลาย.....	17
2.4.2.2 การเกิดเจลลาคีโนเซชัน.....	18
2.4.2.3 การคืนตัวของแป้งสุก.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.4 ความหนืด.....	19
2.5 แป้งตัดแปร.....	20
2.5.1 การปรับปรุงสายพันธ์ุ.....	20
2.5.2 การตัดแปรทางกายภาพ.....	20
2.5.3 การตัดแปรทางเคมี.....	20
2.5.3.1 การลดขนาดโมเลกุลโดยกรด.....	20
2.5.3.2 เดกซ์ทรีโนเซชัน.....	21
2.5.3.3 ออกซิเดชัน.....	21
2.5.3.4 การเกิดอนุพันธ์.....	21
2.6 फिल्मแป้ง.....	22
2.6.1 สมบัติของ फिल्मแป้ง.....	22
2.6.2 การเกิด फिल्म.....	23
2.6.3 การขึ้นรูป फिल्म.....	23
2.7 กรดซิตริก.....	24
2.8 กรดมาลิก.....	26
2.9 กรดแลกติก.....	27
2.10 พลาสตีไซเซอร์.....	29
2.10.1 พลาสตีไซเซชันและพลาสตีไซเซอร์.....	29
2.10.2 กลีเซอรอล.....	30
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สารเคมี.....	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	41
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.4 วิธีการทดสอบ.....	45
3.4.1 การตรวจหาหมู่ฟังก์ชันโดย FT-IR.....	45
3.4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	45
3.4.3 สัณฐานวิทยา.....	45
3.4.4 การทดสอบการบวมตัว.....	45
3.4.5 การทดสอบการดูดซับน้ำ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....	46
3.4.7 สมบัติเชิงกล.....	47
3.4.8 สมบัติทางร้อน.....	47
3.4.9 การทดสอบโดยการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	48
3.4.10 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การเป็นเจล.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	49
4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	51
4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	56
4.3 สัณฐานวิทยา.....	60
4.4 การทดสอบการบวมตัว.....	67
4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้น.....	70
4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....	74
4.7 สมบัติเชิงกล.....	76
4.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	82
4.9 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	103
ภาคผนวก ค.....	104
ภาคผนวก ง.....	105
ภาคผนวก จ.....	107
ภาคผนวก ฉ.....	109
ภาคผนวก ช.....	117
ประวัติผู้วิจัย.....	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลาสติกคลุมดิน.....	9
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	15
2.3 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด.....	23
2.4 สมบัติทางกายของกลีเซอรอล.....	32
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	37
3.2 องค์ประกอบของกรดซิตริก.....	38
3.3 องค์ประกอบของกรดมาลิก.....	39
3.4 องค์ประกอบของกรดแลคติก.....	40
3.5 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดชนิดต่างๆ.....	44
3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้.....	47
4.1 อักษรย่อของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	49
4.2 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏเหมือนกันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้.....	51
4.3 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิกและ กรดแลคติกในปริมาณต่างๆ.....	59
4.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิกและกรดแลคติก ในปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก.....	74
4.5 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เม็ดแข็งของน้ำมันสำปะหลังจากกลั่นจูลุทรรคน้ำอเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.2 การเกิดพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส.....	15
2.3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน.....	16
2.4 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน.....	17
2.5 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน.....	19
2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน.....	20
2.7 โครงสร้างกรดซิตริก.....	24
2.8 แสดงกรดซิตริกในรูปผลึก Monohydrate.....	25
2.9 โครงสร้างทางเคมีของกรดมาลิก.....	26
2.10 สูตรโครงสร้างของกรดแลกติก.....	27
2.11 สูตรโครงสร้างของกรดแลกติก.....	27
2.12 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล.....	30
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการวิจัย.....	42
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	52
4.2 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดซิตริก.....	53
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	54
4.4 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดมาลิก.....	54
4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	55
4.6 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดแลกติก.....	55
4.7 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	56
4.8 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	57
4.9 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	57
4.10 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า.....	61
4.11 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า.....	63
4.12 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลก ติกที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า.....	65
4.13 เพอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	67
4.14 เพอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	68
4.16 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก.....	69
4.17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	70
4.18 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	71
4.19 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	71
4.20 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลกติกในปริมาณ 1, 2, 5 10 และ 20% โดยน้ำหนัก วันที่ 21 ในการทดลอง.....	73
4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยซิตริก.....	76
4.22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	77
4.23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	78
4.24 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก.....	80
4.25 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก.....	82
4.26 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก.....	83
4.27 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก.....	84
4.28 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 วัน.....	87
4.29 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน.....	88
4.30 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน.....	89
4.31 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์กลับเป็นแป้งโดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีสมบัติทำให้เกิดฟิล์มได้ดีซึ่งส่วนสำคัญในการเกิดฟิล์มเกิดจากโมเลกุลของอะไมโลสและโมเลกุลของอะไมโลสเพกตินในแป้ง ทำให้เกิดโครงสร้างของฟิล์มที่ดี โครงร่างตาข่ายเชื่อมโยงโมเลกุลของแป้งเข้าด้วยกันและต่อเนื่องกัน ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส ไม่มีสีส่วนใหญ่จะเน้นทางด้านการใช้ในรูปของแป้งที่เป็นเจลแล้ว เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถย่อยสลายได้ง่ายในดิน ทะเล โดยแป้งเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้มาจากธรรมชาติ ทำให้พอลิแซ็กคาไรด์เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ซึ่งรวมไปถึงงานด้านการเกษตรกรรมด้วย เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่หาได้ง่าย ราคาถูก นอกจากนี้พอลิเมอร์ชนิดนี้ยังมีข้อดีในการช่วยระบบนิเวศวิทยาอีกด้วย เนื่องจากมีสมบัติพิเศษในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีแนวคิดที่จะนำพอลิแซ็กคาไรด์มาทำเป็นฟิล์มพลาสติกคลุมดิน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มนั้นจะเกิดการย่อยสลายไปเป็นปุ๋ย แต่ประโยชน์ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเกิดเจลาตีไนซ์ในพลาสติกย่อยสลายได้มีข้อจำกัดเนื่องจากฟิล์มพลาสติกจะมีความกรอบและแข็งเมื่อถูกทำให้แห้ง และมีสมบัติเชิงกลไม่ดี จึงมีการผสมพลาสติกไฮเซอร์ เช่น กลีเซอรอล พอลิเอทิลีน ไกลคอล เป็นต้น หรือผสมแป้งมันสำปะหลังกับสารก่อพันธะเชื่อมโยง เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลคติก แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น

กรดซิตริก (Citric acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) เป็นกรดอ่อน มีหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลอยู่ด้วย สามารถใช้ในถนอมอาหาร มีรสเปรี้ยว หาง่าย ราคาถูก ปลอดภัย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติลดขนาดของโมเลกุลแป้ง ลดความหนืดและเพิ่มการไหลของแป้งขณะร้อน และเพิ่มการละลายในน้ำร้อน [1] ดังนั้นจึงเลือกมาเป็นสารเชื่อมโยงในการเตรียมฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เพื่อให้ฟิล์มมีความใสและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์และแป้งชนิดต่างๆ [2-4] แต่พบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่ยังใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปริมาณที่สูงเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป จึงทำให้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้ย่อยสลายได้ไม่ดี และงานวิจัยที่ใช้แป้งในปริมาณที่สูงมีสมบัติเชิงกลไม่ดีและความสามารถในการดูดซับน้ำสูง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวข้องกับการนำกรดมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของแป้งซึ่งเป็นงานวิจัยของ Carolin Menzel และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของแป้งที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) แป้งที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีสมบัติการละลายน้ำลดลง มีสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำเพิ่มมากขึ้น และมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และใช้กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิกเป็นสารเชื่อมโยง และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มที่เตรียมได้ ซึ่งคาดว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำ และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และคาดว่าสามารถนำมาพัฒนาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น พลาสติกคลุมดิน ถุงปลูกเพาะกล้า เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1. เพื่อเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

1.2.2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1. เตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ย่อยสลายได้ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.2. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิกเป็นสารเชื่อมโยง

1.3.3. วิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

1.3.3.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

1.3.3.2 ทดสอบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

1.3.3.3 ทดสอบสัณฐานวิทยา

1.3.3.4 ทดสอบการบวมตัว

1.3.3.5 ทดสอบดูดความชื้น

1.3.3.6 ทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3.7 ทดสอบสมบัติเชิงกล

1.3.3.8 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

1.3.3.9 ทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. फिल्मย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังที่มีสมบัติที่ดี ใช้ระยะเวลาสั้นในการสลายตัว และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.4.2. ส่งเสริมการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ช่วยเหลือเกษตรกรและเพิ่มมูลค่าผลผลิตที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง

1.4.3. นำฟิล์มย่อยสลายจากแป้งมันสำปะหลังมาใช้ทดแทนวัสดุย่อยสลายได้ยาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกมีสูงมาก ส่งผลให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลายและทำลาย จึงทำให้ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ในธรรมชาติมากขึ้น การเลือกใช้พอลิเมอร์ (Polymer) จากธรรมชาติ เช่น แป้ง (Starch) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่ส่วนใหญ่หาได้ง่าย ราคาถูก อีกทั้งยังลดปัญหามลภาวะจากขยะและของเสียอันตราย รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของผลผลิตทางการเกษตรของไทย

2.1 แนวโน้มการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมไปสู่การผลิตโดยกลไกทางชีวภาพ

อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เริ่มต้นจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติไปสู่กระบวนการผลิตสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง และพัฒนาไปสู่วัสดุพอลิเมอร์ เส้นใย หรือพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มานานกว่าร้อยปี ตลอดศตวรรษที่ผ่านมามนุษย์ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติซึ่งปริมาณการได้ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยเฉพาะการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะซึ่งขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศน์ของโลก ทำให้การคิดค้นและพัฒนากระบวนการใหม่รวมถึงการสร้างนวัตกรรมเพื่อผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีอย่างครบวงจรภายในเวลาอันรวดเร็ว เป็นสิ่งหนึ่งที่ทุกประเทศต้องพัฒนา ทั้งนี้นอกจากจะหมายถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีของประเทศตนแล้วยังหมายถึงการเพิ่มศักยภาพและโอกาสในการแข่งขันอันจะเชื่อมโยงไปสู่ความเป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศ [6]

ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเด่นมากมายจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากพลาสติกมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นระยะเวลาอันยาวนานนับร้อยๆ ปี จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกขึ้นส่งผลโดยตรงต่อสภาพแวดล้อม

สาเหตุที่พลาสติกที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้มี 2 ประการ คือ

1. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีลักษณะไม่เป็นพรุณและมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปสัมผัสกับผิวพลาสติกน้อยลงจึงยากที่จะทำให้พลาสติกย่อยสลายได้

2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ดังที่กล่าวไปแล้ว ดังนั้นด้วยความตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกพลาสติกย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้เพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิตและกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำของโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำและสามารถย่อยสลายได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วย จุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งานโดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิมและสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้ โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลทดสอบสามารถนำมาใช้ระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ เช่นเดียวกับ American Society for Testing and Materials (ASTM) ให้ได้ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ ว่าพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. พลาสติกสลายตัวได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกหักของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าไปทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้ไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดี หรือแม้กระทั่งขึ้น พลาสติกที่มีการพิมพ์หมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวีหรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) ไม่ว่องไวใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hydroperoxide additive; ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่หมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แบง พอลิเมอร์เอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต พอลิเอไมด์ และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีความชื้นจากสภาพแวดล้อมและสารเคมีหรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายนอกเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic hydrolysis) แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เอง ในการเร่งให้เกิดการย่อย (Internal catalytic hydrolysis) โดยตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkalide metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายสายโซ่พอลิเมอร์เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกในการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายในเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่เกิดทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เกิดแตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือกระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 Biodegradation หรือการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์สิ่งสำคัญ คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพควรเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ สะอาด ไม่เป็นพิษ ในเวลาและสภาวะที่กำหนด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบขนาดเล็กที่มีความเสถียร และพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และน้ำ

2. Composting หรือการคอมโพสท์ เป็นกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม พลาสติกจะเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารที่ลักษณะคล้ายฮิวมัส (Humus) หรือดินดำ นอกจากนี้ยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุต่างเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมไม่เหลือวัสดุตกค้างและไม่เป็นพิษสามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช พลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้โดยการคอมโพสท์ (Compostable plastic) นั้นต้องมีอัตราการย่อยสลายในคอมโพสท์ไม่ช้ากว่าเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

3. Hydro- biodegradation เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ

4 Photo- biodegradation เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาย่อยสลายโดยแสงก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ [7]

2.2.1 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

1. การใช้งานในทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวหนังเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้า ๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2. สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3. ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขณะปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจพลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์ม และถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารเหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลีได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรปทำการผลิตถุงย่อยสลายสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

5. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูงทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด ภาชนะพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ภาชนะย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

6. โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทกโดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ในประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่มีปัญหาคือ พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่มีการจัดเก็บเพื่อการจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว [8]

7. การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร

การใช้งานพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในทางการเกษตรมีมากมาย ได้แก่

1. พลาสติกคลุมดิน (Mulching)

เกษตรกรใช้เทคนิคการคลุมดินเพื่อประหยัดน้ำและทำให้ผลผลิตออกก่อนฤดูได้ผลผลิตสูงขึ้น ตลอดจนทำให้ผลผลิตที่ได้มีผิวสวยขึ้น การคลุมดินมีประโยชน์ต่อดินและสิ่งแวดล้อมซึ่งรวมขึ้นการควบคุมความชื้น รักษาโครงสร้างของดิน ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยได้มากขึ้น ปกป้องพืชที่ปลูกและตัดปัญหาการกำจัดวัชพืชถ้าใช้พลาสติกทึบแสง

การคลุมดินสมัยก่อนใช้ฟางข้าวปัจจุบันถูกทดแทนโดยพลาสติก วิธีคลุมดินมี 2 วิธี คือ คลุมทั้งหมดและคลุมบางส่วน ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวมีความแตกต่างกันอยู่ในตัวเอง

การติดตั้งแผ่นพลาสติกมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้ อาจจะถูกโดยการกลบทับด้านข้างและหัวท้ายด้วยดิน การเกษตรกรรมอื่น ๆ สามารถดำเนินการไปพร้อม ๆ กับการปูแผ่น ไม่ว่าจะเป็นดินใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติก ดินจะได้รับการไถพรวนใส่ปุ๋ยและปลูกไปพร้อมกันเลยทีเดียว ดังนั้นผลกระทบที่เครื่องจักรจะทำให้ดินชั้นล่างแน่นลดน้อยลง การใช้พลาสติกในการคลุมดินจะเพิ่มอุณหภูมิของดินในเวลากลางวัน นอกจากพลาสติกสีขาวและสีเงินซึ่งสะท้อนแสง พลาสติกสีดำจะป้องกันการงอกของวัชพืชได้ดีที่สุด ภายในโรงเรือนพลาสติกคลุมดินสีขาวถูกใช้ในการสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มปริมาณแสงให้กับพืช

ตารางที่ 2.1 พลาสติกคลุมดิน [9]

ชนิดของแผ่นฟิล์มพลาสติก	วัตถุประสงค์หลัก
โปร่งใส	<ul style="list-style-type: none"> - เพิ่มอุณหภูมิในดินในช่วงกลางวัน - เร่งการเจริญเติบโต - จัดเก็บน้ำ
สีดำ	<ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - จัดเก็บน้ำ
ทึบแสงและกักความร้อน	<ul style="list-style-type: none"> - กักความร้อนในช่วงกลางคืน - ป้องกันวัชพืช - จัดเก็บน้ำ
2 สี ดำ-ขาว	<ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - สะท้อนแสง - จัดเก็บน้ำ
เสื่อมสลายได้	<ul style="list-style-type: none"> - เพิ่มอุณหภูมิของดิน - ทำให้สามารถใช้เครื่องจักรในการเก็บเกี่ยวได้

1. พลาสติกคลุมดินโดยตรง (Direct covers)

พลาสติกที่ใช้คลุมโดยตรงจะใช้คลุมดินหลังจากหยอดเมล็ดหรือปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะถูกพองไว้โดยต้นพืชและจะยกสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช การใช้พลาสติกคลุมโดยตรงซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พลาสติกคลุมโปง (Thermic blankets) สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชทำให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ มีขนาดใหญ่ขึ้นและแก่ก่อนกำหนดประมาณ 1 – 2 สัปดาห์ และสามารถลดการใช้สารเคมีในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช การใช้พลาสติกคลุมโปงเป็นเทคนิคการจัดการ ป้องกันและบังคับพืชที่ง่ายและต้นทุนต่ำเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับพืชสวนได้หลายชนิด ไม่ว่าจะปลูกในที่โล่งหรือภายในโรงเรือนและไม่ว่าจะคลุมโดยใช้เครื่องจักรหรือแรงคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อุโมงค์หลังคาต่ำ (Low tunnels)

การใช้พลาสติกสร้างอุโมงค์หลังคาต่ำและใช้คลุมดินเพื่อการปลูกพืชเป็นเทคนิคที่รู้จักกันทั่วไปเนื่องจากราคาถูกและใช้ง่าย ความยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติกเป็นสิ่งสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ในการสร้างโรงเรือนรูปโครงสร้างวงกลมแบบง่าย ๆ แต่ไม่สามารถใช้งานวัตถุประสงค์ได้อย่างดี อุโมงค์หลังคาต่ำ ส่วนใหญ่มักใช้เพื่อช่วยในการผลิตพืชเพื่อต้องการให้สุกแก่เร็วขึ้น นอกจากนี้สามารถช่วยป้องกันความหนาว ลม ทิมะ และสิ่งที่มาทำลายพืชช่วยให้การใช้ปุ๋ยและน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ค่าลงทุนในการติดตั้งพลาสติกคลุมลงบนโครงสร้างของอุโมงค์ขึ้นกับชนิดเครื่องจักรกลที่ใช้และรูปแบบการให้น้ำ (ระบบหยดหรือให้น้ำแบบปล่อยท่วมบนผิวดิน)

3. โรงเรือนพลาสติก (Greenhouses)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีพลาสติกได้นำไปสู่การใช้งานใหม่ ๆ ในอุตสาหกรรมเรือนเพาะชำ โรงเรือนแบบอุโมงค์จัดว่าเป็นต้นแบบเริ่มต้นที่นำไปสู่การพัฒนาโรงเรือนพลาสติกที่ทันสมัย โรงเรือนพลาสติกที่ทันสมัย โครงสร้างที่มีลักษณะโค้งสามารถสร้างขึ้นได้จากพลาสติกด้วยการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มและพลาสติกกึ่งคงรูป รูปแบบโรงเรือนพลาสติกถูกกำหนดโดยสภาพภูมิอากาศที่พืชต้องการในเขตอบอุ่น สภาพเศรษฐกิจและความต้องการทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อการผลิตไม้ดอก ไม้ผลและผัก ปัจจุบันนี้การออกแบบโรงเรือนพลาสติกได้ก้าวหน้าไปมากและการประมาณค่าใช้จ่ายไม่เพียงแต่คิดราคาต่อตารางเมตรเท่านั้น แต่รวมไปถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์จากดิน โปรแกรมการปลูกพืชหลาย ๆ ชนิดและวัสดุที่ใช้คลุมโรงเรือน

4. การให้น้ำหรือระบบชลประทาน(Irrigation department)

ในปัจจุบันนี้การพัฒนาระบบชลประทานจะไม่สามารถทำได้เลย ถ้าไม่ได้นำเข้าวัสดุที่ทำจากพลาสติกมาใช้งานอย่างกว้างขวาง การนำพลาสติกมาใช้งานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงการเกษตรอย่างมากโดยเฉพาะในการชลประทาน วัสดุที่ทำจากพลาสติกถูกนำมาใช้กันแพร่หลายในการขนส่งน้ำไปให้ต้นพืชผ่านชลประทาน ท่อแขนง และท่อน้ำหยด

1 ใน 3 ของพลาสติกเพื่อการเกษตรใช้อยู่ในระบบชลประทาน เป็นการยากที่จะประมาณพื้นที่ที่ใช้ระบบชลประทานน้ำน้อยทั้งหมดที่ใช้อยู่ทั่วโลกได้ แต่ไม่มีพืชสวนสมัยใหม่ใดเลยที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ระบบให้น้ำแบบนี้ได้ไม่ว่าสตอเบอร์รี่ มะเขือเทศ เมล่อน กล้วย ตลอดไปถึงมะกอก แม้กระทั่งการให้น้ำในโรงเรือน

5. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponics)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตพืชสวน ซึ่งพัฒนาขึ้นมาเพื่อปลูกพืชผักต่าง ๆ ให้กับทหารที่ไปสู้รบในสมรภูมิที่ไม่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกพืชให้สามารถผลิตผักเพื่อเป็นอาหารได้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการผลิตพืชได้ดี แต่ต้องมีความรู้และทักษะในการจัดการที่เหมาะสม

6. พลาสติกคาดแหล่งน้ำ (Waterproof sheeting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกป้องกันการสูญเสียน้ำจากระบบการกักเก็บ การลำเลียงและการจัดสรรน้ำช่วยให้การจัดการแหล่งน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในศตวรรษนี้การขาดแคลนน้ำในหลายพื้นที่ของโลกเป็นข้อจำกัดหลัก ในการปรับปรุงสภาพความเป็นอยู่ของประชากร การขาดแคลนน้ำเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่แน่นอน ขณะเดียวกันฤดูกาลที่มีความต้องการสูงสุดมักจะตรงกับช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำมีน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเหตุผลให้ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวลดลง ดังนั้นการสร้างอ่างเก็บน้ำช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ เกษตรกรแต่ละรายมักจะไม่มีความสามารถทางเศรษฐกิจที่จะสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่และคลองส่งน้ำตาดด้วยคอนกรีตของตนเองได้ ดังนั้นการใช้แผ่นพลาสติกตาดแหล่งน้ำซึ่งมีราคาถูกกว่าจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหานี้ได้

7. ตาข่ายและตะแกรงลดพลังงาน (Nets and energy screens)

ลมเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการทำการเกษตร การใช้ตาข่ายพลาสติกเป็นแนวกันลมทำให้สามารถลดความหนาของกำแพงสงได้จึงเหลือพื้นที่เพาะปลูกกว้างมากขึ้น แนวกันลมที่ใช้ตาข่ายพลาสติกกำลังเข้ามาแทนที่การปลูกต้นไม้เป็นแนวกันลม เพราะต้นไม้ที่ใช้เป็นแนวกันลมนั้นนอกจากจะแย่งน้ำและอาหารของพืชที่ปลูกแล้วยังเป็นแหล่งอาศัยของศัตรูพืชได้อีกด้วย การสร้างแนวกันลมจะมีผลต่อสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น เช่น ต่ออุณหภูมิ ความชื้นของดิน การคายน้ำของพืชจนไปถึงเรื่องการกระจายของฝนอีกด้วย

2.2.2 ข้อดีของพลาสติกย่อยสลายได้

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่น ๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดินพร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบและเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้เนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

3. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป

4. การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีประเมินวัฏจักรตั้งแต่เริ่มการผลิตจนถึงการกำจัดภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่พลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่ง

เอกสารของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ [9] ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

2.3.1. การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ ในรูปจุลินทรีย์ และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ใช้ในการคำนวณน้ำหนักที่แห้ง สมมูลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนที่อยู่ในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้น ร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = C_d \times 100 / C_i$$

C_i คือ คาร์บอน

2.3.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือ เกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณแป้งต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและแป้งที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือนก่อนจะล้างนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเส้นใยเชื้อราอยู่บนพอลิเมอร์และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์พบรูเล็ก ๆ ในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมากโดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งฝังไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นสีขาวซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคลนของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือน มาตรวจวัดหาปริมาณไนโตรเจน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคลนบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infraed Spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรดใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิว พอลิเมอร์ บริเวณรูเหล่านี้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นซึ่งสามารถวัดจากสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก

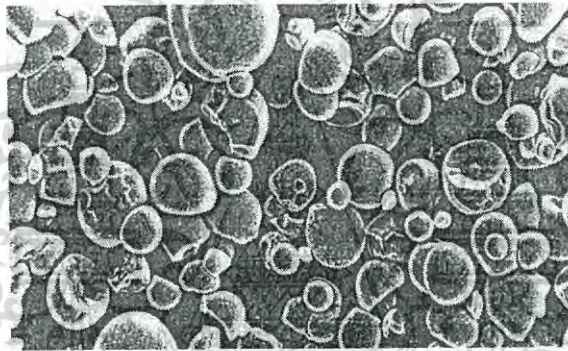
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตรหลาย ๆ ตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมากการทดลองใช้เวลาประมาณ 2 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ [10]

2.4 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เป็นแป้งที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้ในอุตสาหกรรมจะมีองค์ประกอบ คือ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 โปรตีนไม่เกินร้อยละ 0.3 แป้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 97.5 และเยื่อใยไม่เกินร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักแห้ง องค์ประกอบที่มีมากที่สุด แป้งมันสำปะหลังคือแป้ง ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าในแต่ละเม็ดจะมีความยาวตั้งแต่ 15-35 ไมโครเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก ผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมข้างหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ และเม็ดแป้งแสดงให้เห็นรอยบุ๋ม (Eccentric hilum) อย่างชัดเจน [11]

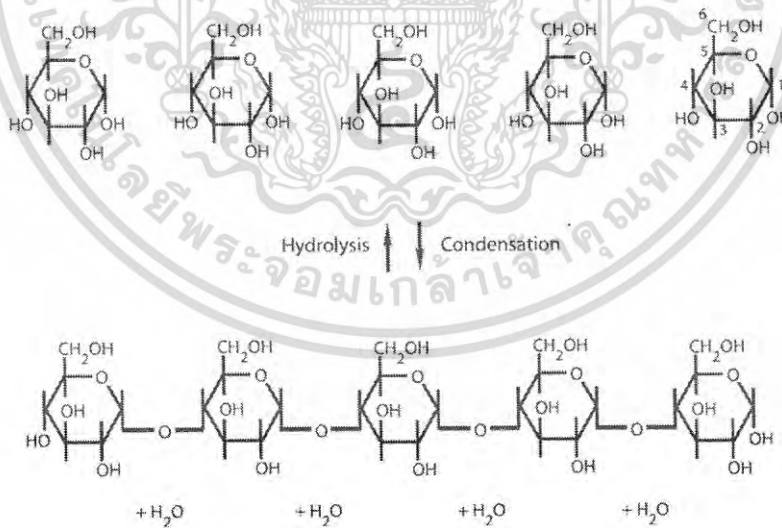


รูปที่ 2.1 เม็ดแป้งของมันสำปะหลังจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [12]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [12]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
แป้ง	87.00
ความชื้น	12.59
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

แป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งเกิดจากกันเรียงต่อกันของน้ำตาลกลูโคสโดยสูญเสียน้ำ 1 โมเลกุล ต่อพันธะไกลโคซิดิกที่เกิดระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล (น้ำตาลกลูโคสที่สูญเสียน้ำ เรียกว่า น้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส) ลักษณะของกลูโคสในโมเลกุลของแป้งจะประกอบด้วยกลุ่มไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl group) เกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และกลุ่มไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl group) เกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 แป้งจึงมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ทำให้แป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำและสามารถเกิดปฏิกิริยาสำคัญต่างๆ ได้ [13-14]



รูปที่ 2.2 การเกิดพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 องค์ประกอบของแป้ง

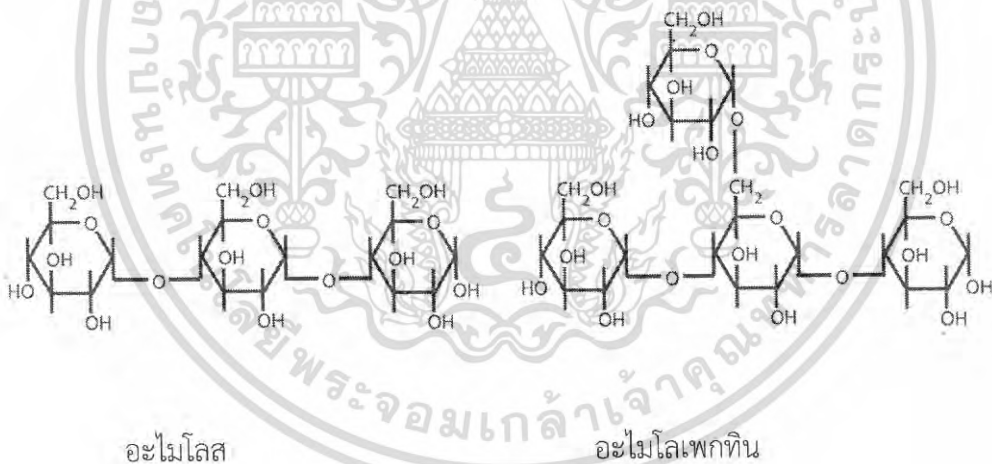
โดยทั่วไปแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกทิน ซึ่งอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทินจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช สำหรับแป้งมันสำปะหลังจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทินเป็น 17 / 83 [13]

1) อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-ดี-1-4 กลูโคซิดิกเพียงอย่างเดียว อะไมโลสประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย [1] มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 105 - 106 และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์ม [15]

2) อะไมโลเพกทิน

อะไมโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์มีทั้งลักษณะเป็นเส้นตรงและกิ่งก้าน (Branch) โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 25-30 หน่วย [1] เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-ดี-1-4 กลูโคซิดิก และส่วนที่แยกเป็นกิ่งก้านจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาดี-1-6 กลูโคซิดิก [16] อะไมโลเพกทินโมเลกุลหนึ่งจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไป และมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 107 - 109 จึงมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสมาก [17]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน [10]

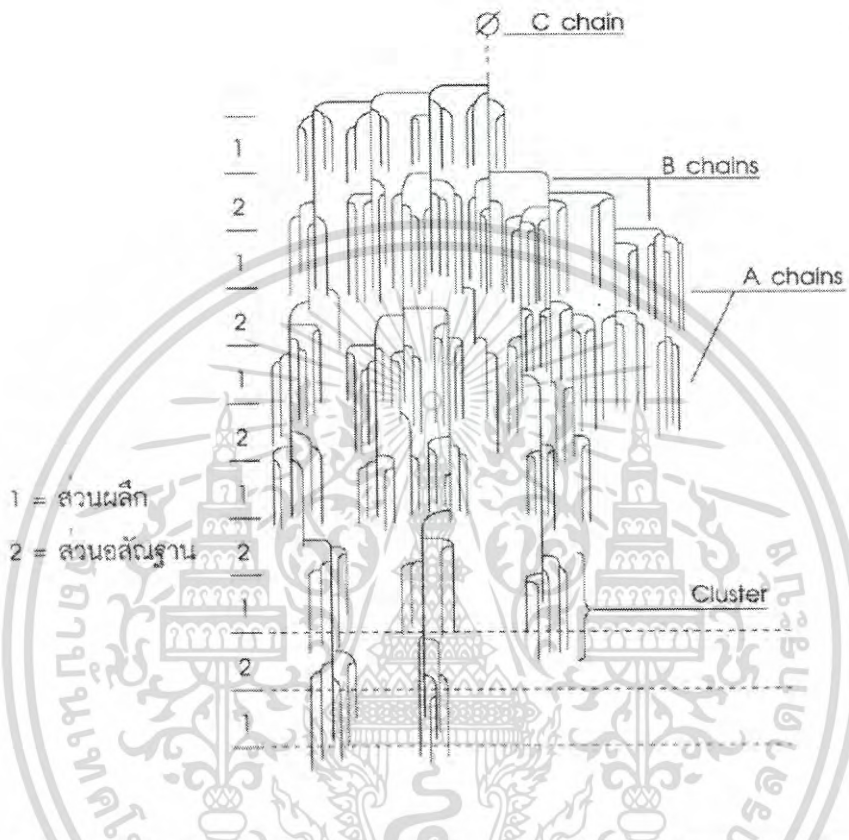
โครงสร้างกิ่งก้านของอะไมโลเพกทินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. A chain เป็นสายที่ไม่มีกิ่งก้านเกาะกับโมเลกุล มีจุดเชื่อมเพียงจุดเดียว
2. B chain เป็นสายที่มีกิ่งก้านมีจุดเชื่อมต่อกับสายอื่น 2 จุดหรือมากกว่า
3. C chain เป็นสายแกนมีเพียง 1 สายต่ออะไมโลเพกทิน 1 โมเลกุลเท่านั้น

สายเหล่านี้อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Cluster) ประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของ

เม็ดแป้ง และเกิดเป็นสายเกลียวคู่ (Double helix) ช่วยทำให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาออกสกรินเป็นเอกสารที่สว่างไสวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับรวมค่าเช่าไปรษณีย์ขนทานการคาคด้วยกรดและเอนไซม์ได้ [10] การเกิดสายเกลียวคู่ของอะไมโลเพกทินใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างเต็มที่ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดอริวาลส์ในการเชื่อมต่อกันเกิดเป็นไมเซลล์ (Micelle) ที่พองตัวได้จำกัด ไม่ละลายน้ำและเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ได้ ส่วนอสังฐานจะเป็นบริเวณเฟสต่อเนื่องที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ จึงดูดซับน้ำได้ดีกว่าและไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปแบ่งจะมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 20-45 [18-19]



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน [14]

2.4.2 สมบัติที่สำคัญของแป้ง

2.4.2.1. การพองตัวและการละลาย (Swelling and Solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25 – 30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติก (Intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวม ๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียส ขึ้นไปส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วนของ Crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแห (network) เรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของไมวากรณินใดๆ ทั้งสิ้น ออกจากมันได้โดยง่าย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิ น้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและ โมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสลายมากขึ้น [20]

2.4.2.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โดยธรรมชาติแป้งจะไม่ละลายน้ำ เมื่ออยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติ-ไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจน ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ใกล้กันในโมเลกุลของแป้งพันธะไฮโดรเจนนี้อาจเชื่อมต่อกับน้ำ ทำให้สามารถพองตัวได้เล็กน้อย และมีลักษณะที่ผันกลับได้เมื่อมีการให้ความร้อนแก่แป้งในสภาพที่มีน้ำเพียงพอ จะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลลง ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปภายในเม็ดแป้งบริเวณส่วนออสซิลฐานและเกิดการพองตัวแป้งจะมีความหนืดและความใสมากขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) ซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ โมเลกุลของแป้งที่เกิดการเจลาตินจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น แป้งแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับพันธะภายในเม็ดแป้งนั้นๆ สำหรับแป้งมันสำปะหลังจะมีช่วงอุณหภูมิเจลาตินประมาณ 61-70 องศาเซลเซียส ได้เป็นแป้งเปียก (Starch paste) ที่มีลักษณะใส ความหนืดสูง และมีอัตราการคืนตัวต่ำ [21]

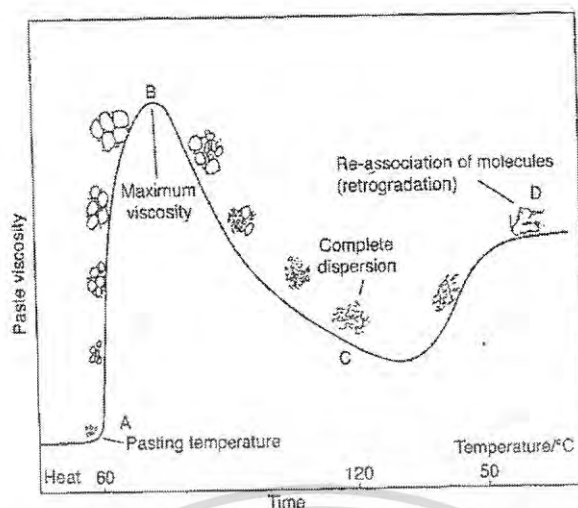
ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อ Crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ Double helical region เกิด Break up ของโครงสร้างผลึก Side chain ของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูก Hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบ ๆ ดังนั้นเกิดการ Stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิด Hydration ต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ Granule แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้สารละลาย

2.4.2.3 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

การให้ความร้อนแก่แป้งอย่างต่อเนื่องจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่พองตัวได้สูงสุดและแตกตัวออก โมเลกุลอะไมโลสจะหลุดออกมาภายนอก ทำให้แป้งมีความหนืดลดลง [22] เมื่ออุณหภูมิต่ำลง โมเลกุลอะไมโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้เคียงกัน หรือโมเลกุลอะไมโลเพคตินบริเวณที่เป็นเส้นตรง เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่ที่มีความหนืดคงตัวมากขึ้น กลายเป็นเจลหรือตะกอน เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือ การคืนตัว (Set back) ซึ่งอะไมโลสจะเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเกิดรีโทรเกรเดชัน เนื่องจากเป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา จึงทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้มาก [23] ส่วนอะไมโลเพคตินที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาคัดเนาไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
เคลื่อนที่ได้น้อยจึงเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ยาก [24]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [26]

2.5 แป้งดัดแปร

2.5.1 การปรับปรุงสายพันธุ์ (Genetic modification)

เนื่องจากอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน มีสมบัติที่แตกต่างกัน ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจึงมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติของแป้ง ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสายพันธุ์เพื่อให้ได้พันธุ์พืชที่มีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในแป้งตามที่ต้องการ วิธีการดัดแปรนี้นิยมใช้กับข้าวโพด แป้งข้าวโพดอะไมโลสสูง (High amylose corn starch) จะมีอะไมโลสร้อยละ 55 ขึ้นไป ในขณะที่แป้งข้าวโพดธรรมดา (Corn starch) จะมีอะไมโลสร้อยละ 28 ส่วนแป้งข้าวโพดเหนียว (Waxy corn starch) จะมีอะไมโลเพกทินเกือบร้อยละ 100 [13]

2.5.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

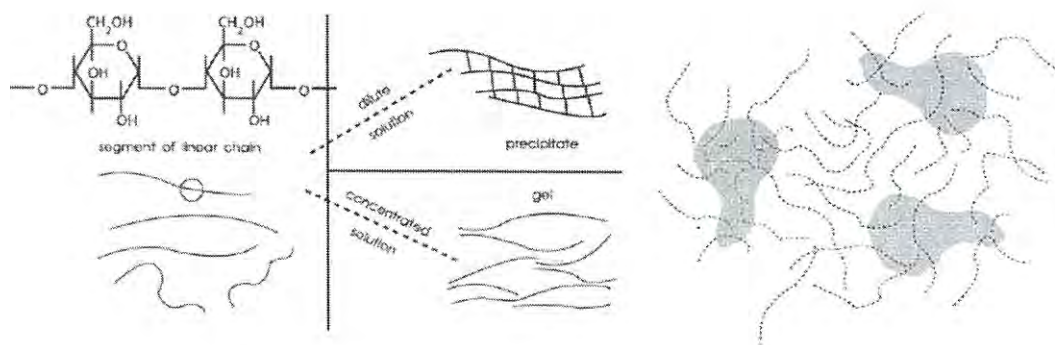
การดัดแปรทางกายภาพ ทำได้โดยกระบวนการพรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งในสภาพที่มีน้ำเพื่อให้เกิดการเจลาติไนซ์แล้วทำให้แห้ง แป้งดัดแปรที่ได้จะละลายในน้ำเย็นและให้ความข้นหนืดอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ทำได้โดยการปรับลดขนาดอนุภาคของแป้ง เพื่อควบคุมความสามารถในการกระจายตัวและการดูดซึมน้ำได้

2.5.3 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

2.5.3.1 การลดขนาดโมเลกุลโดยกรด (Acid thinning)

เป็นการลดขนาดโมเลกุลของแป้งโดยใช้กรดย่อยพันธะไกลโคซิดิกของแป้งให้กลายเป็นสายโซ่ที่สั้นลง ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดเกลือ หรือกรดกำมะถันเจือจางกับแป้งเข้มข้นร้อยละ 36-40 ที่อุณหภูมิประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์แป้งดัดแปรที่ได้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปเม็ดของแป้งที่มีความหนืดต่ำ ขณะร้อนมีความเหนียวในการยึดเกาะ (Adhesiveness) เพิ่มขึ้น แป้งสุกจะมีรีโทรเกรเดชันสูง และได้เจลที่แข็งแรงเมื่อทิ้งให้เย็นเหมาะสำหรับการใช้ในการผลิตเป็นลูกกวาด [1,24,28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อะไมโลส

อะไมโลเพกทิน

รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน [25]

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะเป็นการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชัน ทำให้แป้งเกิดการหดตัวและบีบน้ำออกจากเจล เรียกว่า ซินเนอริซิส (Syneresis) โดยอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทินเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่สำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อย ส่วนแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ถ้ามีความเข้มข้นของแป้งต่ำจะเกิดเป็นตะกอน แต่ถ้ามีความเข้มข้นของแป้งสูงจะเกิดเป็นเจลที่แข็งแรง สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะทำให้เกิดเป็นเจลที่อ่อนนุ่ม [1]

2.4.2.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขึ้น น้ำบริเวณรอบเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากเกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting temperature) ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่จนมีความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นความหนืดจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างภายในเม็ดแป้งบางส่วนแตกออก เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุล หรือการคืนตัว (Set back) ทำให้มีความหนืดสูงขึ้นอีก [10]

2.5.3.2 เดกซ์ทรีโนเซชัน (Dextrinization)

เป็นการให้ความร้อนแก่สตาร์ชแห่งในสภาพที่มีกรดเพื่อย่อยโมเลกุลแป้งให้มีขนาดเล็กลงเป็น เดกซ์ทรีน แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ White dextrins ได้จากการย่อยแป้งในสภาวะที่มี pH ต่ำ และอุณหภูมิ ต่ำ มีสีขาว และละลายน้ำได้ร้อยละ 60-95 Yellow dextrins หรือ Canary dextrins ได้จากการ ย่อยแป้งในสภาวะที่มี pH ต่ำและอุณหภูมิสูง มีสีเข้มกว่า White dextrins ละลายน้ำได้ร้อยละ 100 และ British gums ได้จากการย่อยแป้งในสภาวะที่มี pH และอุณหภูมิสูง มีสีเข้มกว่า White dextrins ละลายน้ำได้ร้อยละ 100 เดกซ์ทรีนที่มีความหนืดต่ำจะละลายในน้ำเย็นได้ดี มักใช้เป็นสาร ทำให้เกิดฟิล์ม และสารยึดเกาะที่กินได้ [1,24]

2.5.3.3 ออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เช่น โซเดียมไฮเพอร์ คลอไรต์ โพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทางเคมี และขนาดโมเลกุล โดยตัดพันธะภายในโมเลกุลแป้งแบบสุ่ม ทำให้คุณสมบัติของแป้ง เปลี่ยนแปลงไป แป้งตัดแปรที่ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดลดลง สูญเสียคุณสมบัติการเกิด เจลไปบางส่วน เป็นผงแห้งไม่เกาะติดกัน จึงใช้เป็นสารโรยในการผลิตอาหารเช่น มาร์ชแมลโล หมาก ฝรั่ง ใช้ผสมในแป้งเคลือบให้เกาะติดกับอาหารได้ดี ใช้ทำลูกกวาด ขนมหวานที่ต้องการความใสและ นุ่ม รวมทั้งใช้ในการผลิตยาเม็ดด้วย [24]

2.5.3.4 การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization)

1. การคลอสลิง (Cross-link)

เป็นการตัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Bifunctional) หรือ หลายหมู่ (Polyfunctional) เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต แอซีติกแอนไฮไดรด์กับกรดแอดิพิคอิพิ คลอโรไฮไดริน เกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างโมเลกุลแป้งตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป จึงมีความแข็งแรงมาก ขึ้น มีความหนืดลดลง ทนต่อความร้อน แรงเฉือน และความเป็นกรด จึงเหมาะที่จะใช้กับอาหารที่มี ความเป็นกรดสูง อาหารที่บรรจุขณะร้อนหรือผ่านกระบวนการแปรรูปแบบปลอดเชื้อ เป็นต้น

2. การแทนที่ (Substitution)

เป็นการเติมหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล แป้งเพียงหนึ่งหมู่ ทำให้แป้งมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น มีความใสและความหนืดสูงขึ้น ความคงตัวใน การละลายจากการแช่เยือกแข็งดีขึ้น อุณหภูมิเจลาติไนซ์ และรีโทรเกรเดชันลดลง สารเคมีที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการ ทำให้มีสมบัติและการนำไปใช้แตกต่างกัน แป้ง ตัดแปรประเภทนี้ ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ เช่น แป้งแอซีเตต แป้งซัคซิเนต แป้งฟอสเฟต และแป้งอีเทอร์ เช่น แป้งไฮดรอกซีพรอพิล เป็นต้น การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลแป้ง จะแสดงเป็น ระดับ การแทนที่ (Degree of substitution, DS) หมายถึง จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ต่อจำนวนหน่วยกลูโคส ซึ่งในโมเลกุลของกลูโคสจะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 การแสดงค่า DS จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งโมเลกุล โดยทั่วไปการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัดแปรในอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในปริมาณน้อยและปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้น แแบ็งเอสเทอร์และแบ็งอีเทอร์ที่นิยมใช้ทางการค้าจึงมี DS ต่ำกว่า 0.3 ระดับการแทนที่ [29]

(DS) = โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ยโมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคสทั้งหมด

2.6 พิล์มแบ็ง

แบ็งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม หรือขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ได้ และมีราคาถูก จึงมีแนวโน้มในการนำมาใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ได้ พบว่า พิล์มจากแบ็งมันสำปะหลังที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เตรียมได้จากแบ็งความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เพื่อเป็นพลาสติกไฮเซอร์แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะปรากฏใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร มีความต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กิโลกรัมต่อตารางเมตร การยืดตัวร้อยละ 10.13 ความทนต่อการพับ 45 ครั้ง และสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นซองที่ปิดผนึกได้ด้วยความร้อน แต่เนื่องจากฟิล์มแบ็งมันสำปะหลังยังมีข้อด้อย คือ มีความไวต่อความชื้นและสามารถดูดซับน้ำได้มาก จึงเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์แห้ง [30]

2.6.1 สมบัติของฟิล์มแบ็ง

ในอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการทำแบ็งแห้งเพื่อจุดประสงค์ในการห่อหุ้มกระดาษ หรือเส้นใย (Coating) หรือเพื่อใช้เป็นกาว (Adhesive) สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ ฟิล์มแบ็งจะมีคุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์ม และความเงามัน (Gloss)

แบ็งมันสำปะหลัง แบ็งมันฝรั่ง และแบ็งข้าวโพดเหนียวมีความยืดหยุ่นมากกว่าแบ็งสาลีจึงเหมาะสมในการอบแห้งมากกว่าแบ็งข้าวโพดและแบ็งสาลี เนื่องจากขณะอบแห้งเม็ดแบ็งข้าวโพดและเม็ดแบ็งสาลีจะเปราะ แตกหักได้ง่าย

ฟิล์มแบ็งที่ได้จากแหล่งที่ต่างกันจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้แตกต่างกัน และมีอัตราในการเกิดรีโทรเกรเดชันต่างกัน แบ็งจากธัญพืชมีอะไมโลสและไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันในระหว่างการทำให้แบ็งแห้ง ทำให้ส่วนนั้นไม่ละลายและเกิดเป็นร่างแหก่อให้เกิดการไม่ละลายของส่วนอะไมโลสเพคตินอีกด้วย ในขณะที่แบ็งมันฝรั่ง แบ็งมันสำปะหลัง และแบ็งข้าวโพดเหนียวมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำ จึงสามารถละลายในน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์ ฟิล์มแบ็งจะมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ในช่วงระยะหนึ่ง แบ็งฟิล์มที่ได้นำไปใช้ผลิตภัณฑ์ประเภทกาว เช่น ใช้ทำซองจดหมาย แสตมป์ กระดาษกาว

ฟิล์มแบ็งจากมันสำปะหลัง แบ็งมันฝรั่ง และแบ็งข้าวโพดเหนียวมีความใสและความมันเงามากกว่าฟิล์มแบ็งจากธัญพืช เนื่องจากในระหว่างการทำให้แห้งและการเก็บรักษาแบ็งจากธัญพืชจะเกิดรีโทรเกรเดชัน โมเลกุลอะไมโลสจะเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายทำให้ฟิล์มขุ่น และเปราะง่าย [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด [31]

ลักษณะ	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด เหนียว
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

2.6.2 การเกิดฟิล์ม

การเกิดฟิล์ม จะมียอดประกอบหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์ม ตัวทำละลาย และสารเติมแต่งที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม เมื่อนำองค์ประกอบมาทำให้ละลายและกระจายตัวแล้วแยกตัวทำละลายออกจะเกิดแรงยึดเหนี่ยว 2 ชนิด ได้แก่ แรงโคฮีชัน (Cohesion) และแรงแอดฮีชัน (Adhesion) โดยแรงโคฮีชันเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความยาว และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะในการเตรียมฟิล์มจึงควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายที่อุ่นและทำให้ฟิล์มแห้งด้วยอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่เหมาะสม ส่วนแรงแอดฮีชันจะเป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่เกี่ยวข้องในการเตรียมฟิล์ม เช่น พลาสติกไซเซออร์ เป็นต้นทั้งแรงโคฮีชันและแอดฮีชันจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม เช่น ความหนาแน่น ความสามารถในการซึมผ่าน ความเปราะ และความยืดหยุ่น เป็นต้น

2.6.3 การขึ้นรูปฟิล์ม

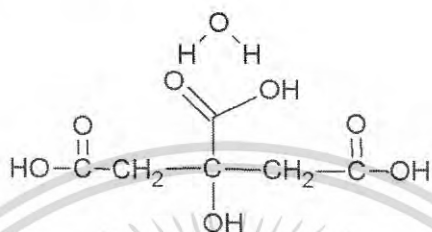
ในการขึ้นรูปฟิล์ม สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. การเทสารละลายลงบนวัสดุต่างๆ (Solvent casting) เป็นการขึ้นรูปโดยการเทสารละลายของฟิล์ม และแผ่เป็นแผ่นบางๆ ลงบนภาชนะหรือภาชนะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม และใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้แห้ง แล้วลอกออก จะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่ต้องการ
2. การเอกซ์ทรูชัน (Extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือในการทำให้ฟิล์มเป็นแผ่นบาง แต่วัสดุที่ใช้จะต้องมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)
3. การทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) เป็นการขึ้นรูปโดยการผ่านแผ่นฟิล์มเข้าไปในลูกกลิ้งร้อน เพื่อรีดให้ฟิล์มเรียบและแห้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับ แรงกดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์ม และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ฟิล์มผ่านเข้าไป [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 กรดซิตริก (Citric acid)

กรดซิตริกเป็นกรดอ่อนใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว สับปะรด และส้ม [32]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างกรดซิตริก [33]

คุณสมบัติทางเคมีของกรดซิตริก [32]

IUPAC name	: 2-hydroxypropane-1, 2, 3-tricarboxylic acid
ชื่ออื่น	: Citric Acid Anhydrous, Uratyl, U, Citric Acid
Monohydrate	
CAS	: 77-92-9
สูตรโมเลกุล	: $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$
น้ำหนักโมเลกุล	: Anhydrous : 192.12352 g/mol
	: Monohydrate : 210.14 g/mol
ความหนาแน่น	: Anhydrous : 1.665 g/cm ³
	: Monohydrate : 1.542 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	: Anhydrous : 153 °C
	: Monohydrate : 70-75 °C
จุดเดือด	: Anhydrous : -
	: Monohydrate : 175 °C
ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้	: -474.5 kCal/mole
ค่าคงที่การแตกตัวของกรด	: pKa1 = 3.13, pKa2 = 4.76, pKa3 = 6.39
Hydrogen Bond Donor Count	: 4
Hydrogen Bond Acceptor Count	: 7
Rotatable Bound Count	: 5
Complexity	: 227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ

ทางกายภาพ	: ผงแห้ง, ของเหลว, คริสตัลขนาดใหญ่
สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น
การละลาย	: ละลายในน้ำ 59 g/100 ml ที่อุณหภูมิ 20 °C ละลายน้ำได้ดีในเอทานอล, อีเทอร์, เอทิล อะซีเตต ไม่ละลายในเบนซีนและคลอโรฟอร์ม

การใช้ประโยชน์

- กรดซิตริก เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) ที่ใช้อย่างกว้างขวางในอาหาร และเครื่องดื่ม ปรุงแต่ง กลิ่นรส (Flavoring agent) ปรุงให้อาหารมีรสเปรี้ยว ใช้ในเครื่องปรุงรส (Seasoning) ลูกอม ลูกกวาด (Acid regulator)
- เป็นสารกันหืน (Antioxidant)
- เป็นสารกันเสีย (Preservative)
- เป็นสารจับโลหะ (Chelating agent)
- เป็นสารทำความสะอาด (Cleaning agent)

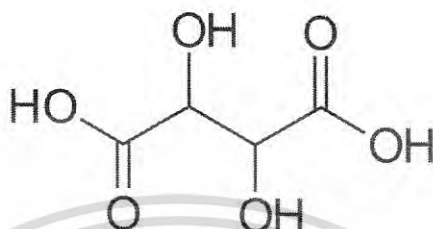


รูปที่ 2.8 แสดงกรดซิตริกในรูปผลึก Monohydrate [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กรดมาลิก (Malic acid)

กรดมาลิก (Malic acid) เป็นสารประกอบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แอปเปิ้ล เชอร์รี่ พลัม มะเขือเทศ เป็นต้น ซึ่งสารประกอบที่ทำให้เกิดความเปรี้ยว คือ Dicarboxylic Acid โดยมี ส่วนประกอบที่เป็น Malate ซึ่งจะสั้กต์ออกมาเป็น Malic acid



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของกรดมาลิก [35]

คุณสมบัติ [34]

IUPAC name	: 2-hydroxybutanedioic acid
ชื่ออื่น	: L-Malic acid, D-Malic acid, (-)-Malic acid, (+)-Malic acid, (S)-Hydroxybutanedioic acid, (R)- Hydroxybutanedioic acid
CAS	: 6915-15-7
สูตรโมเลกุล	: $C_4H_6O_5$
น้ำหนักโมเลกุล	: 134.08744 g/mole
พารามิเตอร์การคำนวณค่าอ้างอิงไม่ชอบน้ำ(XLogP)	: -1.3
ความหนาแน่น	: 1.250
ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้	: -320.1 kCal/mole
ค่าคงที่การแตกตัวของกรด	: $pK_{a1} = 3.40$, $pK_{a2} = 5.20$
Hydrogen Bond Donor Count	: 3
Hydrogen Bond Acceptor Count	: 5
Rotatable Bound Count	: 3
Complexity	: 129

ลักษณะ

ทางกายภาพ	: มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็ก
สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น
การละลาย	: สามารถละลายน้ำได้และสามารถละลายน้ำได้สูงมากในเมทานอล,

เอทานอล, อะซิโตน, อีเทอร์ และตัวทำละลายอื่น ๆ ที่มีขั้ว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

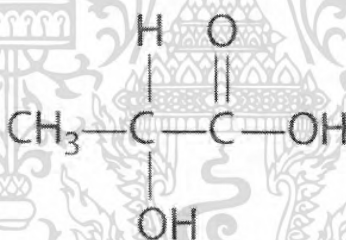
ประโยชน์

- ด้านอาหาร ใช้เพื่อให้เกิดรสเปรี้ยวในผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ความเปรี้ยวจะมีความแตกต่างจากความเปรี้ยวของกรดซิตริก (Citric acid) โดยกรดมาลิกจะเปรี้ยวคล้ายผลไม้ต่าง ๆ ที่มีรสเปรี้ยว แต่กรดซิตริกจะให้เปรี้ยวแบบมะนาว ซึ่งกรดมาลิกมีรสเปรี้ยวที่ชัดเจนกว่า และมีความคงอยู่ของรสชาติที่นานกว่ากรดมะนาว ตัวอย่างอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน ผลิตภัณฑ์จากธัญพืช ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์ประเภทซอส และเครื่องดื่ม เป็นต้น

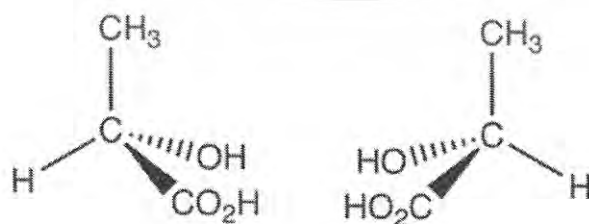
- ปรับความเป็นกรด
- ช่วยจับอนุมูลโลหะ (Chelating agent)
- ด้านเภสัชกรรม ทำหน้าที่เป็นสารแต่งรส ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับรสชาติเปรี้ยวในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดนั้น ๆ

2.9 กรดแลกติก (Lactic acid)

กรดแลกติกเป็นของเหลวไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ระเหยได้ยาก มีความสามารถในการกัดกร่อนเล็กน้อย พบได้ตามกระบวนการหมัก เช่น นม แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด กากน้ำตาล เป็นต้น มีความสามารถละลายในน้ำ



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของกรดแลกติก [37]



D(-)-lactic acid

L(+)-lactic acid

รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของกรดแลกติก [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ นพ.ไพจิตร กิจวิริยะกุล ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ [36]

IUPAC name	: 2-hydroxypropanoic acid, 2-hydroxypropanoic acid
ชื่ออื่น	: L(+)-lactic acid, D(-)-lactic acid
CAS	: 50-21-5
สูตรโมเลกุล	: $C_3H_6O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	: 90.08 g/mole
จุดหลอมเหลว	: 52.8-54.0°C
ค่าคงที่การแตกตัวของกรด	: $pK_{a1} = 3.86$
Heat of combustion	: 1361 KJ/mol
Specific heat	: 190 J/mol.°C

ลักษณะ

ทางกายภาพ	: มีลักษณะเป็นของเหลว
สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: กลิ่นฉุน
การละลาย	: ละลายได้ในน้ำ, แอลกอฮอล์, อะซิโตน, เอสเทอร์ และ

กลีเซอรอล ไม่ละลายในคลอโรฟอร์ม

ประโยชน์ [39]

1. อุตสาหกรรมอาหาร

อุตสาหกรรมอาหารถือเป็นอุตสาหกรรมที่นำกรดแลคติกมาใช้ประโยชน์มากที่สุด ซึ่งสามารถผลิตขึ้นได้เองหรือการเติมในกระบวนการหมักอาหารในอุตสาหกรรมหลายชนิด อาทิ นมเปรี้ยว โยเกิร์ต ขนมปัง เบียร์ เนยเทียม ผักผลไม้ดอง ไส้กรอก และเครื่องดื่มบางชนิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เติมในอาหารเพื่อให้มีกลิ่น และรสเปรี้ยวที่นำรับประทานหรือเพื่อป้องกันการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อื่นที่ทำให้อาหารบูดเน่า และใช้กรดแลคติกผสมในเครื่องดื่มนิยมใช้ในรูปแบบแคลเซียมแลคเตทเพื่อเสริมเกลือแร่ และแคลเซียม

สำหรับการถนอมอาหารอาจมีการใช้กรดแลคติกร่วมกับกรดอะซิติกสำหรับป้องกันการเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้กรดแลคติกเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดแลคติกในรูปของเกลือสำหรับป้องกันการบูดเน่า เช่น โซเดียม และโพแทสเซียมแลคเตท ทำให้มีรสเค็มเล็กน้อย นิยมใช้ในอาหารประเภทเนื้อต่างๆ อาทิ เนื้อไก่ เนื้อปลา อาหารทะเล เป็นต้น

2. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

– ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เช่น กรดแลคติก แลคเตท แคลเซียมแลคเตท โซเดียมแลคเตท เพื่อเป็นสารเร่งการผัดผิวใหม่ ให้ความชุ่มชื้น ลดการเกิดสิว ควบคุม pH

– ผลิตภัณฑ์สำหรับช่องปาก เช่น แคลเซียมแลคเตท เพื่อป้องกันฟันผุ และยับยั้งการก่อตัว

ของหินปูน ในรูปของส่วนผสมของยาสีฟัน และน้ำยาบ้วนปาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

– ผลิตภัณฑ์บำรุงเส้นผม โดยใช้กรดแลคติกเป็นส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่เคลือบให้เส้นผมเงางาม

– ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดร่างกาย โดยใช้แคลเซียมแลคเตทเป็นส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่ให้ความชุ่มชื้น และขัดเซลล์ผิว อาทิ ครีมอาบน้ำ สบู่ก้อน สบู่เหลว โลชั่นทาผิว ยาสระผม และทำหน้าที่รักษาความชุ่มชื้นให้กับผลิตภัณฑ์

3. อุตสาหกรรมอื่นๆ

– การผลิตพลาสติกที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น การผลิตพลาสติกพอลิแลคเตท

– ใช้สำหรับปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตเส้นใย อุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น

– เป็นสารตั้งต้นผลิตสารอื่นๆ เช่น ผลิตกรดโพโฟโนอิก กรดอะซิติก และกรดอะไซลิก เป็นต้น

– แอนติโมนีแลคเตท ใช้สำหรับเป็นส่วนผสมของสีย้อมทำให้สียึดติดแน่น

– แคลเซียมแลคเตท ใช้สำหรับกินเสริมป้องกันการขาดแคลเซียม

– คอปเปอร์แลคเตท ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำยาชุบโลหะไฟฟ้า

– ไอออนแลคเตท ใช้สำหรับกินเสริมการขาดธาตุเหล็ก

– โซเดียมแลคเตท ใช้สำหรับเคลือบป้องกันการความชื้น และการกัดกร่อนของวัสดุ

– เอทิลแลคเตท ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายของไนโตเซลลูโลส และเซลลูโลสอะซิเตรท

– เอ็น บิวทิลแลคเตท ใช้เป็นตัวทำละลายของน้ำมันขัดเงา

2.10 พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer)

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อืดตัวและแตกง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อน กระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า พลาสติกไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซออร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอได้ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Eetensibility or strechability) ของพอลิเมอร์โดยการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้พลาสติกไซเซออร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวทำให้กระบวนการขึ้นรูปง่ายขึ้น

2.10.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์ (Plasticization and Plasticizer)

พลาสติกไซเซชัน หมายถึง กระบวนการหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติกไซเซออร์โดยพลาสติกไซเซออร์จะไปลดแรง

ดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเคลื่อนที่ได้มาก ซึ่งกระบวนการเพิ่มพลาสติกไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) และเรียกพลาสติกไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่าพลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการละลาย

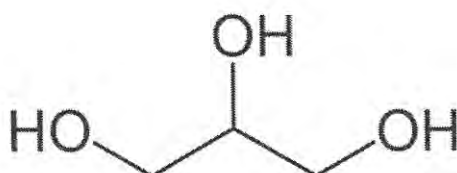
ข้อดีของพลาสติกไซเซอร์ภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีการอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานโดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไป อย่างไรก็ตามพลาสติกไซเซอร์ภายนอกมีข้อด้อยคือพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ พลาสติกไซเซอร์ภายนอกที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถเข้ากันได้ดี (Compatibility) กับพอลิเมอร์
2. มีประสิทธิภาพ (Efficiency)
3. มีความคงตัวสูง (Permanence) อยู่กับพอลิเมอร์ได้นาน
4. เสถียร ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น และไม่มีพิษ

โดยทั่วไปพลาสติกไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง -50 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือพลาสติกไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (True Plasticizer or Primary Plasticizer) และพลาสติกไซเซอร์เสริมแรงหรือพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer โดยพลาสติกไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดีสามารถใช้เดี่ยว ๆ ได้ ในขณะที่พลาสติกไซเซอร์เสริมแรงมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้จำกัดจึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซอร์เสริมแรงยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย [31]

2.10.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือ กลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอมมีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้ในการผลิตสบู่และไขมัน มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง ใช้เป็นสารให้ความหวาน เป็นส่วนผสมในการผลิตสบู่เหลวและเครื่องสำอาง เป็นต้น มีการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มบริโภาคได้หลายชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล [40]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1779 โดย Scheele ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากปฏิกิริยาการผลิตสบู่ (Saponification) ระหว่างน้ำมันมะกอกกับ Lead oxide ต่อมาในปี ค.ศ. 1813 Chevreul ได้พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบของไขมัน โดยอยู่ในรูปของกลีเซอรอลเอสเทอร์ (Glycerol ester) ของกรดไขมันอิสระ (Fatty acids) และได้ชื่อว่า “กลีเซอรอล” ซึ่งมาจากภาษากรีกที่มีความหมายว่า “มีรสหวาน” กลีเซอรอลที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรกในปี ค.ศ. 1866 เมื่อ Nobel ได้ทำการผลิตระเบิดไดนาไมต์ในรูปไตรไนเตรตของกลีเซอรอลหรือไนโตรกลีเซอรอล (Nitroglycerin) และในปี ค.ศ. 1949 สามารถสังเคราะห์กลีเซอรอลโดยใช้โพรพีนเป็นสารตั้งต้นซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการสังเคราะห์กลีเซอรอลที่มีความสำคัญมาก

ในปัจจุบันกลีเซอรอลถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีที่ไม่เป็นอันตราย โดยในปี ค.ศ. 1986 มีปริมาณการผลิตโดยรวมประมาณ 550,000 ตัน/ปี โดยเป็นการผลิตจากการแตกตัว (Splitting) น้ำมันที่ได้จากธรรมชาติ 75% และการสังเคราะห์จากโพรพีน 25%

- สมบัติทางกายภาพ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาลจึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน (มีรสหวานเป็น 6 เท่าของน้ำตาล) และเนื่องจากโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวที่มีความหนืด สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (101.3 kPa) และจุดเดือดของกลีเซอรอลจะลดลงตามความดันที่ลดลง

กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายจำพวกน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้งฟินอล ไกลคอล โพนเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่ป็นเฮทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมไนโตรเจนในวงแหวน (เช่น ไพรีดีน, ควิโนลีน) กลีเซอรอลไม่สามารถละลายในไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกฮาโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้นกลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ ต่อสารหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

- สมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนแอลกอฮอล์ทั่ว ๆ ไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลาง ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางหรือต่าง กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดเป็นอะโครลีนในทางตรงกันข้ามในสภาวะกรดเล็กน้อยพบว่า ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 ppm) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลจึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือต่างและที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายของกลีเซอรอล [41]

Property	Value
Molecular weight	92.09
Melting point	18 °C
Boiling point (101.3 kPa)	290 °C
Density (20 °C)	1.261 g/cm ²
Heat of fusion	669 kJ/mol
Thermal conductivity (0 °C)	0.29 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
Relative dielectric constant (25 °C)	42.48
Flash point	177 °C

- ประโยชน์ของกลีเซอรอล

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่หลากหลายจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม คุณสมบัติที่สำคัญประเด็นหนึ่งคือ เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น การใช้กลีเซอรอลมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และอาหาร เนื่องจากไม่เป็นพิษและมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีต่อสารประกอบหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ นอกจากนี้กลีเซอรอลยังเป็นสารอิมเมกแทนท์ประเภทอินทรีย์ (Organic humectants) จำพวกพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ก็สามารถดูดกักความชื้นจากบรรยากาศมาเก็บไว้ได้ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นของบรรยากาศ [41]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Menzel และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของแป้งที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก โดยนำแป้งมันฝรั่งมาผสมกับกรดซิตริกในอัตราส่วน 0, 5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นรูปเป็น Solution cast starch films พบว่า โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง และหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดซิตริก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริก การเชื่อมโยงและมวลโมเลกุลของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้แป้งที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกทำให้มีสมบัติการละลายน้ำลดลง มีสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำเพิ่มมากขึ้น และมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น

กษิตติ อิมประไพ และคณะ [42] จากงานวิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโกลด์จากแป้งต่างชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้น 5, 10 และ 15% (w/v) โดยเติมพลาสติกไซเซอร์ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักของแป้ง และทำให้แห้งที่

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทดสอบสมบัติทางกลกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนา (Thickness) ความทึบแสง (Opacity) อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) การละลาย (Solubility) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, TS) และการยืดตัว (Elongation) พบว่า ความหนาของฟิล์มจากแป้งทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้งเพิ่มขึ้น ความใสของแป้งมันสำปะหลังมีค่าต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้า และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้งเพิ่มขึ้น สำหรับการละลาย ความทนต่อแรงยึด และการยืดตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการละลาย ความทนต่อแรงยึด และการยืดตัวสูงกว่าฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้งเพิ่มขึ้น

ปฐมมา จาตกานนท์ และคณะ [43] ได้เสนองานวิจัยการศึกษาผลการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยการย่อยในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ในน้ำและเอทานอล ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-24 ชั่วโมง พบว่าแป้งที่ย่อยด้วยกรดในเอทานอลมีความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งที่ย่อยด้วยกรดในน้ำที่ระยะเวลาการย่อยเดียวกัน 2-5 เท่า แป้งเปียกของแป้งย่อยด้วยกรดในน้ำและเอทานอลที่ระยะเวลาการย่อยเท่ากันมีความใสมากกว่าแป้งเปียกจากแป้งดิบและมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าลดลงหลังการเก็บรักษา 7 วัน โดยเฉพาะแป้งเปียกจากแป้งย่อยด้วยกรดในน้ำ ฟิล์มที่เตรียมได้จากแป้งดิบและแป้งย่อยด้วยกรดในน้ำและเอทานอลที่มีความหนืดขณะร้อนสูง (400-500 mPa.s) กลาง (150-200 mPa.s) และต่ำ (< 20 mPa.s) ซึ่งได้จากการย่อยด้วยแป้งด้วยกรดในน้ำเป็นเวลา 8, 12, และ 24 ชั่วโมง และในเอทานอลเป็นเวลา 1, 4 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ มีลักษณะเป็นแผ่นใสและมีรอยหยักเป็นลอนในสภาวะที่ไม่มีกลีเซอรอล แผ่นฟิล์มจากแป้งย่อยด้วยกรดโดยเฉพาะในเอทานอลมีรอยแตกและเปราะมากขึ้นเมื่อระดับความหนืดของแป้งที่ใช้เตรียมฟิล์มลดลง ในขณะที่การเติมกลีเซอรอลร้อยละ 20 ทำให้ฟิล์มมีผิวเรียบขึ้น โดยทั่วไปฟิล์มจากแป้งย่อยด้วยกรดมีการส่องผ่านแสงและความสามารถในการละลายได้สูงกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ และมีค่าความเค้นแรงดึงและค่า Young's modulus สูงกว่า ในขณะที่ร้อยละการยืดตัวต่ำกว่า ฟิล์มจากแป้งที่ย่อยด้วยกรดจึงแข็งแรงแต่เปราะกว่าและมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ ทั้งนี้การเติมกลีเซอรอลส่งผลให้ทั้งความเค้นแรงดึง ค่า Young's modulus และร้อยละการยืดตัวของฟิล์มลดลง

สุวิทย์ เอื้อโสภณ [44] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำเป็นตัวทำละลาย ทำ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกจากนั้นนำแป้งที่ผ่านการดัดแปรมาผสมกับพลาสติกไซเซออร์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้พลาสติกไซเซออร์ 4 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล กรดสแตยริก และน้ำมันปาล์ม โดยผสมที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง นำของผสมที่ได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการหล่อ แล้วนำไปลงบนกระดาษขนาด 19.4 x 28 เซนติเมตร นอกจากนี้ ยังพบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเหมาะไปใช้ประโยชน์ การค้า ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์มีผลต่อสมบัติด้าน แรงดึงและความสามารถในการดูดซับความชื้นไม่ต่างกันเท่าใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มเป็นอย่างมาก ฟิล์มเหล่านี้มีความทนทานต่อ ไขมันและน้ำมันดีมาก แต่ไม่ทนทานต่อน้ำ กรด และด่าง นอกจากนี้ ฟิล์มดังกล่าวยังมีความทนทาน ต่อสภาพบรรยากาศที่ต่ำกว่าและมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่สูงกว่าฟิล์มแข็งดัดแปรที่ไม่ผสมพลาสติกไฮเซออร์ ผลการทดลองทั้งหมด บ่งชี้ว่า ในพลาสติกไฮเซออร์ทั้งหมดที่ศึกษา ซอร์บิทอลที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแข็ง เป็นพลาสติกไฮเซออร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟิล์มแข็งมันสำปะหลังดัดแปร

F. H. Otey และคณะ [45] ได้เตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวโพดและ Ethylene-acrylic acid (EAA) พบว่าการเติมพลาสติกไฮเซออร์ลงไปในการสร้างฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความทนน้ำ (Water resistance) และความยืดหยุ่น (Flexibility) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น เหตุผลที่ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อาจเกิดจากโมเลกุลแป้งเกิดการขยายตัวทำให้ความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อนำ สารละลายแป้งเติม EAA เข้าไปทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมกันอย่างห่างๆ และทำให้โมเลกุลแผ่กว้างมากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นฟิล์มมีความยืดหยุ่น ความสามารถในการยึดตัวและความคงทนต่อการพับดัด และพบว่าการใช้แป้งเพียงอย่างเดียวในการเตรียมฟิล์มทำให้ฟิล์มแตก

นพกาญจน์ จันทรเดช [46] ได้ทำการศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดซิตริก โดยเตรียมแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเติมกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 0.1, 0.01, 0.001 และ 0.0001 โมลาร์ ซึ่งเตรียมได้โดยละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร ในสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปทำให้แห้ง โดยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งที่เตรียมได้แห้ง แล้วนำมาบดเป็นผง หลังจากนั้นนำไปทดลองเพื่อหาค่าความหนืดภายในโดยใช้ U-tube Ostwald viscometer และปริมาณอะไมโลสโดยอาศัยหลักการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนที่มีสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่า ความหนืดภายในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเติมกรดซิตริกที่ทุกความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ปริมาณอะไมโลสกลับลดลงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเติมกรดซิตริกที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า กรดซิตริกอาจมีผลกับขนาดของอะไมโลเพกตินเพียงเล็กน้อย แต่มีผลต่ออะไมโลสมากกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่า การใช้กรดซิตริก ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที ไม่ทำให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับกรณีของกรดแร่ ดังนั้นเมื่อมีการใช้กรดซิตริกเป็นวัตถุเจือปนอาหารที่ระดับดังกล่าวในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบคาดว่าจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก

ฐิติรักษ์ วรพัฒน์ผดุง และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง ดัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ (ATS) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (3 โมลาร์) และ แอลกอฮอล์ (40%v/v) เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง (TS) พบว่า สมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ และแป้งมันสำปะหลังธรรมดา มีความแตกต่างกันโดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ ไม่พบลักษณะเม็ดแป้งเอกลักษณ์และมีความเป็นทึบสีฐานซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และประจุผิวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ แสดงค่าเป็นลบลดลง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรใช้

แปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ พองตัวในน้ำกลั่น และสามารถละลายได้ทั้งในน้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก (0.1 โมลาร์) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ที่อุณหภูมิห้อง และของเหลวที่ได้มีความหนืด โดยความสามารถในการละลายและความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ในกรดไฮโดรคลอริก (0.1 โมลาร์) มีค่าน้อยที่สุด จึงสรุปได้ว่าแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์ สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิห้อง ของเหลวที่ได้มีความหนืด และมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นสารช่วยทางเภสัชกรรม

A. L. D. Roz และคณะ [48] ได้ศึกษาผลของมวลโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ปรับปรุงด้วยกรดอินทรีย์ ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล ซึ่งกรดอินทรีย์ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติ คือ กรดแอสคอร์บิก และ กรดซิตริก โดยทำการหลอมแป้งข้าวโพดที่มีกลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์กับกรดอินทรีย์แต่ละชนิดในปริมาณต่างๆกัน ในเครื่องผสม Internal mixer ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนได้เป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ หาค่าความหนืด หามวลโมเลกุล วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ความเป็นผลึก การดูดน้ำ และสมบัติทางความร้อน พบว่า เมื่อมีการใส่กรดแต่ละชนิดในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาเรชมีมวลโมเลกุล ความหนืด และอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง โดยกรดซิตริกมีการลดลงมากกว่าการใส่กรดแอสคอร์บิก ส่วนสมบัติการดูดน้ำและความเป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรด

C. Beninca และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติการไหลและโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิต่างกันโดยแป้งมันสำปะหลังถูกไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TG-DTA และ DSC ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค NC-AFM และ XRD ศึกษาความหนืดด้วยเทคนิค RVA พบว่า หลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิต่างกันทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้ง และความ เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะเพิ่มมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อทำการศึกษาโครงสร้าง พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีของแป้งและกรด แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของแป้งตัดแปรลดลง

E. Olsson และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับความชื้น และสมบัติการซึมผ่านของน้ำ โดยทำการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งด้วยวิธี Solution casting ที่ปริมาณกรดซิตริกในอัตราส่วน 0, 5, 10, 20 และ 30 pph ที่อุณหภูมิ 105, 130 และ 150 องศาเซลเซียส แล้วทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่มีการผสมกลีเซอรอลเพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปควบคุมความชื้น และนำไปทดสอบการดูดซับความชื้น และการซึมผ่านของน้ำ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิตริก ทำให้การดูดซับความชื้นและการซึมผ่านของน้ำลดลง มากกว่าฟิล์มที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยปริมาณกรดซิตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 ppm ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำให้การดูดซับความชื้นและการซึมผ่านของน้ำลดลงมากที่สุด

J. Man และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาสมบัติของแป้งข้าวเจ้าตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้แป้งข้าวเจ้าชนิดที่มีอะไมโลสสูง โดยทำการไฮโดรไลซิสแป้งข้าวเจ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 2.2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2, 4 และ 8 วัน จากนั้นนำแป้งข้าวเจ้าตัดแปรที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ถูกไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก มีความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงเรื่อยๆ เมื่อถูกไฮโดรไลซิสเป็นระยะเวลาสั้น ส่วนการบวมตัวของแป้งตัดแปรมีแนวโน้มลดลงเมื่อถูกไฮโดรไลซิสเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น และแป้งตัดแปรมีการละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้นในช่วงแรก และละลายได้ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 4 วัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง ตราปลามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น องค์กรประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [10]

องค์ประกอบ	ปริมาณ(ร้อยละ)
ความชื้น	ไม่เกิน13%
คาร์โบไฮเดรต	87 ± 1
อะไมโลส	17
อะไมโลเพคติน	83
ไขมัน	0.25
โปรตีน	6.50 - 7.50
เถ้า	0.23
ขนาด	$< 160 \mu\text{m}$
ความเป็นกรด-ด่าง	6.0- 7.0

3.1.2 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.3 กลีเซอรอล (Glycerol, $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3.1.4 โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate , NaNO_3) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีภัณฑ์

จำกัด

3.1.5 กรดซิตริก (Citric acid $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986

จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของกรดซิตริก [52]

ITEM	UNIT	STANDARD DATA	ACTUAL DATA
Description	-	Colourless crystal, white	As standard
Identification & Solubilty	-	Pass test	Pass test
Readily carbonisable substances	-	Pass test	Pass test
Eval uation of insoluble	-	Pass test	Pass test
Oder	-	Pass test	Pass test
Barium	%	Pass test	Pass test
Content	%	99.50 – 101.0	99.78
Water	%	7.5 – 9.0	8.61
Heavy matals (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 กรดมาลิก (Malic acid, $C_4H_6O_5$) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของกรดมาลิก [52]

ANALYSIS	SPECIFICATION	RESULTS
Appearance	White or nearly white granules	Complies
Water	NMT 0.3% m/m	0.22
Identification	To comply with std. scan	Complies
Assay as malic acid	NLT 99.0% and NMT 100.5% of $C_4H_6O_5$	99.57
Melting point	127 – 132 °C	129.0
Fumaric acid	NMT 1.0% m/m	0.88
Maleic acid	NMT 0.05% m/m	0.003
Heavy metals as Pb	NMT 5 mg/kg	< 5
Lead	NMT 2 mg/kg	< 2
Arsenic	NMT 1 mg/kg	< 1
Mercury	NMT 0.1 mg/kg	< 0.1
Water insoluble matter	NMT 0.1% m/m	0.018
Readily oxidisable substances	Passes test - 3 minutes (Min)	Complies
Chlorides	NMT 40 mg/kg	Complies
Particle size distribution	NLT 98.0% thru 850 un NMT 5% thru 150 un	99.95 0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 กรดแลคติก (Lactic acid, $(\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH})$) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของกรดแลคติก [52]

Product Name	L(+)-lactic acid, 88%
INCI Name	Lactic acid
CASRN	50-21-5, 79-33-4
Emergency Numbers	Chemtrec 800-424-9300
Appearance	Clear, water-white syrupy liquid
Odor	None
Solubility in water	Soluble
pH	<2
Specific Gravity	1.17 at 20 deg.C
Boiling Point	230 °F (40% Solution)
Flash Point	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- 3.2.2 แม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 3.2.3 ปีกเกอร์ (Beaker)
- 3.2.4 ถาดพลาสติก (Polyprpylene tray) ขนาด 19.4 x28 เซนติเมตร
- 3.2.5 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 3.2.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, MEMMERT รุ่น ULM 600/I)
- 3.2.7 เครื่องกวนและให้ความร้อน (Hotplate stirrer , IKA C-MAG HS7)
- 3.2.8 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Digital balance 4 digits)
- 3.2.9 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Digital balance 2 digits)
- 3.2.10 ตะแกรงลวด (Wire gauze)
- 3.2.11 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrum Photometer, IR) รุ่น Spectrum 200 GX spectrometer
- 3.2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่นLEO 1450 VP
- 3.2.13 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance
- 3.2.14 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing Machine) Llyod Instrument รุ่น LR 5k

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง

เทแป้งมันสำปะหลังลงบนภาตแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำออกจากตู้อบพักไว้ให้เย็น เก็บแป้งมันสำปะหลังไว้ในถุงพลาสติกปิดปากถุงให้แน่น เพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง

ตอนที่ 2 การเตรียมแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด

2.1 ชั่งน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และน้ำ ในอัตราส่วนสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 10 % กลีเซอรอล 15 % โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง

2.2 นำแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และน้ำผสมในบีกเกอร์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาทีด้วยเครื่องให้ความร้อนซึ่งมีการปั่นวนตลอดเวลา ได้ส่วนผสมที่มีอุณหภูมิ 62 ± 2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลาติไนเซชันสังเกตได้จากส่วนของน้ำแป้งมีลักษณะเหนียวและใสขึ้น

2.3 พักไว้ให้เกิดการเย็นตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องจากนั้นเติมกรดชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักแล้วคนช้า ๆ ผสมในเข้ก้นประมาณ 3 นาที

2.4 นำภาตพลาสติกวางบนเครื่องชั่งจากนั้นเทแป้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นพรีเจล ลงบนภาตพลาสติกให้มีน้ำหนัก 47 ± 0.5 กรัม

2.5 นำเครื่องวัดระดับน้ำวางในแนวระนาบบนภาตพลาสติก แล้วทำการปรับระดับให้อยู่ในแนวระนาบทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีความหนาเท่ากัน

2.6 จากนั้นนำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 ชั่วโมง หรือจนฟิล์มแป้งมันสำปะหลังแห้ง

2.7 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์

2.8 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำออกจากตู้อบพักไว้ให้เกิดการเย็นตัวแล้วจึงลอกแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกจากภาต

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดชนิดต่างๆ

ปริมาณ					
แป้ง (g)	น้ำ (g)	กลีเซอรอล (g)	กรด (% ต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง)		
			กรดซิตริก (g)	กรดแลกติก (g)	กรดมาลิก (g)
7	70	1.05	0	0	0
7	70	1.05	1	1	1
7	70	1.05	2	2	2
7	70	1.05	5	5	5
7	70	1.05	10	10	10
7	70	1.05	20	20	20

หมายเหตุ - ได้ทำการศึกษาปริมาณกรดชนิดต่างๆ 30% ต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่สามารถขึ้นรูปได้ ฟิล์มมีลักษณะไม่คงตัวจึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อ

- ได้ทำการศึกษาสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลต่ำจึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อ

- ได้ทำการศึกษาปริมาณกลีเซอรอล 10% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าพรีเจลมีลักษณะเหนียวขึ้นรูปลำบาก ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะแข็งเปราะ มีสมบัติเชิงกลต่ำจึงไม่ได้ศึกษาต่อ

- ได้ทำการศึกษาปริมาณกลีเซอรอล 20% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่สามารถขึ้นรูปได้ ฟิล์มมีลักษณะไม่คงตัวจึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อ

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Infrared Spectroscopy)

เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrum Photometer, IR) โดยฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังสูตรต่าง ๆ มาบดรวมกับ KBr แล้วนำไปอัดเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ที่ความยาวคลื่น $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$ โดยทำการสแกน 16 ครั้งต่อตัวอย่าง ความละเอียด 4 cm^{-1}

3.4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ เพื่อระบุวิฤภาคของสารตัวอย่าง โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ (ความยาวคลื่น เท่ากับ 0.154 อังสตรอม) โดยการเตรียมตัวอย่างที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $10 - 80^\circ$ ด้วยความเร็ว $1^\circ/\text{นาที}$

3.4.3 สัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มของตัวอย่าง โดยนำฟิล์มมาเคลือบด้วยทองและนำไปเข้าเครื่อง SEM ต่อไปโดยการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้กรดที่ปริมาณต่าง ๆ

3.4.4 การทดสอบการบวมตัว

1. ตัดฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 นิ้ว
2. ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดเปล่าด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และบันทึกผล
3. ชั่งน้ำหนักฟิล์มแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และบันทึกผล
4. นำไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6

ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักชั่งน้ำหนักบนแผ่นฟิล์มออกให้หมด

$$\% \text{ Swelling} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น} - \text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำก่อน} \times 100}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น}}$$

5. จากนั้นแช่น้ำกลั่นจนครบ 72 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซึมน้ำจนถึงค่าอิ่มตัวสูงสุด และนำแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมาชั่งน้ำหนัก โดยสามารถคำนวณการดูดซึมน้ำได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ การบวมตัวที่สมดุล} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น} - \text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำก่อน} \times 100}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การทดสอบดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทำการอบฟิล์มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก (ภายใต้สภาวะที่ยังไม่มีการระเหยของพลาสติกไซเซอร์เกิดขึ้น) จากนั้นนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และเก็บแผ่นฟิล์มตัวอย่างในภาชนะที่ปิดที่มีภาชนะใส่โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) ละลายในน้ำกลั่นซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ตามมาตรฐาน ASTM E 104 แล้วชั่งน้ำหนักภายหลังการดูดซับความชื้นทุกวัน โดยสามารถคำนวณการดูดซับความชื้นได้จากสมการดังนี้

$$W_a = ((W_e - W_0) / W_0) * 100$$

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น

W_e คือ น้ำหนักหลังการดูดซับความชื้น

W_0 คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับความชื้น

3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ

ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Rate of water vaportransmission, WVT) คืออัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผ่านหนึ่งของพื้นที่หรือความหนาของตัวอย่างต่อเวลา วัดจากค่าความแตกต่างของน้ำหนักภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เดียวกันมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน ทดสอบโดยใช้วิธี Desiccant method โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 691 ทำการทดสอบโดยการตัดฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเป็นวงกลมให้มีพื้นที่ประมาณ 5 ตารางเซนติเมตร ให้พอดีกับปากถ้วย ปิดผนึกลงบนถ้วยที่บรรจุซิลิกาเจล 10 กรัม ด้วยพาราฟิน และนำไปวางไว้ใน Desiccator โดยมี CaCl_2 ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 90% ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักถ้วยซิลิกาเจลทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$WVT = G/tA = (G/t)/A$$

เมื่อ G = ความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการซึมผ่านไอน้ำ (g)

t = เวลาที่น้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง (วัน)

A = พื้นที่ของปากถ้วย (ตารางเซนติเมตร)

G/t = ความชันของเส้นกราฟระหว่าง G กับ t

WVT = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{day}$)

หมายเหตุ ข้อมูลจากศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์

3.4.7 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at max load)	D882-02	MPa
มอดูลัส (Young' s Modulus)	D882-02	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงสูงสุด (% Strain at max load)	D882-02	%

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องมาตรฐาน ASTM D882-02 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 100 x 15 mm จำนวน 15 ชิ้น ในแต่ละสูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 50 mm/min

Gauge length : 50 mm.

Load cell : 100 N

ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) = F/A

มอดูลัส (Young' s Modulus) = $(F/A) / ((L-L_0)/L_0)$

% การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) = $(L-L_0)/L_0 \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังจากทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.8 สมบัติทางร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก (% Weight loss) ของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดซิดริก กรดแลกติก และกรดมาลิก ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม และนำมาเอกซารนี้เป็นเอกซารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 50 – 600 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.9 การทดสอบโดยการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5 x 10 เซนติเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% ในระยะเวลา 5 และ 10 วัน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างอาจจะกระจายไปกับดิน จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากฝังดิน

3.4.9 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์เจล (Gel fraction) [53]

1. ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดเปล่าด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และบันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง 0.1 กรัม
3. ตวงสารละลายกรดฟอร์มิก 5 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์
4. นำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังใส่ลงในบีกเกอร์แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดเทสารละลายกรดฟอร์มิกและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังลงบนตะแกรงลวดแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

$$\% \text{ เจล} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนแช่กรดฟอร์มิก}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแป้งมันสำปะหลังหลังแช่กรดฟอร์มิก}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นปรับปรุงฟิล์มแข็งมันสำปะหลังโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อด้วยกรดซิตริก (CA) กรดแลคติก (LA) และกรดมาลิก (MA) ที่ปริมาตร 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง นำฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การบวมตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน โดยอักษรย่อของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เตรียมได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	A0	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรด 0% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
2	CA1	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 1% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
3	CA2	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 2% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
4	CA5	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 5% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
5	CA10	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 10% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
6	CA20	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
7	MA1	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก 1% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
8	MA2	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก 2% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
9	MA5	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก 2% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง
10	MA10	ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก 2% โดยน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) อักษรย่อของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
11	MA20	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก 2% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง
12	LA1	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก 1% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง
13	LA2	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก 2% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง
14	LA5	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก 5% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง
15	LA10	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก 10% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง
16	LA20	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก 20% โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

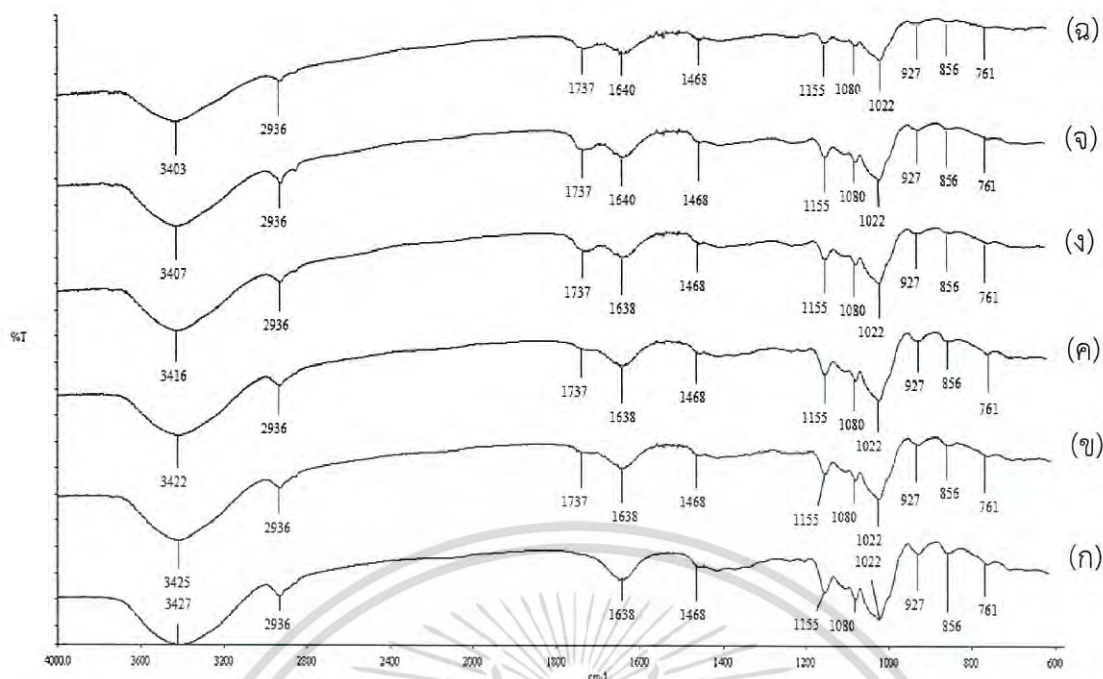
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับจากฟิล์มที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิกที่ปริมาณต่างกัน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิกในปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏเหมือนกันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200-3600 (V)	O-H stretching
2800-3000 (m \rightarrow s)	Alkanes C-H stretching
1735-1750 (s)	Ester C=O stretching
1600-1630 (s)	Bounded 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
735-770 (s)	C-H out-of-plane bending

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



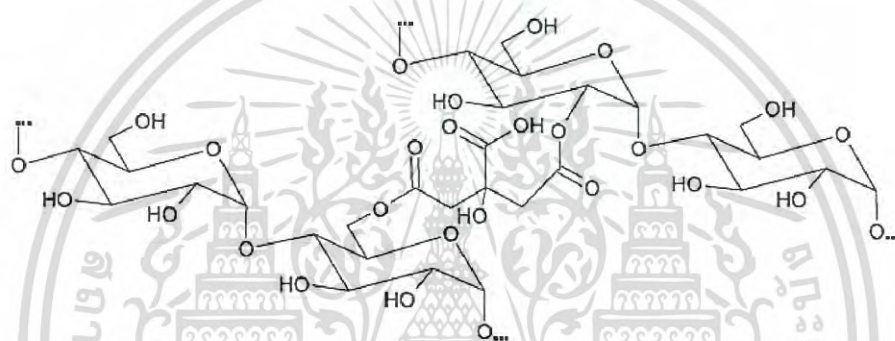
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิติริกปริมาณต่าง ๆ (ก) A0 (ข) CA1 (ค) CA2 (ง) CA5 (จ) CA10 และ (ฉ) CA20

จากรูปที่ 4.1 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากฟิล์มทุกตัวอย่างมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างของแข็งตามลักษณะดังนี้ สเปกตรัมในช่วง $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแข็งและกลีเซอรอล พีคในช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของแข็ง สำหรับพีคที่ 1641 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแข็ง พีคในช่วง $1445-1485\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของแข็ง พีคช่วง $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแข็ง พีคช่วง $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแข็ง [54] พีคช่วง $800-927\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending และพีคที่ 761 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH_2 -rocking [55-56]

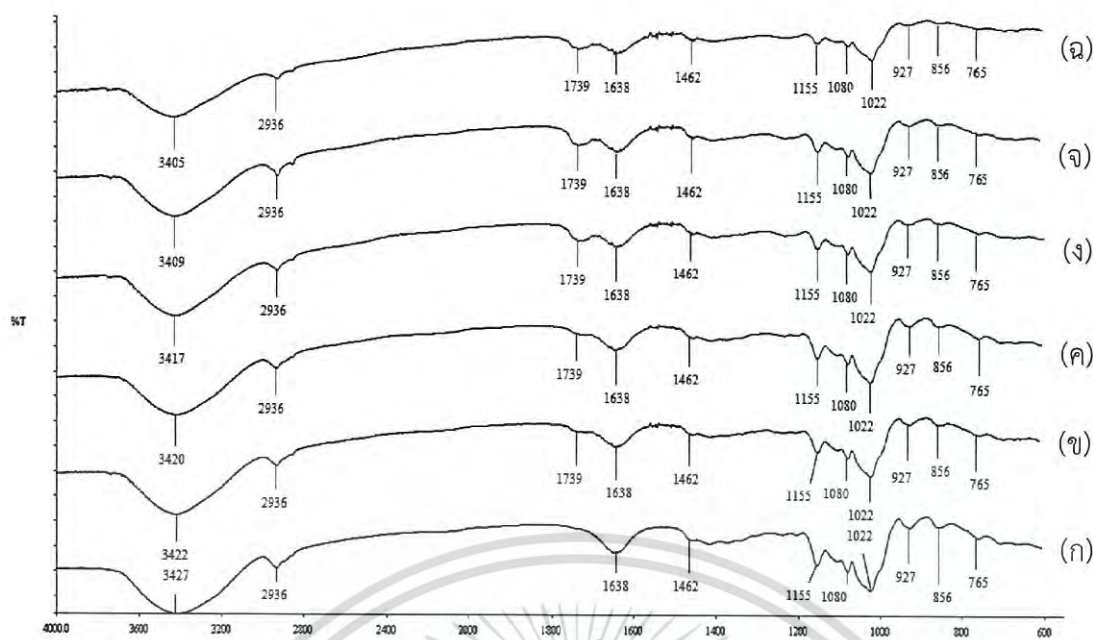
สำหรับความแตกต่างของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิติริกที่ปริมาณต่างกัน พบว่ามีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ 1737 cm^{-1} ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าการเติมกรดลงในแข็งน้ำมันสำปะหลังทำให้เกิดการเชื่อมโยงหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างโมเลกุลแข็งและโมเลกุลกรด [54] และยืนยันจากผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เจลของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิติริก (ภาคผนวก ข) พบว่าฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดซิติริกมีเปอร์เซ็นต์เจลเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิติริกพบว่าทำให้เปอร์เซ็นต์เจลของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิติริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การเติมกรดซिटริกทำให้พีคที่ตำแหน่ง $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังและกรดซिटริกเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Pawlak and M. Mucha [57] โดยรายงานวิจัยได้กล่าวไว้ว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FTIR โดยเมื่อองค์ประกอบมีความเข้ากันได้จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่าง (พันธะไฮโดรเจน) องค์ประกอบที่ 1 และ องค์ประกอบที่ 2 โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยว ๆ ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดซिटริก แสดงดัง รูปที่ 4.2 และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างกรดกับโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง

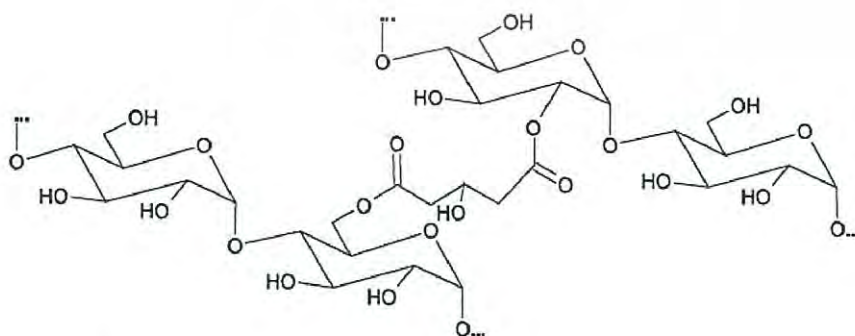


รูปที่ 4.2 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดซิทริก [50]



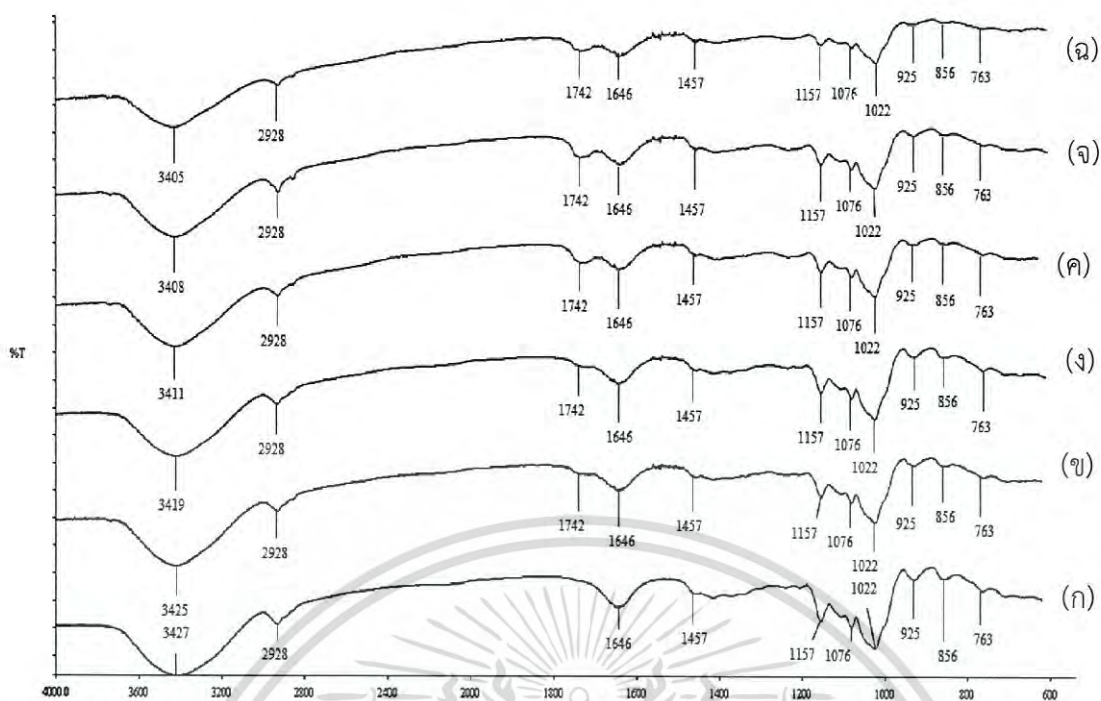
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) A0 (ข) MA1 (ค) MA2 (ง) MA5 (จ) MA10 และ (ฉ) MA20

จากรูปที่ 4.3 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของแป้งและกลีเซอรอล นอกจากนี้ผลของการเติมกรดมาลิกลงในฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลัง พบว่าพีค $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching มีการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดมาลิก ทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ [58] และมีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ 1739 cm^{-1} ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าการเติมกรดลงในแป้งมันสำปะหลังทำให้เกิดการเชื่อมโยงหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างโมเลกุลแป้งและโมเลกุลกรด [54] ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดมาลิก แสดงดังรูปที่ 4.4 และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างกรดกับโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง



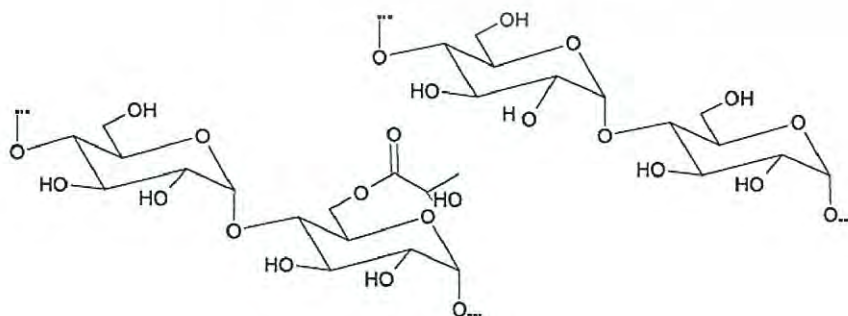
รูปที่ 4.4 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกรดมาลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแล็กติกที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) A0 (ข) LA1 (ค) LA2 (ง) LA5 (จ) LA10 และ (ฉ) LA20

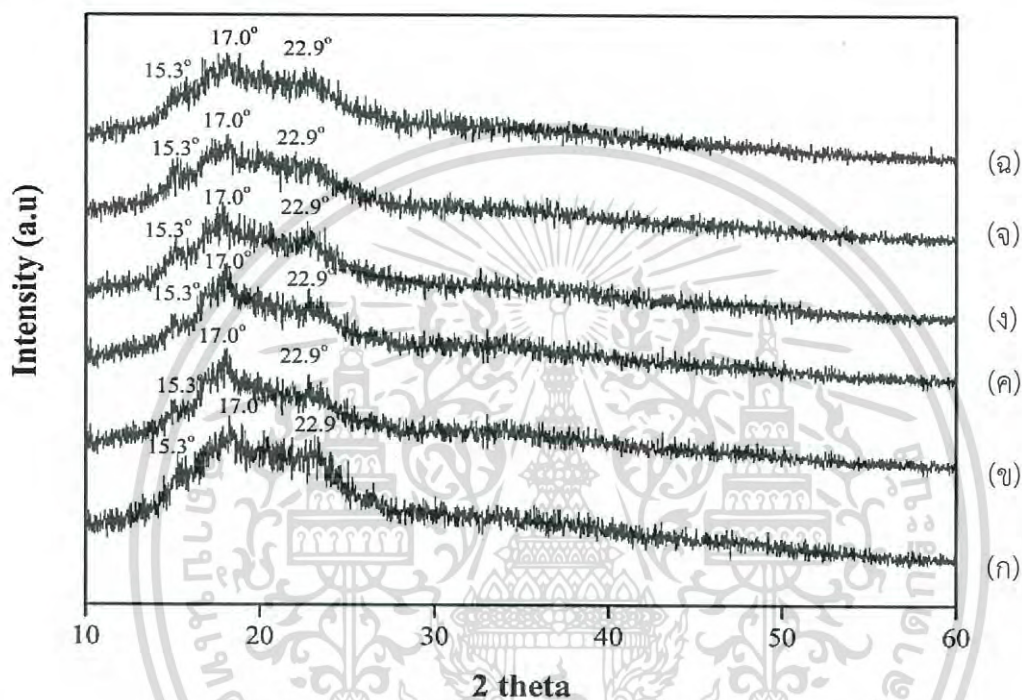
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากรูปที่ 4.5 (ก) - (ฉ) พบว่ามีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ 1742 cm^{-1} ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าการเติมกรดลงในน้ำมันสำปะหลังทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลิกของโมเลกุลกรด [54] และพบว่าเมื่อเติมกรดลงในฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังทำให้พีคที่ตำแหน่ง O-H stretching ที่ตำแหน่ง $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ เคลื่อนที่ไปตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลัง พีคที่ 1646 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ O-H stretching ที่อยู่บนโมเลกุลแป้งมีความเข้มลดลง [57] ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งน้ำมันสำปะหลังและกรดมาลิก แสดงดังรูปที่ 4.6 และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างกรดกับโมเลกุลแป้งน้ำมันสำปะหลัง



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.6 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งน้ำมันสำปะหลังและกรดแล็กติก โดยขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

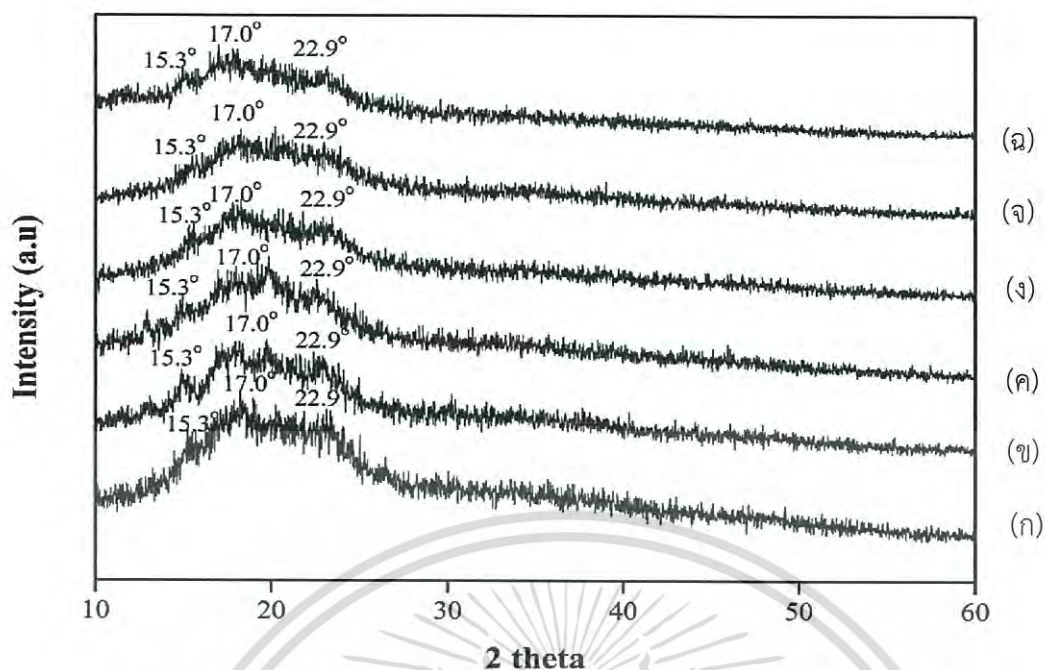
4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและปริมาณของผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างกัน โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $10 - 80^\circ$ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $1^\circ\text{C}/\text{นาที}$

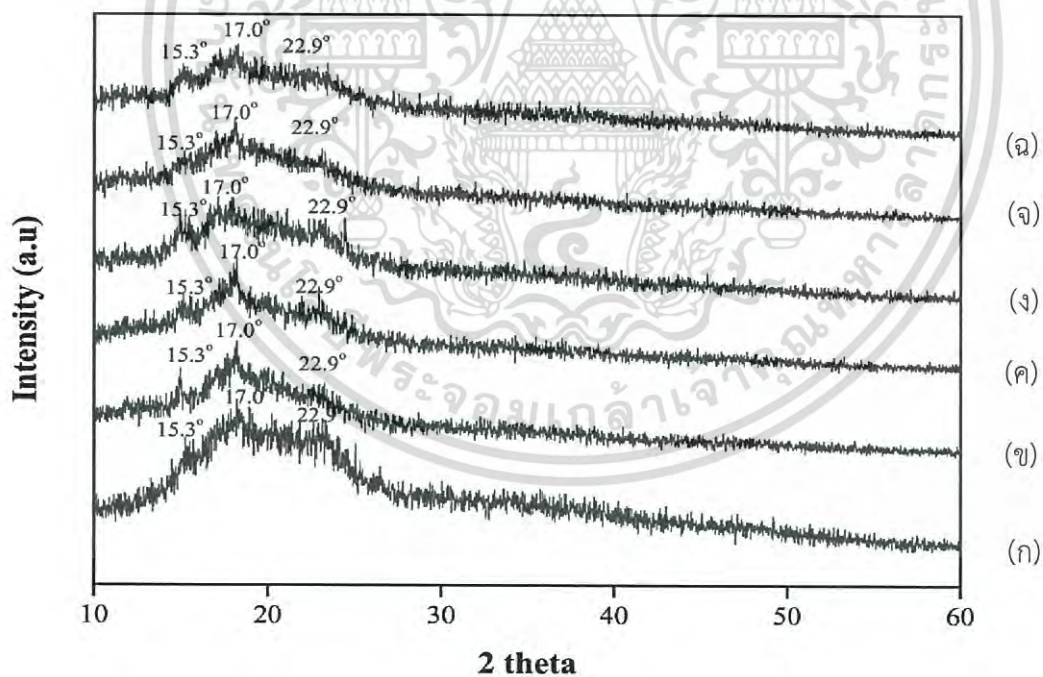


รูปที่ 4.7 ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก (ก) A0 (ข) CA1 (ค) CA2 (ง) CA5 (จ) CA10 และ (ฉ) CA20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก (ก) A0 (ข) MA1 (ค) MA2 (ง) MA5 (จ) MA10 และ (ฉ) MA20



รูปที่ 4.9 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก (ก) A0 (ข) LA1 (ค) LA2 (ง) LA5 (จ) LA10 และ (ฉ) LA20

จากรูปที่ 4.7 - 4.9 แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก พบว่าดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้มีรูปแบบของดิฟแฟรกโตแกรมการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกันทั้งหมด โดยพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 15.3° 17.0° และ 22.9° [53, 58] เช่นเดียวกัน นั้นเกิดจากการนำแป้งมาเติมพลาสติกไซเซอร์และผ่านกระบวนการเจลาตินในเซชันด้วยความร้อนและน้ำ ทำให้ผลึกของแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากพืชหัว มีโครงสร้างแบบ B-type ซึ่งเป็นผลึกแบบ Hexagonal ($a=b=1.85$ nm, $c=1.04$ nm) ถูกทำลายเกิดโครงสร้างใหม่ที่มีความเป็นผลึกลดลง [54] และพบว่าการเติมกรดทั้งสามชนิดเข้าไปในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังนั้นทำให้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์เคชันเกิดสายโซ่กิ่งขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึก และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีขนาดสั้นลงทำให้มีความเป็นผลึกลดลง และเมื่อเติมปริมาณกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มกรดทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลิกเกิดพันธะเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลโมเลกุลของแป้งเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณสายโซ่กิ่งเพิ่มขึ้นและอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีขนาดสั้นลงเพิ่มมากขึ้นทำให้มีความเป็นผลึกลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกในปริมาณต่างๆ

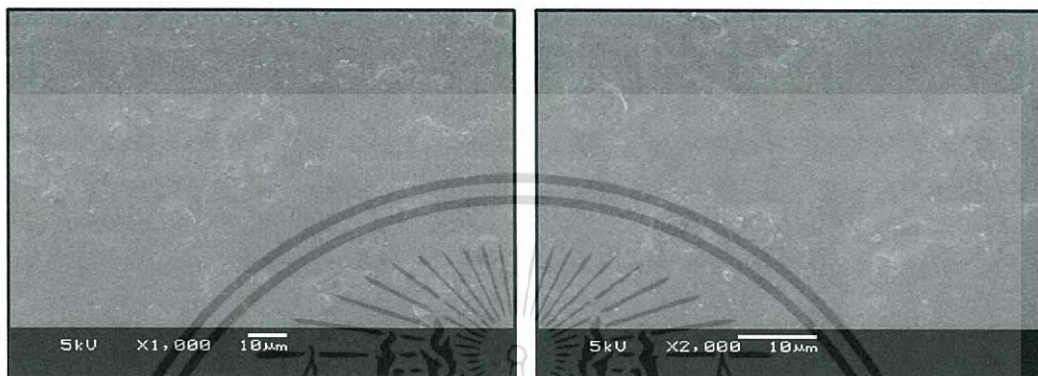
ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
A0	52.32
CA1	48.96
CA2	47.78
CA5	46.65
CA10	45.62
CA20	44.36
MA1	48.20
MA2	46.79
MA5	46.12
MA10	43.62
MA20	40.07
LA1	45.01
LA2	41.56
LA5	41.38
LA10	40.89
LA20	36.99

จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเติมปริมาณกรดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากการเติมกรดเข้าไปในแป้งนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแป้งกับกรดเพิ่มขึ้น ทำให้มีสายโซ่กิ่งเพิ่มขึ้นขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของโมเลกุลแป้ง และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีขนาดสั้นลงทำให้มีความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. L. D. Roz และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาผลมวลโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยกรดแอสคอร์บิกและกรดซิตริก พบว่าเมื่อเติมกรดแต่ละชนิดในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดและความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้นลง เมื่อพิจารณาถึงกรดแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน พบว่าการเติมกรดซิตริกทำให้มีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และการเติมกรดแล็กติกทำให้ชิ้นงานมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิกมากที่สุดมีความเป็นกรดมาก จึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้มาก ทำให้ได้โครงสร้างที่มีระเบียบเป็นสายโซ่ตรงได้มากขึ้น [48,59] จึงมีโอกาสเกิดผลึกได้มากกว่ากรดมาลิกหรือกรดแล็กติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกในปริมาณต่างกัน ทำได้โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 1000 และ 2000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง



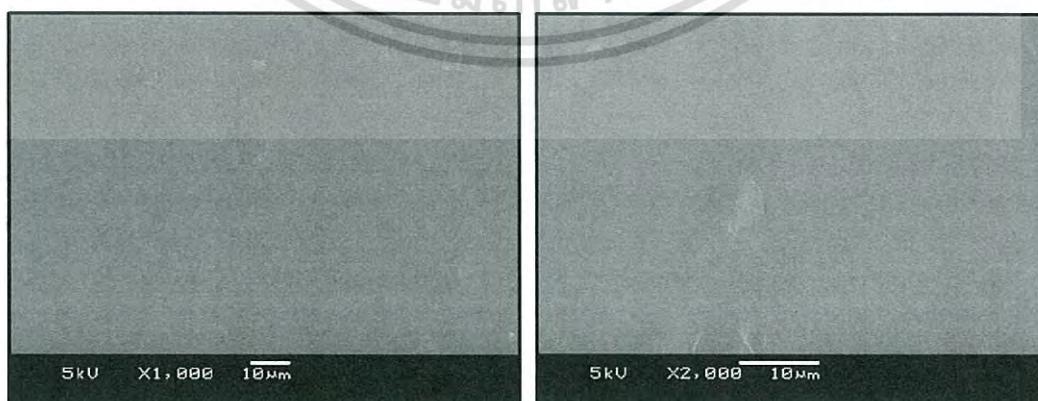
(ก) A0, 1000X

(ข) A0, 2000X



(ค) CA1, 1000X

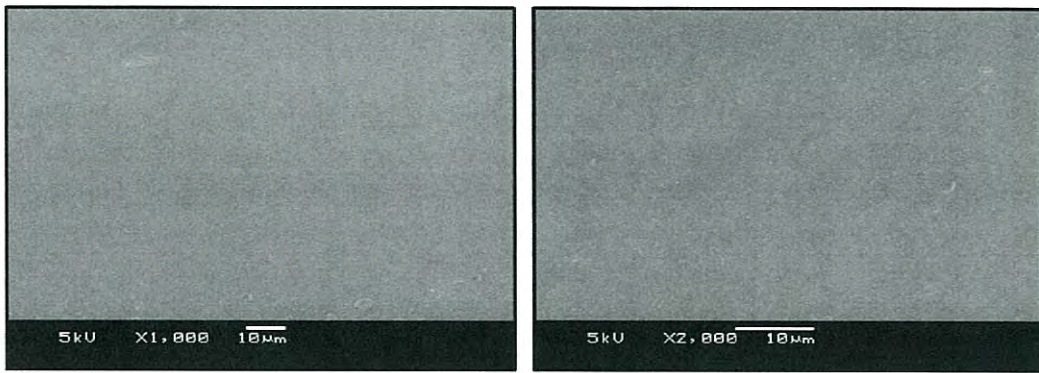
(ง) CA1, 2000X



(จ) CA2, 1000X

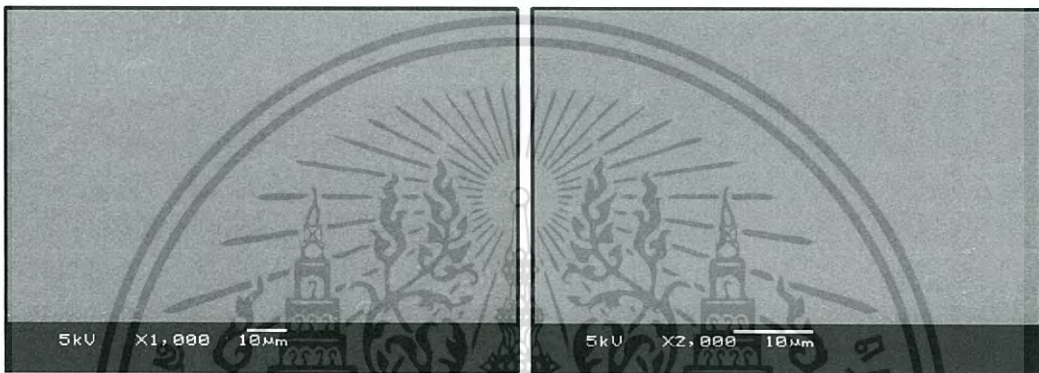
(ฉ) CA2, 2000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) CA5, 1000X

(ฅ) CA5, 2000X



(ฉ) CA10, 1000X

(ค) CA10, 2000X

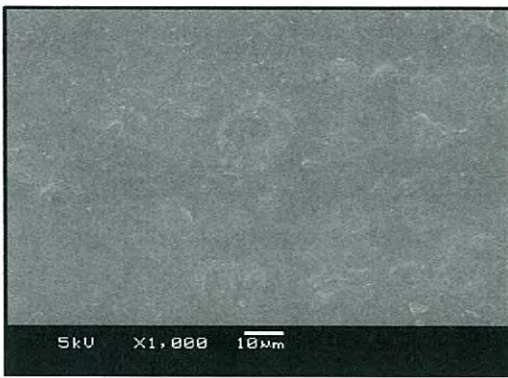


(ง) CA20, 1000X

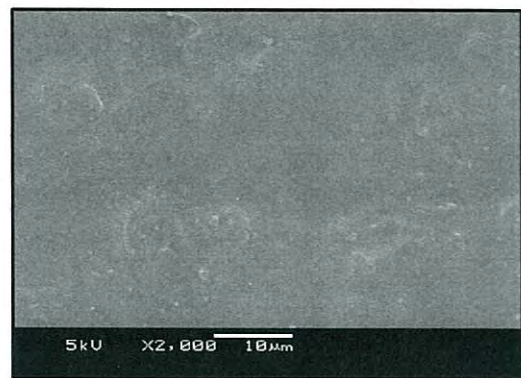
(จ) CA20, 2000X

รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า (ก)-(ข) 0% (ค)-(ง) 1% (จ)-(ฉ) 2% (ช)-(ซ) 5% (ณ)-(ญ) 10% และ(ฎ)-(ฏ) 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



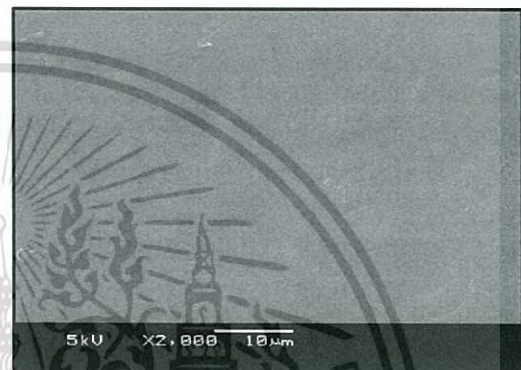
(ก) A0, 1000X



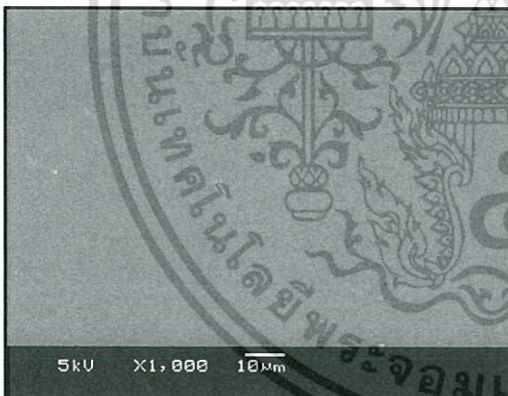
(ข) A2, 2000X



(ค) MA1, 1000X



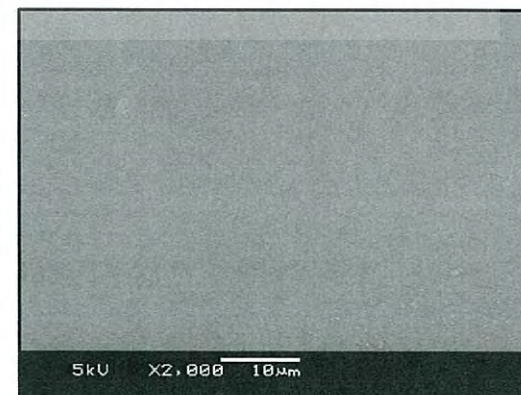
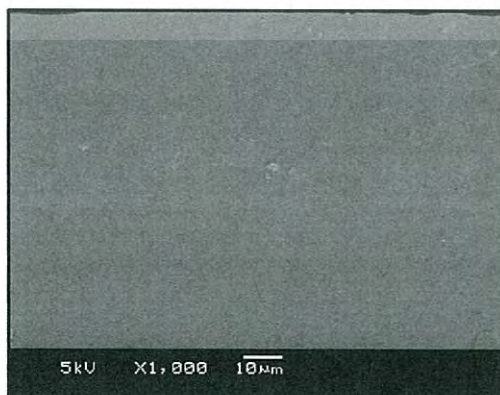
(ง) MA1, 2000X



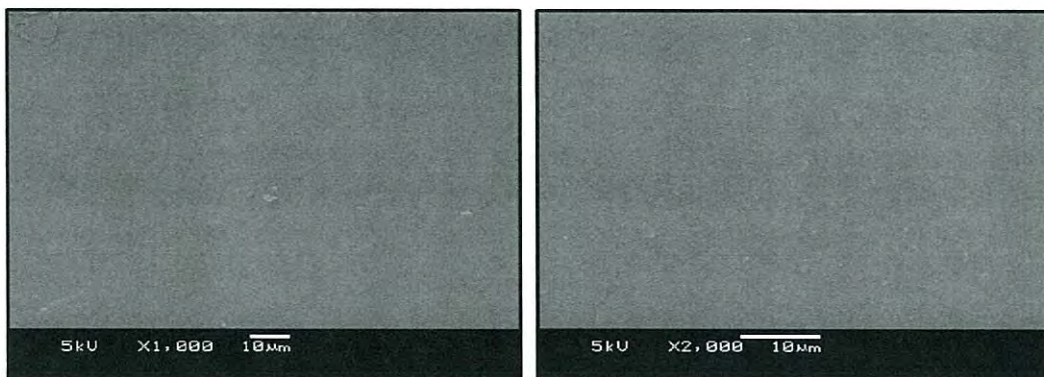
(จ) MA2, 1000X



(ฉ) MA2, 2000X

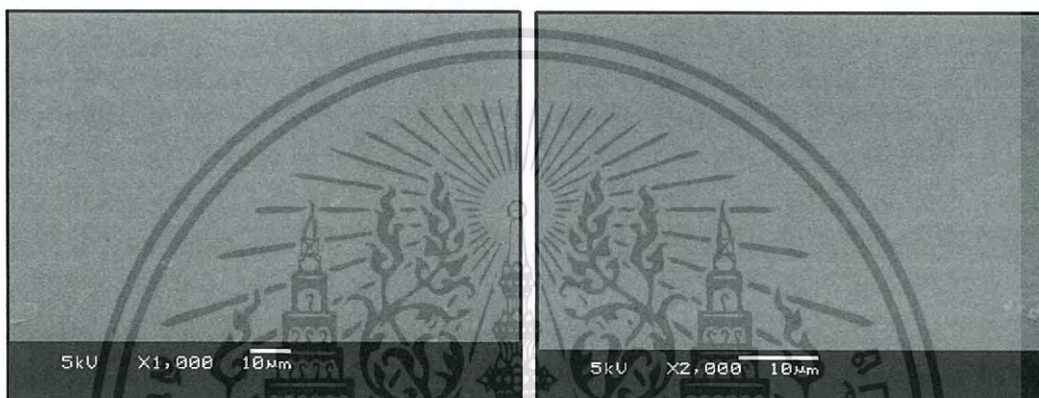


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง (ช) MA5, 1000X งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ (ซ) MA5, 2000X อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) MA10, 1000X

(ญ) MA10, 2000X

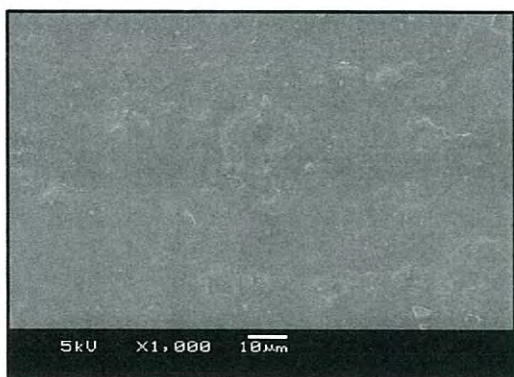


(ฉ) MA20, 1000X

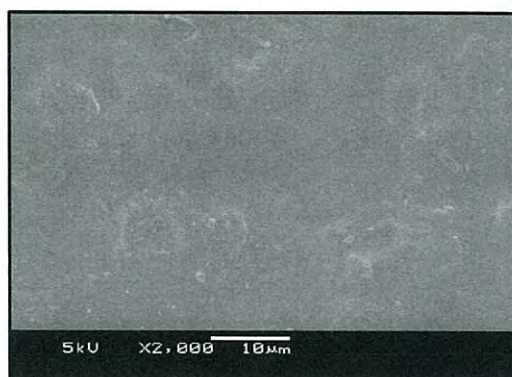
(ญ) MA20, 2000X

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า (ก)-(ข) 0% (ค)-(ง) 1% (จ)-(ฉ) 2% (ช)-(ซ) 5% (ฅ)-(ญ) 10% และ(ฎ)-(ฏ) 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



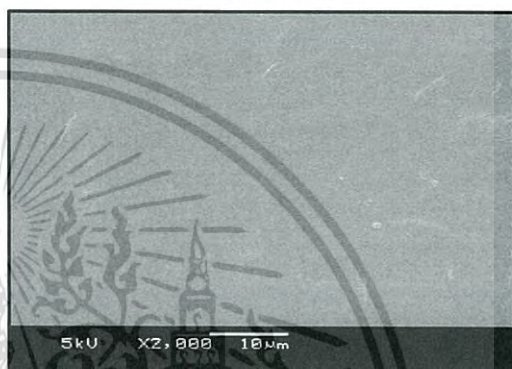
(ก) A0, 1000X



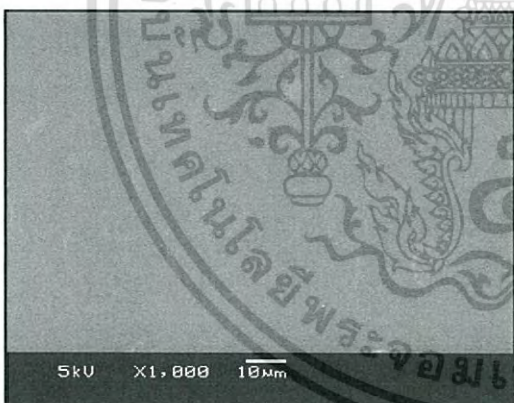
(ข) A0, 2000X



(ค) LA1, 1000X



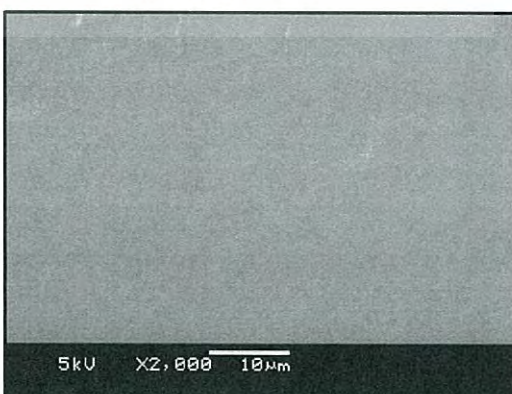
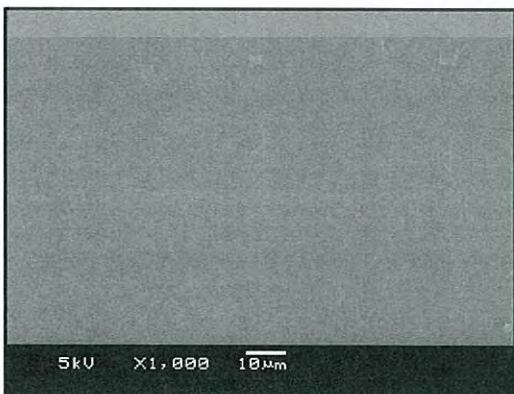
(ง) LA1, 2000X



(จ) LA2, 1000X



(ฉ) LA2, 2000X



เอกสารนี้เป็นเอกสาร(ข) LA5, 1000X ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่(ข) LA5, 2000X ัประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ) LA10, 1000X



(ญ) LA10, 2000X



(ฎ) LA20, 1000X



(ฏ) LA20, 2000X

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแล็กติกที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า (ก)-(ข) 0% (ค)-(ง) 1% (จ)-(ฉ) 2% (ช)-(ซ) 5% (ฌ)-(ญ) 10% และ(ฎ)-(ฏ) 20%

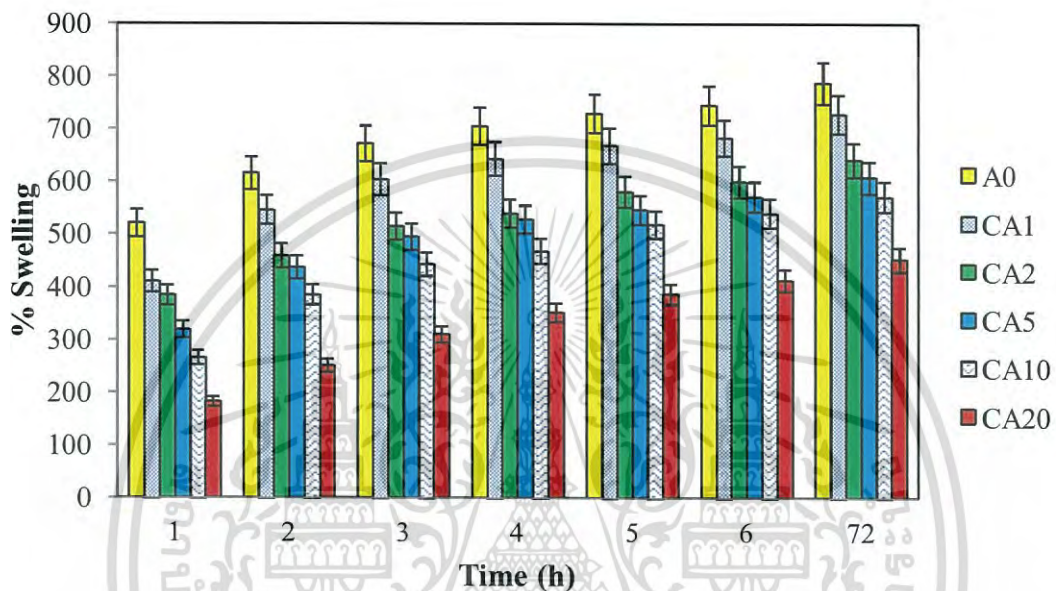
จากรูปที่ 4.10 - 4.12 แสดงลักษณะภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 1000 และ 2000 เท่า เปรียบเทียบฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกในปริมาณต่าง ๆ พบว่าลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เติมกรดมีลักษณะขรุขระของเม็ดแข็งมันสำปะหลัง เนื่องจากขั้นตอนในการขึ้นรูปฟิล์มใช้อุณหภูมิต่ำทำให้เม็ดแข็งมันสำปะหลังบางส่วนหลอมไม่สมบูรณ์ ทำให้ภาพแสดงลักษณะภาคตัดขวางมีลักษณะขรุขระของเม็ดแข็ง และมีบริเวณเรียบเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งในสภาพที่มีน้ำเพียงพอเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้ง ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปภายในเม็ดแป้งเกิดการพองตัวโครงสร้างภายในเม็ดแป้งบางส่วนแตกออก [10] แต่ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติก มีการรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกันวิภาคของเม็ดแป้งลดลง เมื่อเติมกรดลงในฟิล์มแข็งมันสำปะหลังพบว่าฟิล์มมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เนื่องจากกรดเข้าไปย่อยพันธะแอลฟาดี-1-6 กลูโคซิดิกของอะไมโลเพกตินในบริเวณส่วนอสัณฐานก่อนแล้วเข้าไปย่อยพันธะแอลฟาดี-1-4 กลูโคซิดิกของอะไมโลสต่อ ทำให้อะไมโลสแตกเป็นโมเลกุลสั้นน้ำสามารถแทรกเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

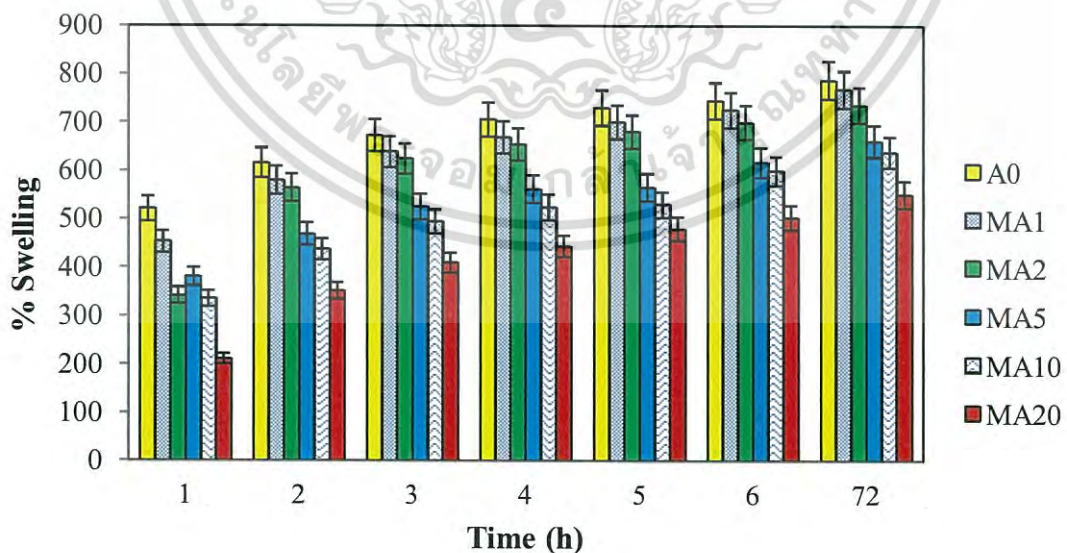
ภายในเม็ดแป้งบางส่วนแตกออกได้เพิ่มขึ้น [21] และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดที่ ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด รองลงมา คือ 10, 5, 2, 1 และ 0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อปริมาณกรดที่เติมเข้าไปนั้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเรียบเป็น เนื้อเดียวกันมากขึ้น และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีลักษณะเป็นเนื้อ เดียวกันมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ ทำให้มีความ เป็นกรดเพิ่มขึ้นจึงสามารถย่อยพันธะโมเลกุลของแป้งได้มาก ส่งผลให้น้ำสามารถเข้าไปภายในเม็ด แป้งและเกิดการแตกออกของเม็ดแป้งเพิ่มมากที่สุด รองมาเป็นกรดมาลิกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่ ส่วนกรดแลคติกมีหมู่คาร์บอกซิลิกเพียง 1 หมู่ ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. S.Garciaa และคณะ [60] ที่ศึกษาฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กับพอลิเอสเทอร์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริก ฟิล์มมีลักษณะ เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกโดยแป้งมีโครงสร้าง ทางเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลและกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกมีหมู่ฟังก์ชันคาร์ บอก- ซิลิกซึ่งแสดงความมีขั้ว ทำให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FT-IR รูปที่ 4.1, 4.3 และ 4.5 โดยพีคที่ตำแหน่ง 3404 cm^{-1} แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ แป้งกับหมู่คาร์บอกซิลิกของกรด ส่งผลให้แป้งและกรดมีความสามารถเข้ากันได้ดี

4.4 การทดสอบการบวมตัว

การทดสอบการบวมตัวเป็นการศึกษาความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยง โดยนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกในปริมาณต่าง ๆ โดยการทดสอบนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้มาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

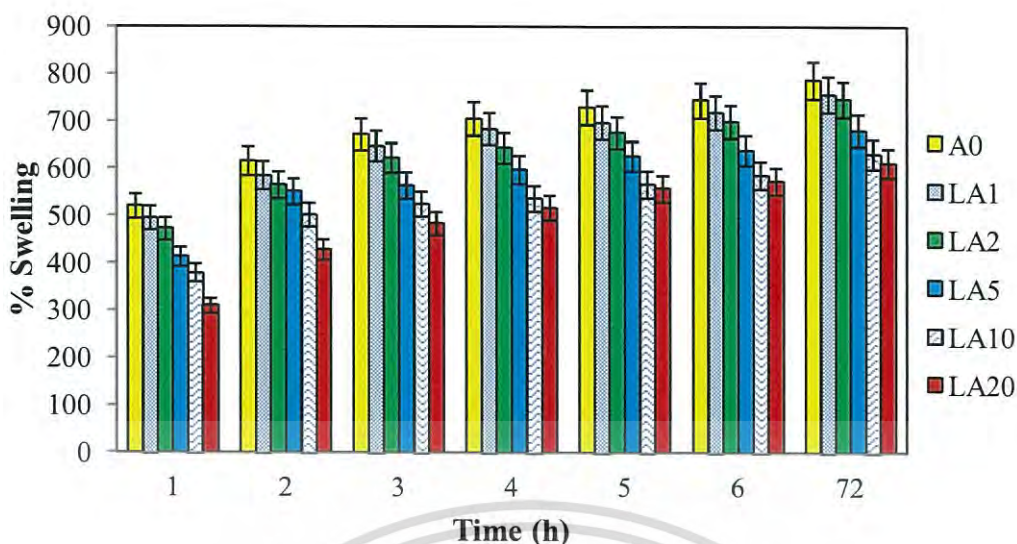


รูปที่ 4.13 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก (ก) A0 (ข) CA1 (ค) CA2 (ง) CA5 (จ) CA10 และ(ฉ) CA20



รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก (ก) A0 (ข) MA1 (ค) MA2 (ง) MA5 (จ) MA10 และ(ฉ) MA20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



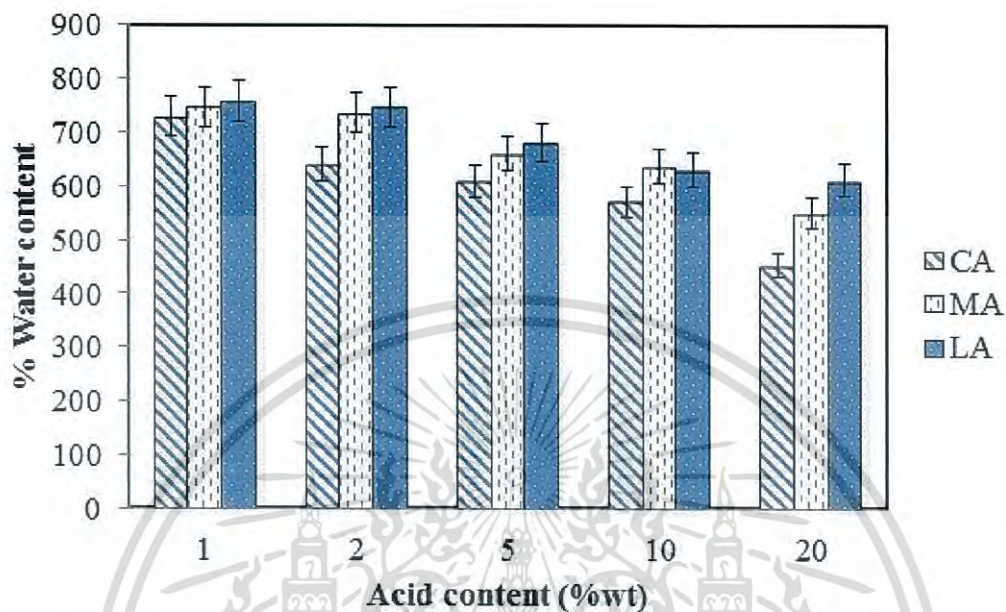
รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติก (ก) A0 (ข) LA1 (ค) LA2 (ง) LA5 (จ) LA10 และ(ฉ) LA20

จากรูปที่ 4.13 - 4.15 แสดงเปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ พบว่าเปอร์เซนต์การบวมตัวมีผลความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรกหลังจากนั้นเปอร์เซนต์การบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลง และพบว่าเมื่อปริมาณกรดที่ใส่เข้าไปนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแต่ละชนิดมีค่าลดลง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของกรดเกิดเป็นหมู่เอสเทอร์ทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง [61] ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FT-IR รูปที่ 4.1 โดยพีคที่ตำแหน่ง 3404 cm^{-1} แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลงทำให้มีสมบัติชอบน้ำลดลง และเปลี่ยนจากโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างตาข่าย เมื่อเพิ่มปริมาณกรดส่งผลให้มีจำนวนพันธะเชื่อมโยงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [5] ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ให้น้ำเข้ามาภายในโครงสร้างได้ยาก จึงมีค่าเปอร์เซนต์การบวมตัวน้อย และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดมีเปอร์เซนต์การบวมตัวมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำจึงสามารถกักเก็บความน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี [62]

นอกจากนี้ยังเป็นผลจากสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.10 - 4.12) ที่พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก เมื่อปริมาณกรดที่ใส่เข้าไปเพิ่มมากขึ้นทำให้โมเลกุลแป้งมีขนาดโมเลกุลสั้นลงสามารถละลายในน้ำร้อนได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียนเนื้อเดียวกันมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. S.Garciaa และคณะ [60] ที่ศึกษาฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอสเทอร์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริกเพิ่มขึ้นฟิล์มมีลักษณะเป็น Homogeneous มากขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อเข้าสู่ตลาดให้นำไปใช้โดยไม่แจ้งชื่อผู้แต่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดซิตริก และผลจากโครงสร้างทางเคมีของแป้งที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลและกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกซึ่งแสดงความมีขี้้ว ทำให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ดีส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น



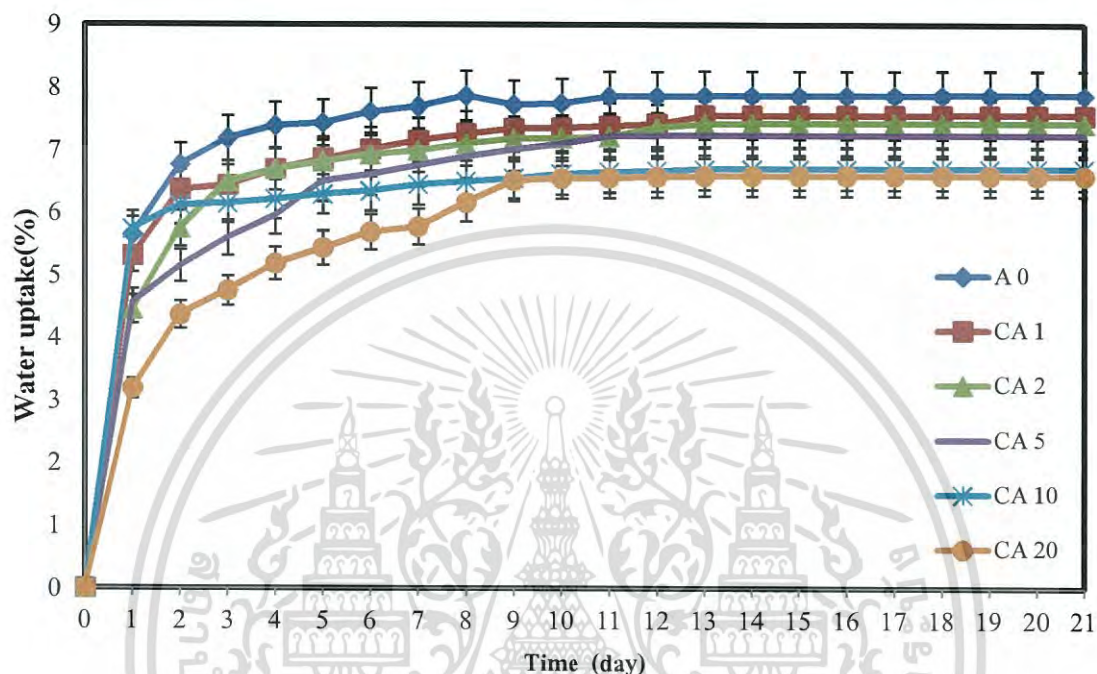
รูปที่ 4.16 เปรอเซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกที่มีปริมาณ 1, 2, 5 10 และ 20% โดยน้ำหนัก แช่น้ำเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง

รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ พบว่าฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวมากที่สุด รองลงมา คือ เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีค่าน้อยที่สุด เนื่องมาจากโครงสร้างกรดแลคติกมีหมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างเพียง 1 หมู่ ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพียง 1 ตำแหน่ง ส่งผลมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงกับโมเลกุลของแป้งน้อย น้ำจึงสามารถแพร่เข้าไปภายในชิ้นงานได้มากที่สุด ส่วนโครงสร้างของกรดมาลิกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่ จึงทำให้สามารถแพร่เข้าไปภายในชิ้นงานได้มากรองลงมา ส่วนโครงสร้างของกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากที่สุด ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น และทำให้หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแป้งลดลง จึงทำให้มีสมบัติในการชอบน้ำลดลงด้วย และยืนยันจากผลการทดสอบจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.3) ที่ปริมาณกรดที่เติมเข้าไปเท่ากันพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิกและแลคติก จึงทำให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวน้ำน้อยที่สุด

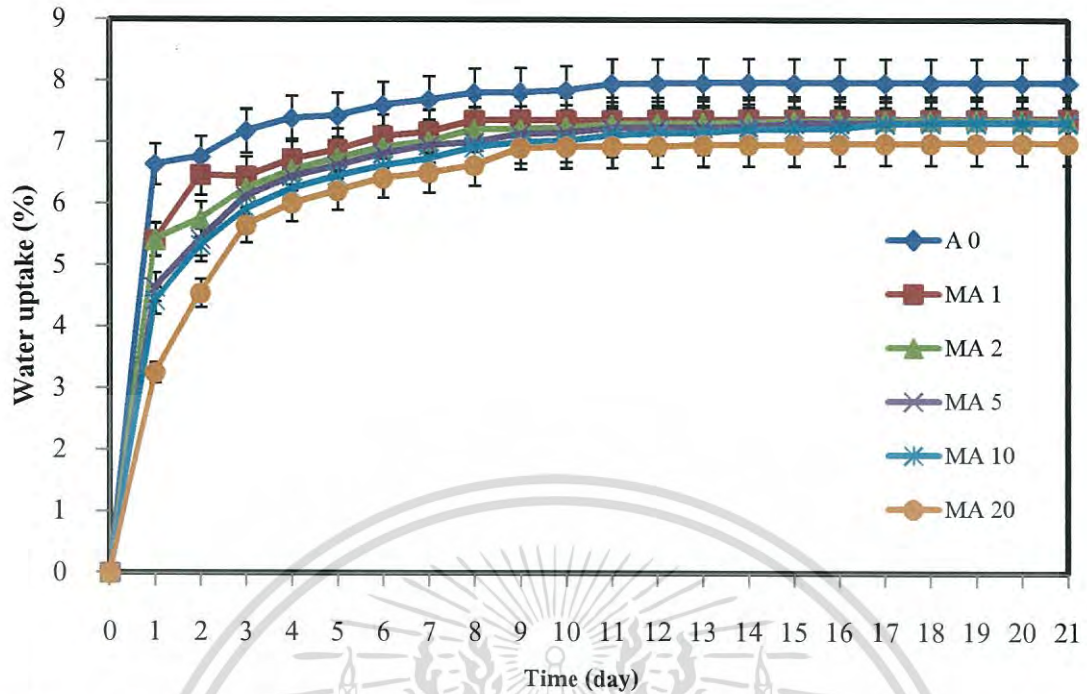
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้น

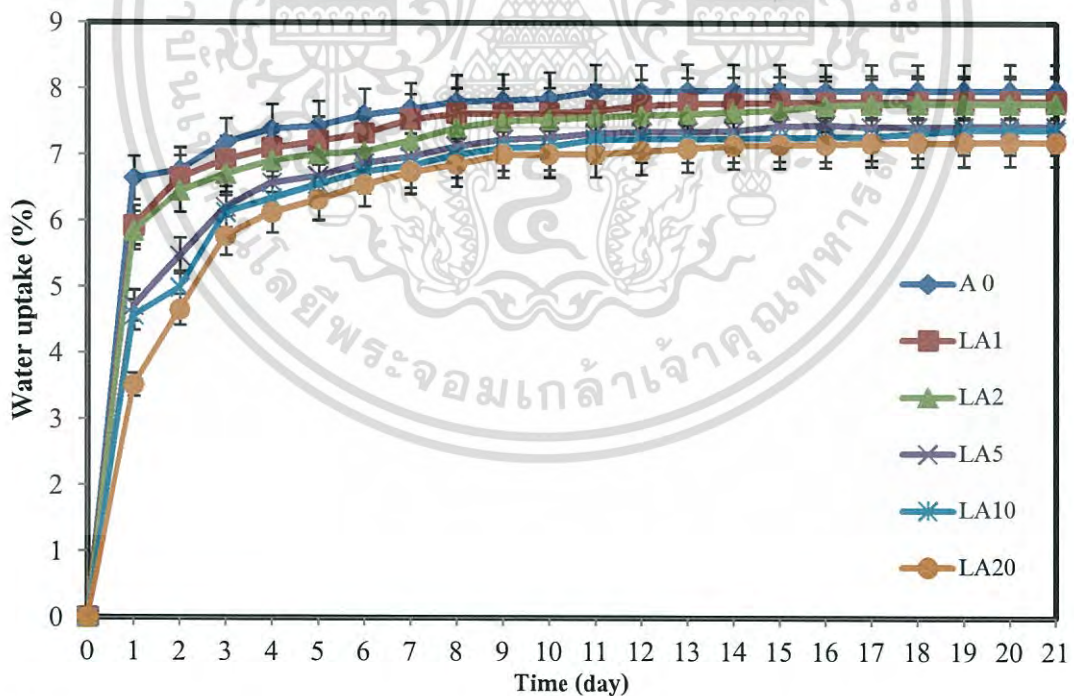
การทดสอบการปริมาณการดูดซับความชื้นโดยนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างกัน มาทำการทดสอบโดยการวางในบรรยากาศที่อัมตัวของสารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.17 เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก (ก) A0 (ข) CA1 (ค) CA2 (ง) CA5 (จ) CA10 และ(ฉ) CA20



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิก (ก) A0 (ข) MA1 (ค) MA2 (ง) MA5 (จ) MA10 และ(ฉ) MA20

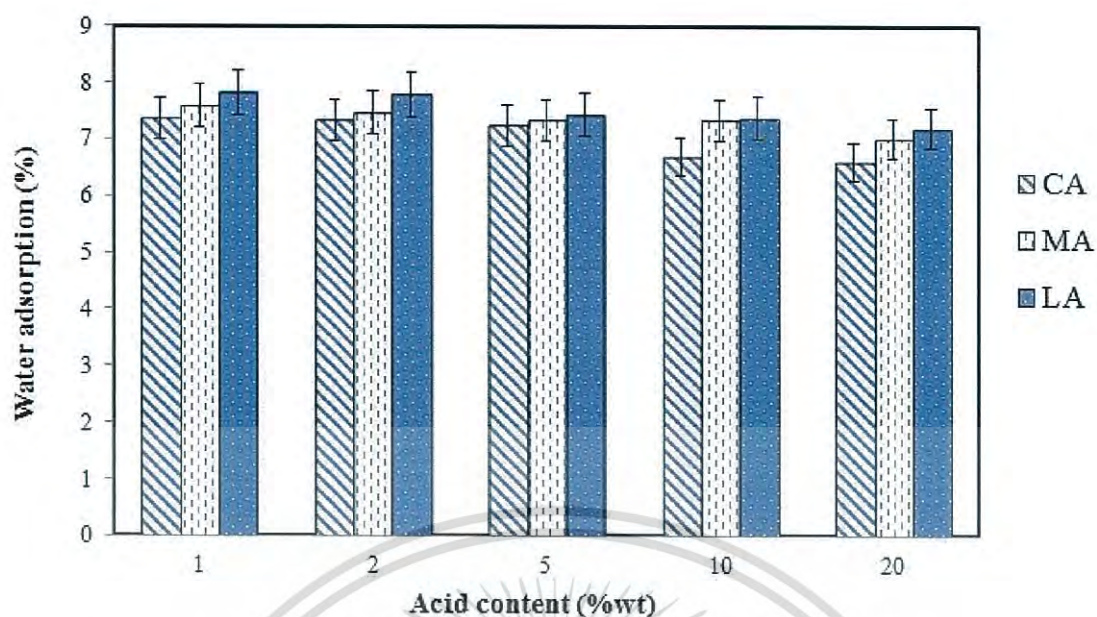


รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติก (ก) A0 (ข) LA1 (ค) LA2 (ง) LA5 (จ) LA10 และ(ฉ) LA20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 - 4.19 แสดงผลการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างกัน พบว่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 4 วันแรกหลังจากนั้นปริมาณการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งงานมีความอึดตัวไม่สามารถดูดซับความชื้นเพิ่มเข้าไปได้อีก เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นและสามารถกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างได้ดี [62]

เมื่อพิจารณาถึงการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลงโดยมีการดูดซับความชื้นต่ำสุด คือ 20% โดยน้ำหนัก เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของกรดเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันหรือเชื่อมโยง ทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง [61] และเปลี่ยนจากโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างตาข่าย เมื่อเพิ่มปริมาณกรดส่งผลให้มีจำนวนพันธะเชื่อมโยงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [5] ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ให้น้ำเข้ามาภายในโครงสร้างได้ยาก จึงมีการดูดซับความชื้นลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ E. Olsson และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับความชื้น และสมบัติการซึมผ่านของน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิตริก ทำให้การดูดซับความชื้นและการซึมผ่านของน้ำลดลงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ K. Kaewtatip และ J. Thongmee [61] ที่ได้ศึกษาผลการเชื่อมโยงของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยแป้งคลอสลิงค์ชนิดพอสเฟต (PD10374) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณแป้งคลอสลิงค์ชนิดพอสเฟตเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากอิทธิพลของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.10 - 4.12) ที่แสดงฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดปริมาณ 20 % โดยน้ำหนักพบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคน้อยที่สุด จึงทำให้สามารถดูดซับความชื้นไว้ในชิ้นงานได้น้อยที่สุด รองลงมาเป็น 10, 5, 2, 1 และ 0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลคติกในปริมาณ 1, 2, 5 10 และ 20% โดยน้ำหนัก วันที่ 21 ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลทดลองเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลคติกในปริมาณต่างๆ วันที่ 21 ในการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีค่าการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลคติก ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างของกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ มีบริเวณเกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งได้มากกว่ากรดมาลิกและแลคติกที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 และ 1 หมู่ ทำให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากที่สุด ส่งผลให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในชั้นงานได้น้อย และในการเชื่อมโยงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลโมเลกุลของแป้งลดลงจึงทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง ซึ่งยืนยันได้จากผลพีคที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง (FT-IR รูปที่ 4.1, 4.3 และ 4.5)

นอกจากนี้ยังเป็นผลจากปริมาณผลึกที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.3) ที่พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิกและแลคติก จึงทำให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกสามารถดูดซับน้ำไว้ในชั้นงานได้น้อยที่สุด ส่วนกรดมาลิกรองลงมา ส่วนฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกมีผลึกน้อยที่สุดทำให้ดูดซับความชื้นไว้ในชั้นงานมากที่สุด

4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ

จากผลการทดสอบโดยวิธีดูดความชื้น (Desiccant method) ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก ในปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม/ตร.ม./วัน)
A0	1,892
CA10	1,584
CA20	1,486
MA10	1,768
MA20	1,669
LA10	1,874
LA20	1,821

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก ในปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกรดในการเชื่อมโยงโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง [61] และทำให้โครงสร้างตาข่ายมีจำนวนพันธะเชื่อมโยงมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของไอน้ำซึมผ่านเข้ามาภายในโครงสร้างได้ยาก จึงมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง ซึ่งยืนยันได้จากผลพีคที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง (FT-IR รูปที่ 4.1, 4.3 และ 4.5) และผลทดลองหัวข้อ 4.3 พบว่าฟิล์มมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวมากขึ้นเมื่อปริมาณกรดที่เติมเข้าไปเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักมีค่าการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่า 10% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหรือเชื่อมโยง ทำให้ความเป็น Hydrophilicity ลดลง [61] และเปลี่ยนจากโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างตาข่าย เมื่อเพิ่มปริมาณกรดส่งผลให้มีจำนวนพันธะเชื่อมโยงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [5] และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. S.Garciaa และคณะ [60] ที่ได้ศึกษาฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอส-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริกเพิ่มขึ้นมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

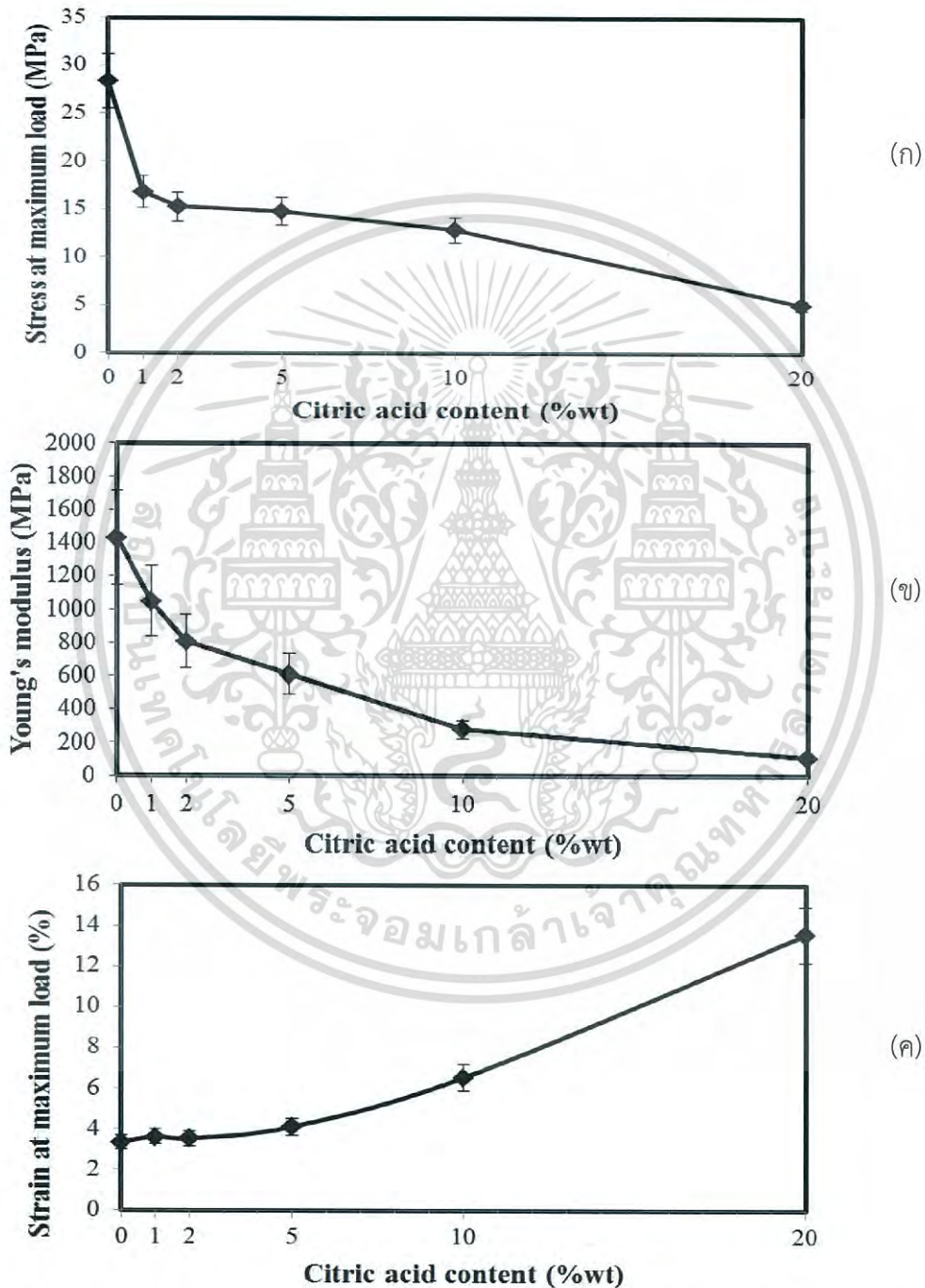
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีการอัตราการซึมผ่านไอน้ำน้อยที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลคติก ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิกมากที่สุด มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งหรือเกิดการเชื่อมโยงได้มาก ทำให้มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากที่สุด ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัว (รูปที่ 4.16) และการดูดซับความชื้น (รูปที่ 4.20) ที่พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีการบวมตัวและการดูดซับน้ำน้อยที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกมีการบวมตัวและการดูดซับความชื้นมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

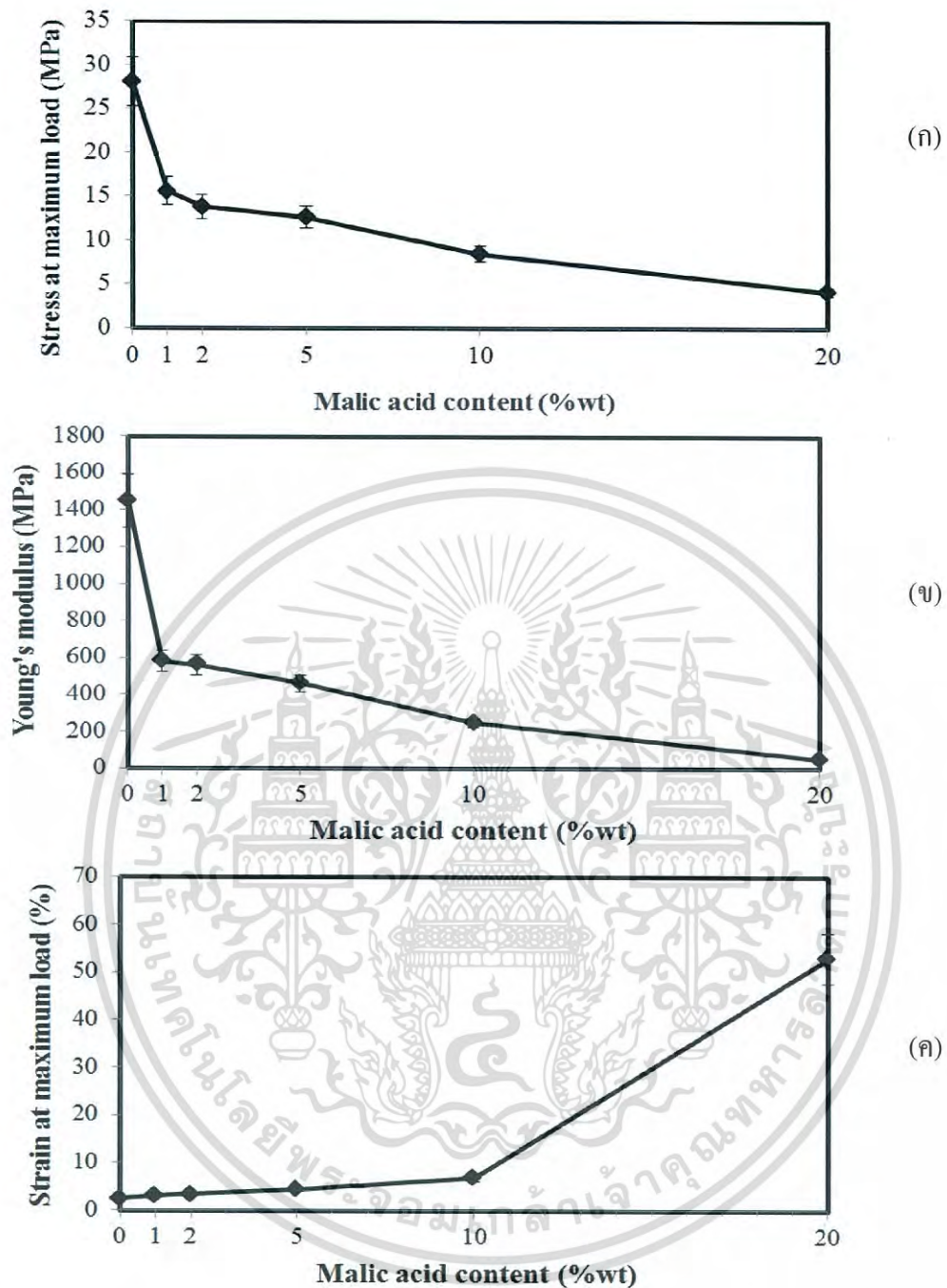
4.7 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และมอดุลัส โดยพิจารณาจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิกและกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้



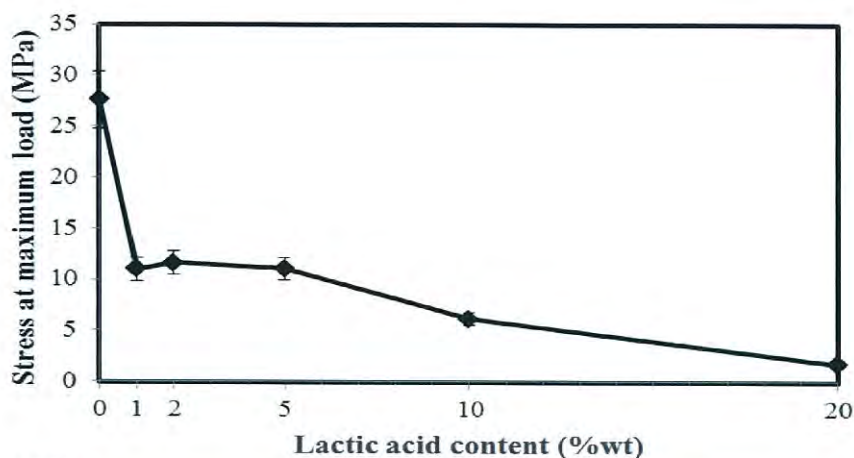
รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยซิตริกในปริมาณต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

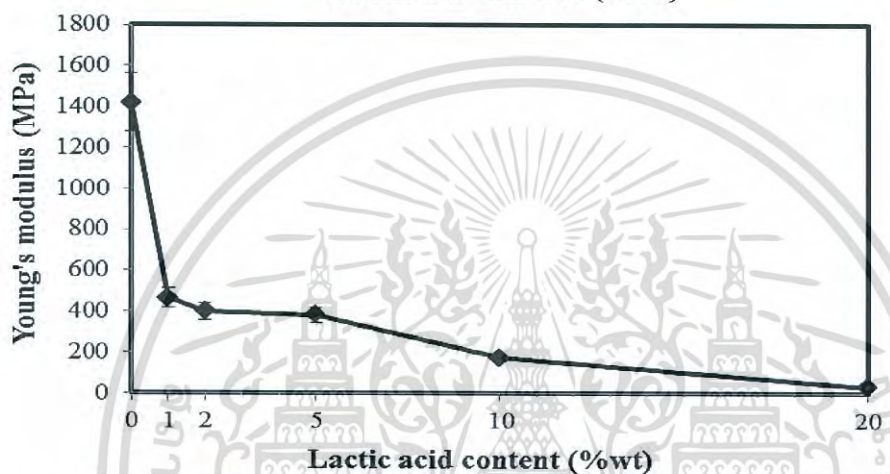


รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกในปริมาณต่างๆ
(ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด

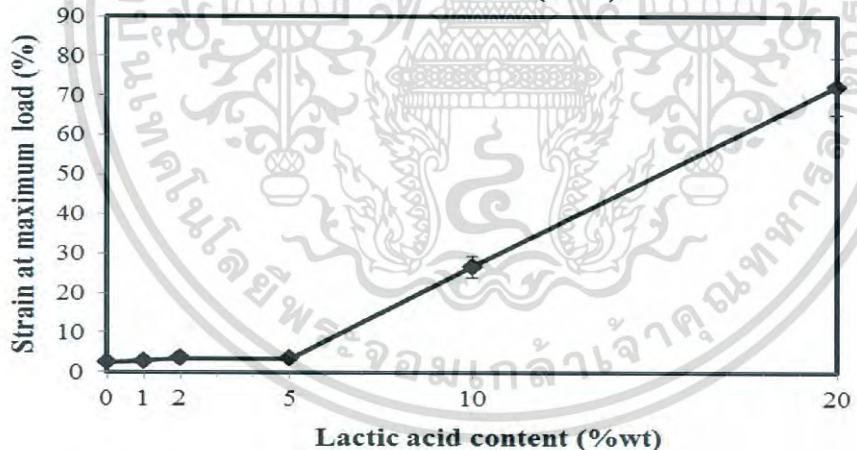
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



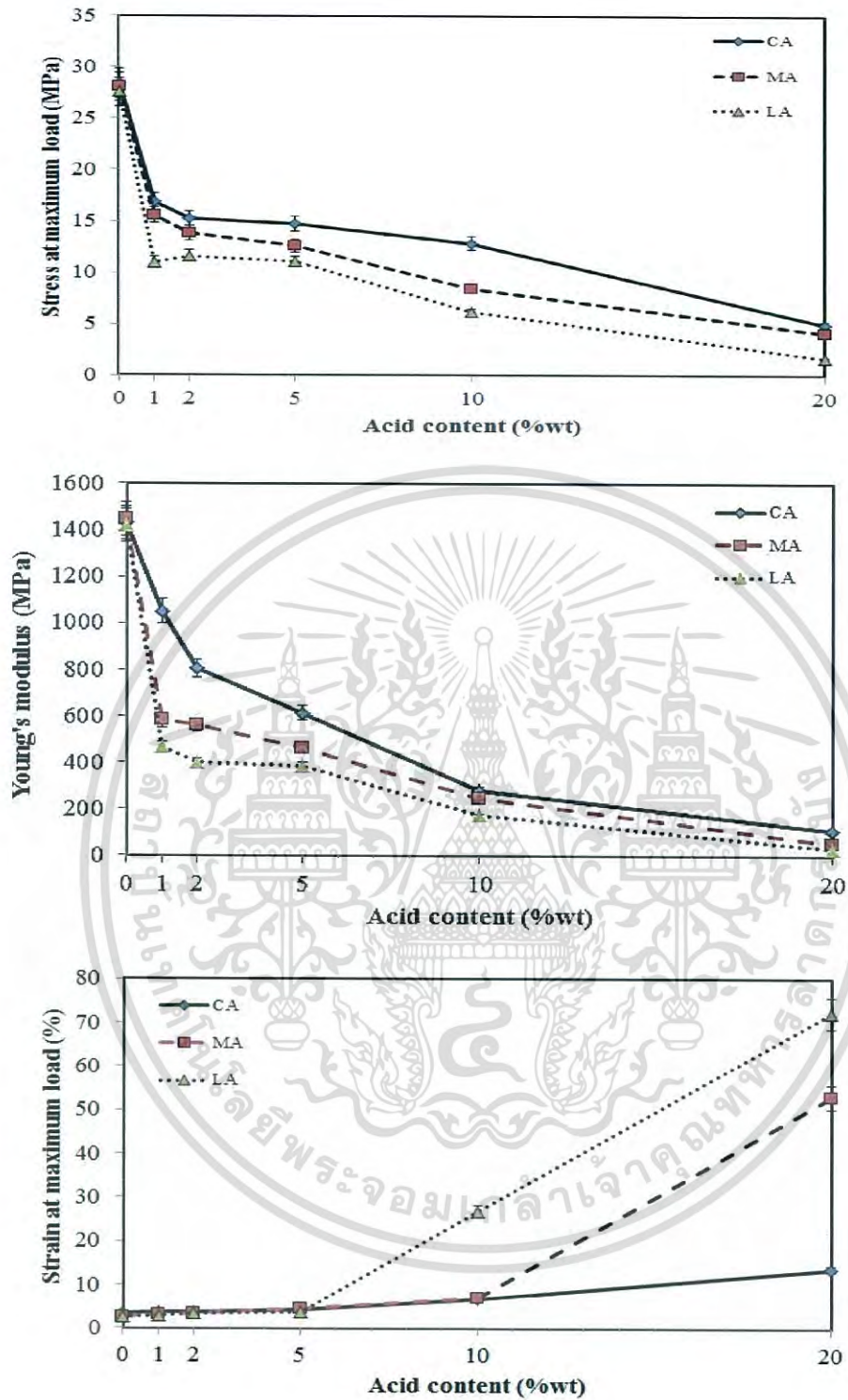
(ค)

รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแล็กติกในปริมาณต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัส และ (ค) เฟอร์เซนต์การดึงยืด

จากรูปที่ 4.21-4.23 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติก จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดมีความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมากกว่าฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรด เนื่องจากแป้งมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูง ในทางตรงข้ามทำให้เฟอร์เซนต์การดึงยืดน้อยที่สุด เมื่อปริมาณกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.21-4.23 (ก)) และ มอดุลัส (รูปที่ 4.21-4.23 (ข)) ของฟิล์มแป้งไม่วาร์ณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดซิตริกเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับหมู่ไฮดรอกซิลของแบ่ง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแบ่งและโมเลกุลของกรด เปลี่ยนจากโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างตาข่าย เมื่อเพิ่มปริมาณกรดส่งผลให้มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น [5] ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของแบ่งเคลื่อนที่ได้ยาก ทำให้ความสามารถในการสั่นเพื่อกระจายแรงที่ได้รับกระจายไปได้น้อยจึงทำให้มีความสามารถในการรับแรงแล้วส่งผ่านแรงได้ไม่ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Reddy and Y. Yang [53] ที่ศึกษาฟิล์มแบ่งข้าวโพดเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเทหล่อ พบว่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดซิตริกเพิ่มขึ้น [61] ซึ่งมีผลสอดคล้องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าเมื่อปริมาณกรดที่เติมลงในฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกลดลงจึงมีความสามารถรับแรงดึงลดลง

รูปที่ 4.21-4.23 (ค) แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกรด เนื่องจากความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง (หัวข้อ 4.2) และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแบ่งกับกรดทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแบ่งกับโมเลกุลของกรด ส่งผลให้มีความสามารถยืดออกและสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มแบ่งมันปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A. L. D. Roz และคณะ [48] ที่ได้ศึกษาผลของมวลโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิไซเซอร์ที่ปรับปรุงด้วยกรดแอสคอร์บิกและกรดซิตริก พบว่าเมื่อเติมกรดแต่ละชนิด ปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ให้มวลโมเลกุล ความหนืด และอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง ส่งผลให้สามารถดึงยืดและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิไซเซอร์ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรด และเป็นผลของกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาติไซเซอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงสามารถแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแบ่งได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่เตรียมมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและมีความเปราะน้อยลง



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก

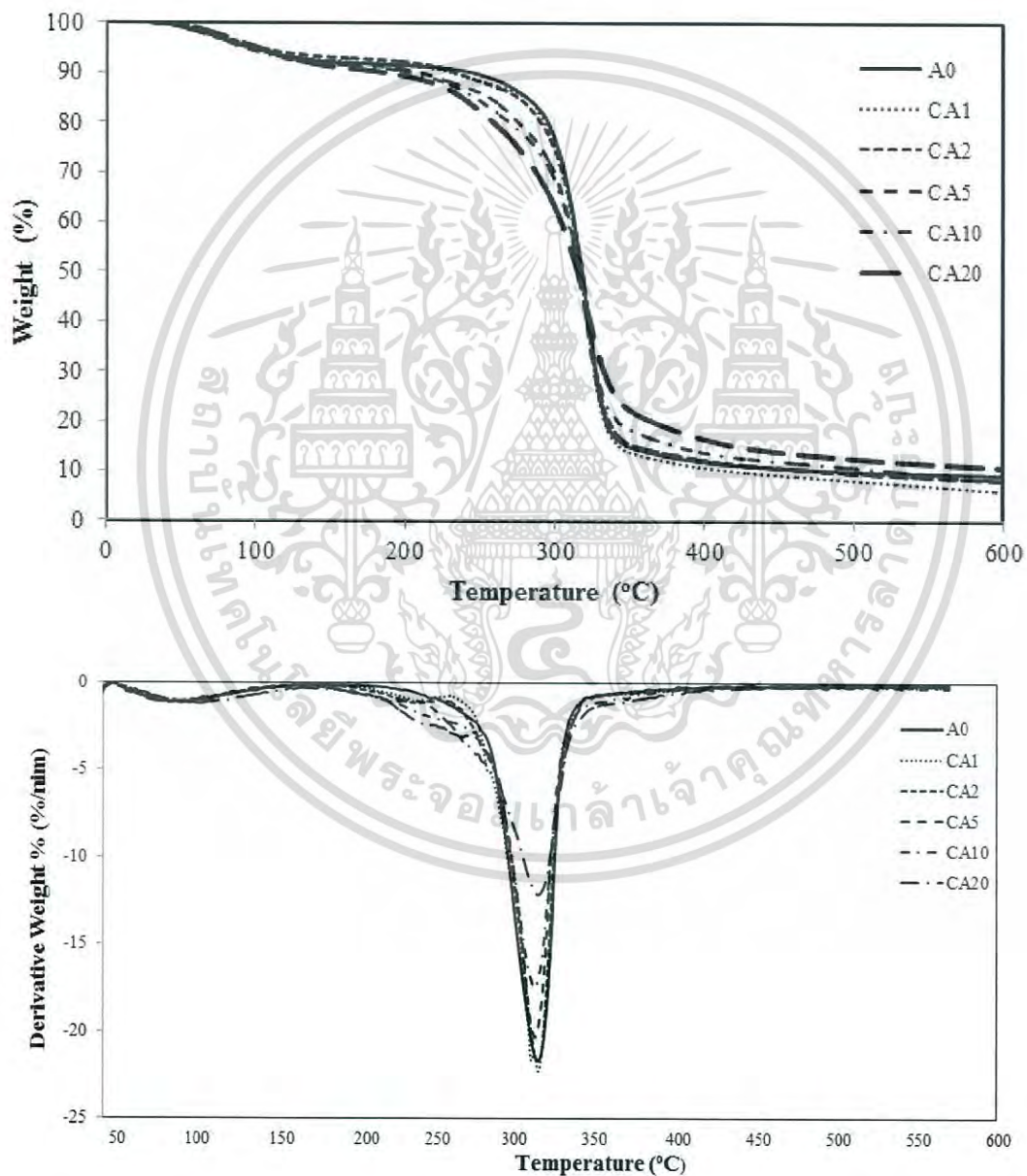
จากรูปที่ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลคติก ในปริมาณต่างๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก มีความแข็งแรงดี และมีอู่ลัสมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิกและกรดแลคติก ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมโยงแต่ละชนิด เมื่อเชื่อมโยงทำให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่างกัน ซึ่งยืนยันได้จากผลการบวมตัวพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก มีการบวมตัวน้อยที่สุดแสดงว่ามีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากที่สุด(หัวข้อ 4.4) รองมา คือ กรดมาลิก และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีการบวมตัวมากที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ยาก ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกจึงมีความแข็งแรงมากที่สุด รองมา คือ กรดมาลิกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่ มีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงได้ 2 ตำแหน่ง จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ส่วนโครงสร้างของกรดแลกติกมีหมู่คาร์บอกซิลิกเพียง 1 หมู่ มีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงน้อยที่สุด จึงมีผลทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อย จึงมีค่าความแข็งแรงดิ่ง และมอดูลัสน้อยที่สุด เมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นสายโซ่กิ่ง (Branches) ซึ่งโครงสร้างแบบกิ่งจะขัดขวางการจัดเรียงชิดกันของสายโซ่โมเลกุลของแป้งส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดผลึกลดลง (หัวข้อ 4.2)

ในทางตรงกันข้ามสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิกและกรดซิตริก ตามลำดับ เนื่องมาจากฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงน้อย ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายจึงมีความสามารถในการดึงยืดสูง รองลงมา คือ กรดมาลิกและกรดซิตริกที่มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากที่สุด ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบการบวมตัว (รูปที่ 4.13)พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีการบวมตัวมากที่สุด รองมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริกการบวมตัวน้อยที่สุด และยืนยันจากผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.3) พบว่าการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีความเป็นผลึกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรดมาลิกและกรดแลกติก จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และระยะดึงยืดน้อยที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลกติกมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด

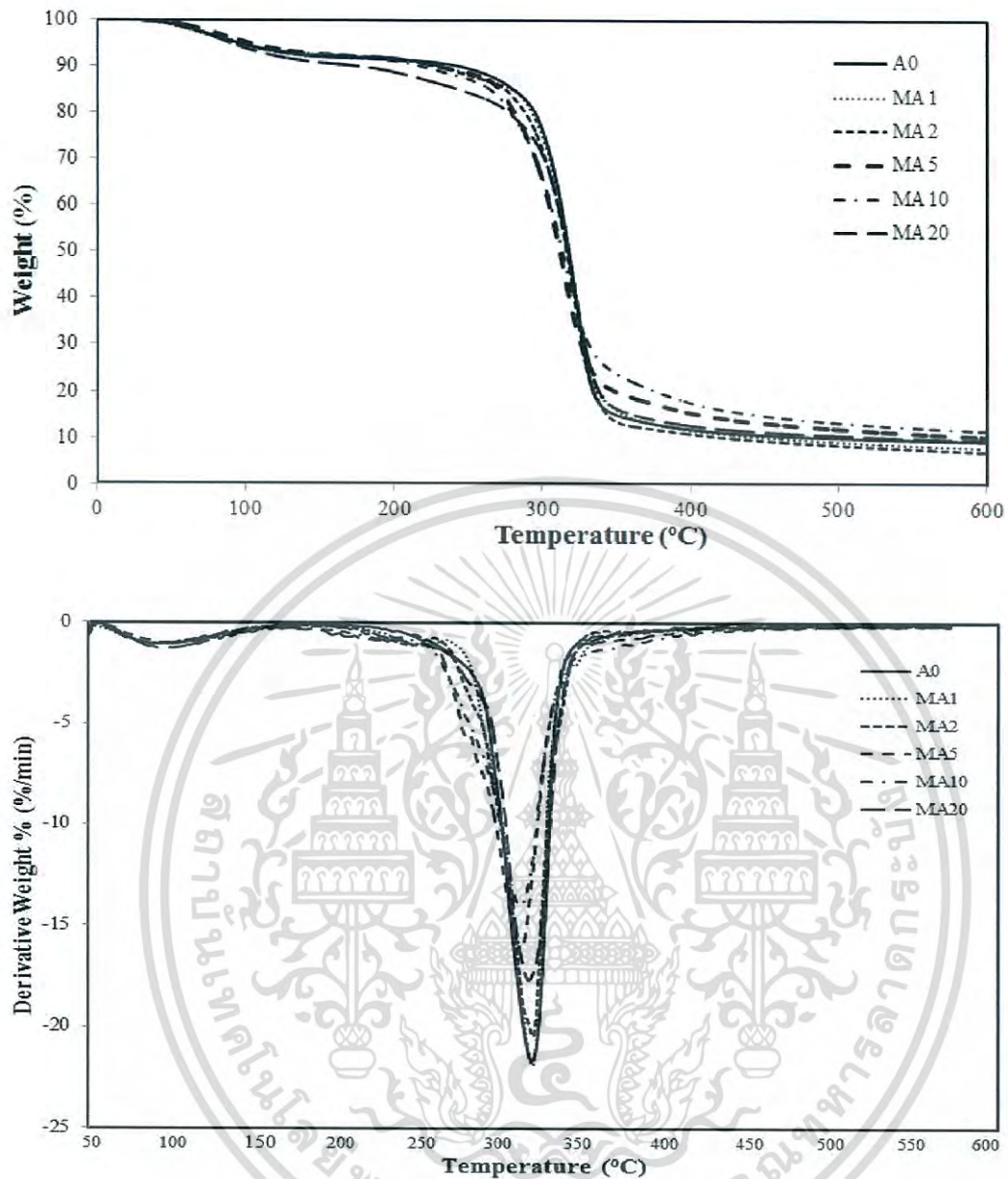
4.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติกที่ปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (Decomposition temperature, Td) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน (N_2) และใช้สภาวะในการทดสอบคือ อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



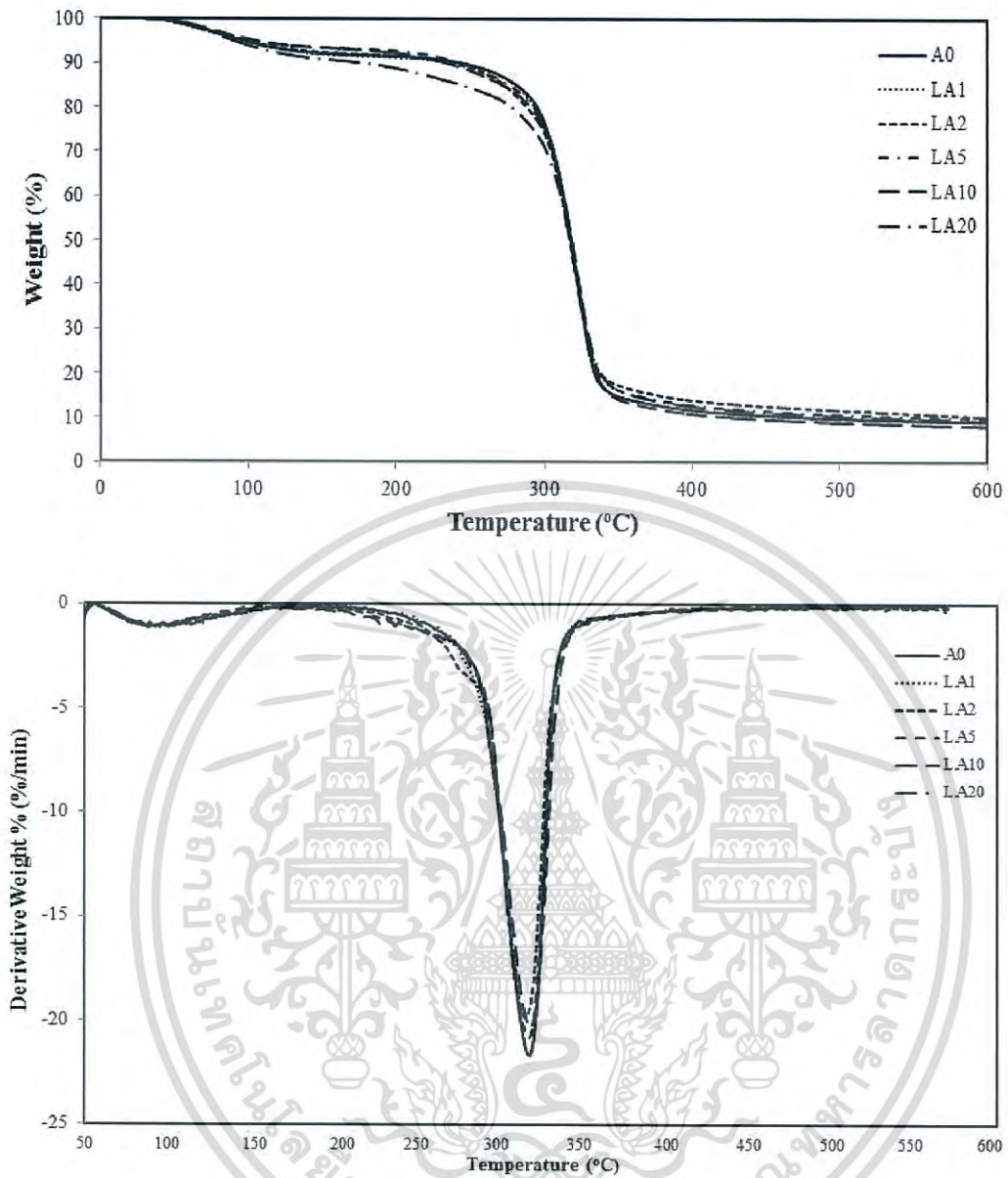
รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกในปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกในปริมาณต่าง ๆ
(ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกในปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)				น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (โมเลกุลแป้งที่เกิดสลายตัวและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 4 (แป้ง)	
A0	72.4	218.0	-	320.1	79.4
CA1	77.4	214.2	290.0	322.7	75.6
CA2	81.8	212.1	292.0	322.9	71.2
CA5	78.3	219.6	271.7	321.9	71.5
CA10	68.8	212.0	272.0	321.4	70.8
CA20	92.6	207.0	246.0	322.5	70.5
MA1	79.8	208.9	294.0	322.8	71.1
MA2	80.2	220.0	289.0	323.2	73.4
MA5	81.4	212.8	278.8	321.6	70.2
MA10	72.8	219.8	281.0	321.1	68.2
MA20	86.3	206.4	276.0	322.7	68.5
LA1	67.2	204.8	285.0	322.8	72.8
LA2	69.0	214.9	285.0	321.3	69.1
LA5	73.2	216.0	288.0	322.2	71.0
LA10	82.3	214.9	285.0	323.0	73.1
LA20	73.1	205.3	288.0	323.3	66.7

จากรูปที่ 4.25-4.27 และตารางที่ 4.4 แสดงถึงฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดมีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดมี 3 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของน้ำในช่วง 70-100 องศาเซลเซียส [53] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอลในช่วง 120-220 องศาเซลเซียส [53] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้งในช่วง 320 องศาเซลเซียส ขึ้นไป [53] และมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 79%

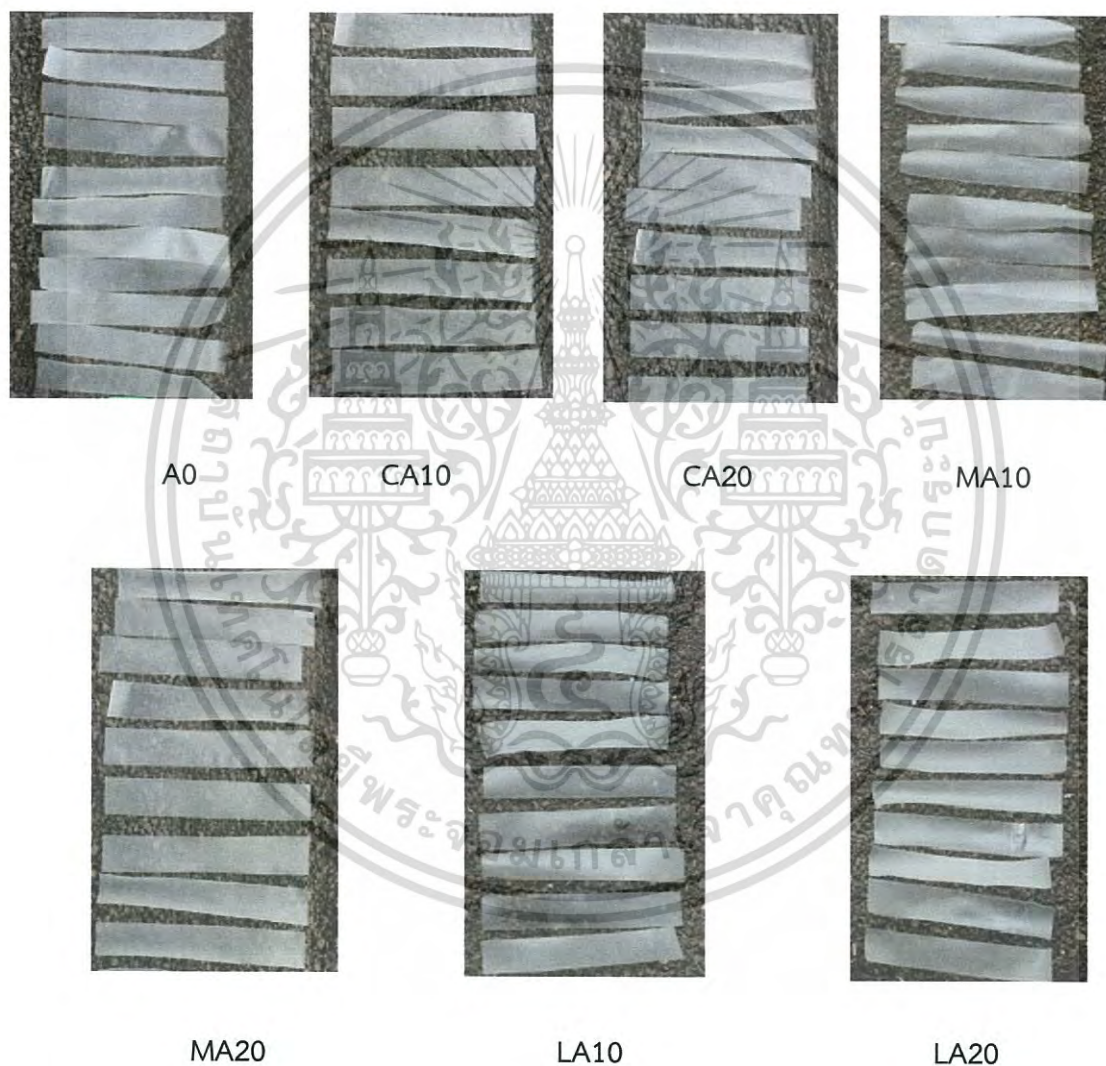
จากการศึกษาฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกในปริมาณต่างๆ มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดมี 4 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของน้ำในช่วง 70-100 องศาเซลเซียส [53] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอลในช่วง 120-220 องศาเซลเซียส [53] ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้งในช่วง 320 องศาเซลเซียส ขึ้นไป [53] และช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดในช่วง 320-350 องศาเซลเซียส ขึ้นไป [53] ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสูงสุดของน้ำในช่วง 70-100 องศาเซลเซียส [53] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอลในช่วง 120-220 องศาเซลเซียส [53] ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของโมเลกุลแป้งที่เกิดสลายตัวและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในช่วง 220-320 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ที่เกิดจากการเติมกรดลงในแป้งมันสำปะหลังและในขั้นตอนการอบที่อุณหภูมิสูงแป้งมันสำปะหลังบางส่วนเกิดการสลายตัว [53, 63- 64] และช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแป้งในช่วง 320 องศาเซลเซียส ขึ้นไป [53] พบว่าปริมาณของกรดที่ใส่เข้าไปนั้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง (ช่วงที่ 4) แต่พบว่าปริมาณของกรดที่ใส่เข้าไปยังมีผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยพบว่าเมื่อปริมาณกรดที่ใส่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Reddy และ Y. Yang [53] ที่ได้ศึกษาฟิล์มแป้งข้าวโพดที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเทหล่อ ฟิล์มแป้งข้าวโพดเติมกรดซิตริก 5 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมกรด แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น



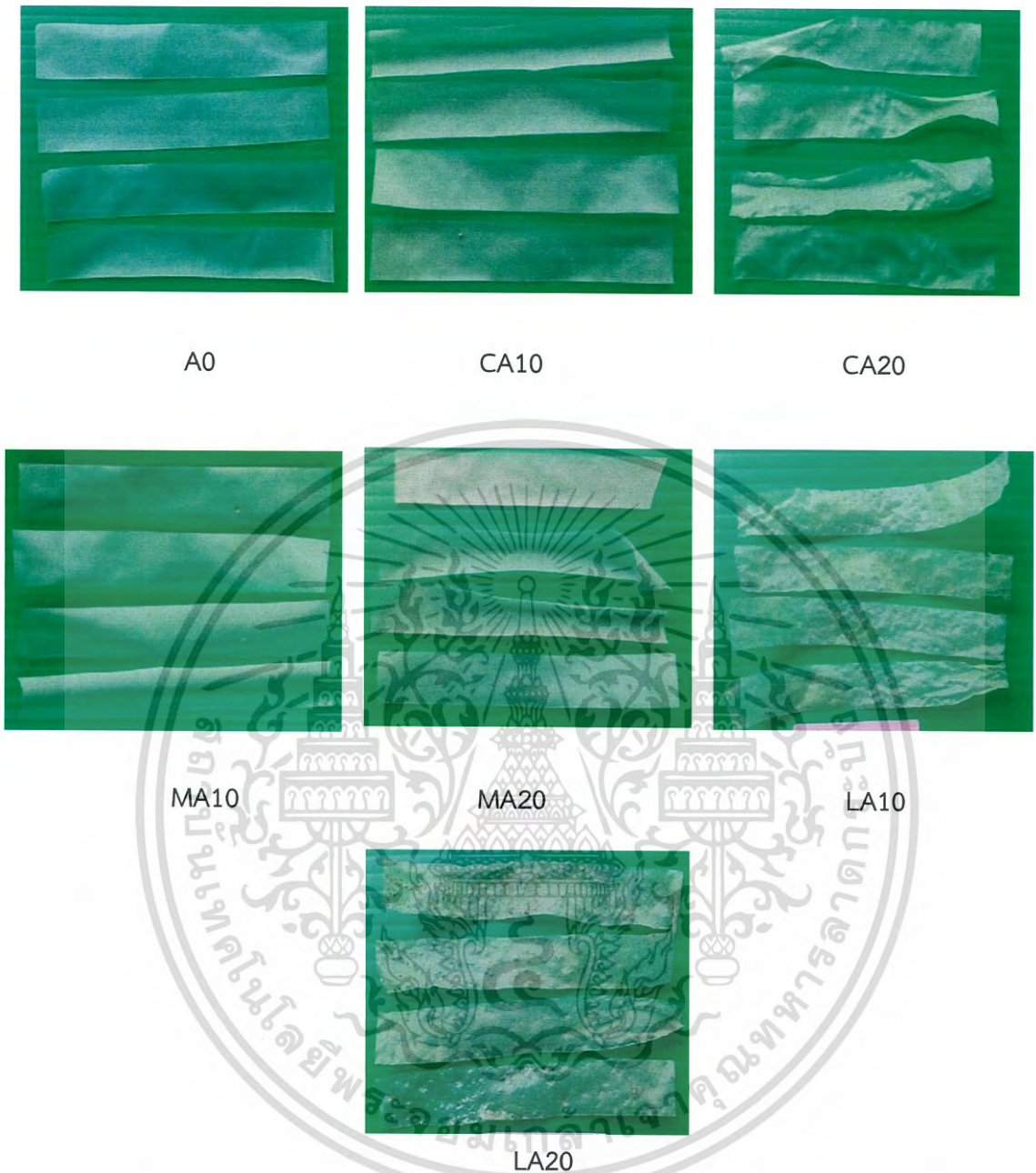
4.9 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0%, 10% และ 20% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้มาฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน ที่มีการควบคุมความชื้นของดินคงที่ อยู่ในช่วง 5-10% ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึง ยืด



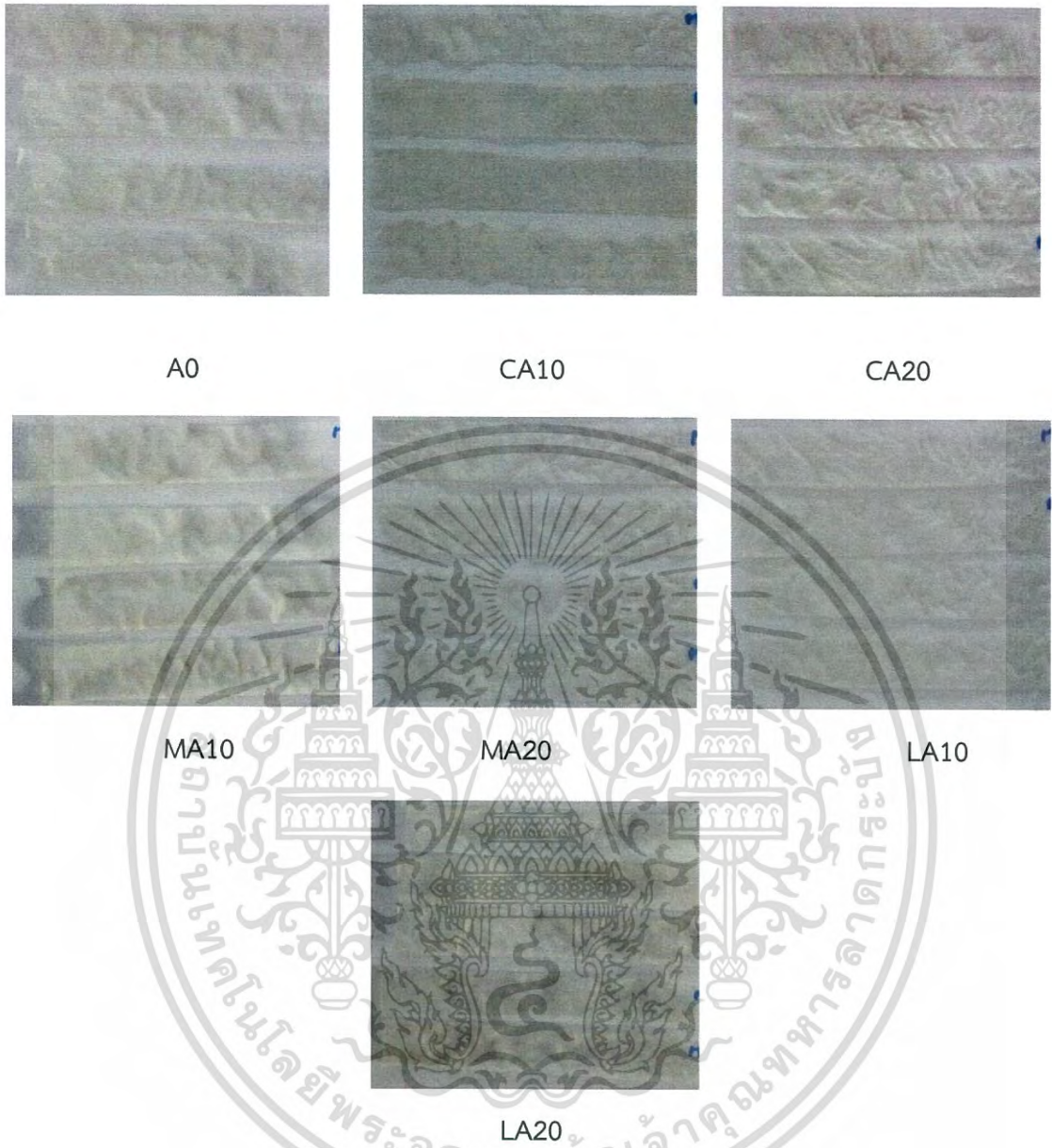
รูปที่ 4. 28 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



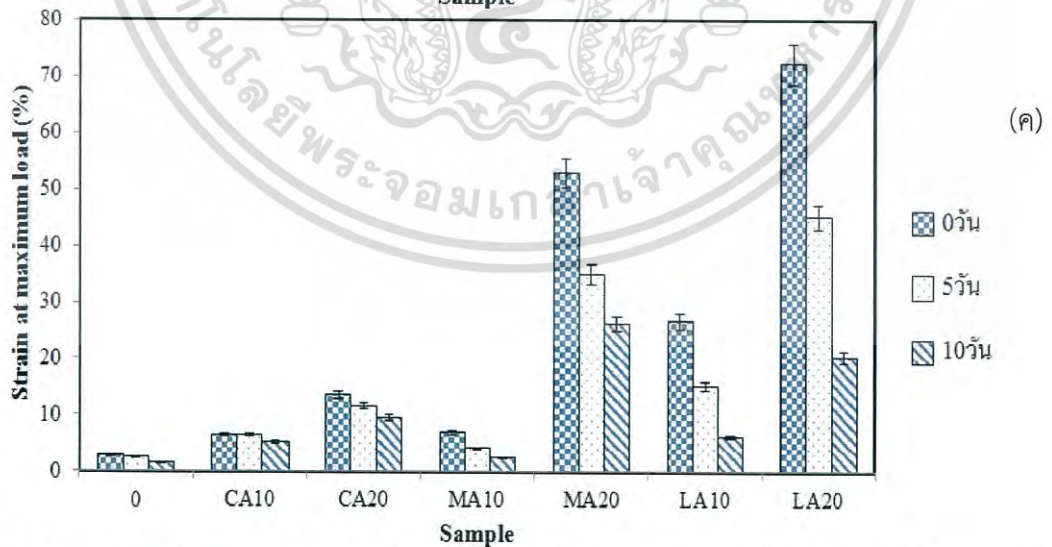
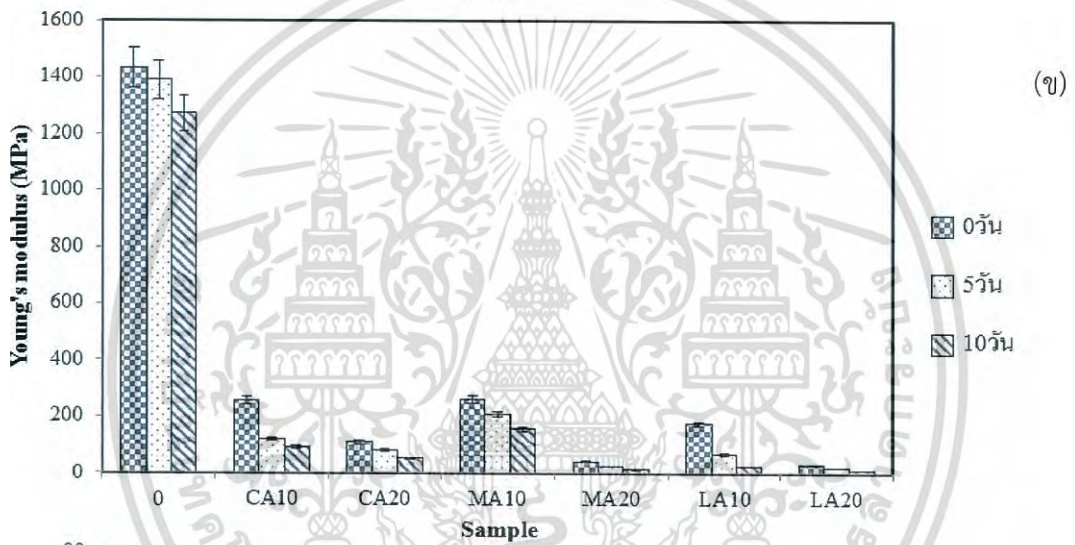
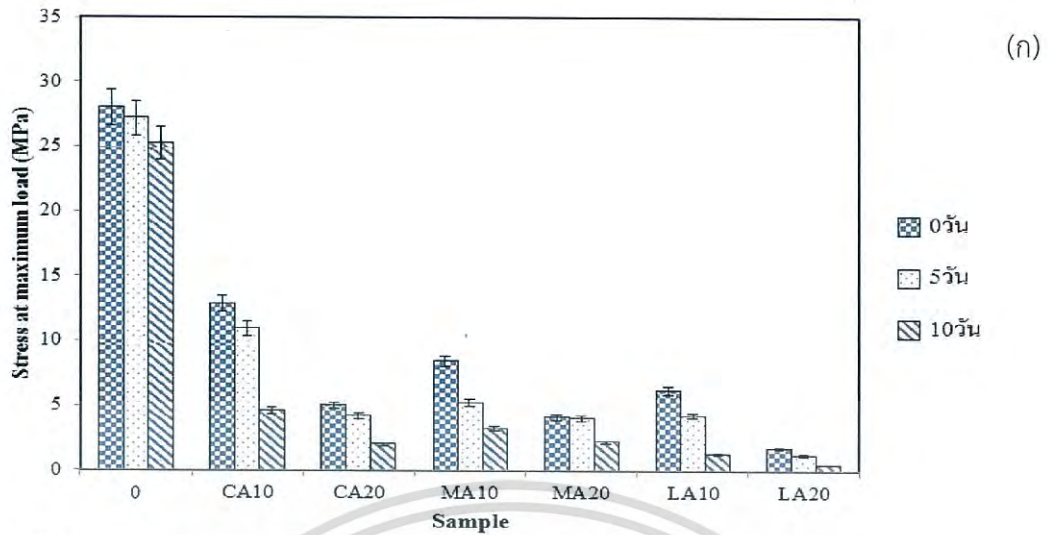
รูปที่ 4.29 พิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 फिल्मแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดลองการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติก ในปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 5 และ 10 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการย่อยด้วยการฝังดินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการฝังดิน จากรูปที่ 4.31 พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน มีแนวโน้มลดลงทุกสมบัติ คือ ความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดทั้งสามชนิดมีแนวโน้มลดลงมากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด เนื่องจากภายในดินมีความชื้น โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำดูดซับน้ำและสามารถกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับโมเลกุลของแป้งทำให้สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้นลงจึงเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นจึงเกิดการขาดได้ง่ายขึ้น และกรดที่เติมเข้าไปนั้นจะช่วยเพิ่มการย่อยสลายหรือทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้มากขึ้น พร้อมทั้งภายในดินยังมีจุลินทรีย์จึงทำให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกมีการย่อยสลายมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดทั้งสามชนิด พบว่าฟิล์มแป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรดมีความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การดึงยืดน้อยที่สุด เนื่องจากฟิล์มแป้งที่ไม่เติมกรดมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักโดยแป้งโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสสูง เมื่อฝังดินเกิดไฮโดรไลซิสจากความชื้นในดิน จึงเกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ ส่วนฟิล์มแป้งที่เติมกรดเกิดไฮโดรไลซิสทั้งจากความชื้นในดินและกรดที่เติมเข้าไป ทำให้สามารถย่อยสลายได้มากและเร็วขึ้น

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก หรือกรดแลคติก พบว่าการเติมกรดแลคติกให้สมบัติเชิงกลรวมลดลงมากที่สุด แสดงว่ากรดแลคติกมีส่วนช่วยให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้มากที่สุด รองลงมาคือ กรดมาลิก และกรดซิตริกมีส่วนช่วยในการย่อยสลายได้น้อยที่สุด เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 และ 4.5 พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักมีความเป็นผลึกน้อยที่สุดและสามารถดูดซับความชื้นได้มากที่สุด จึงทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว

จากงานวิจัยเมื่อปริมาณกรดที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดสายโซ่กึ่งเพิ่มขึ้นขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึก ส่วนผลให้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลง ทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีปริมาณผลึกที่สุด ส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกและกรดแลคติก แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำสุด และผลจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำสามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ยาก ส่งผลให้การ

บวมตัว การดูดซับความชื้น และอัตราซึมผ่านไอน้ำและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง และพบว่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกมีความเป็นผลึกน้อยที่สุดและสามารถดูดซับความชื้นได้มากที่สุด จึงทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรด มาลิก และกรดแลคติกในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก หลังจากทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าพบว่ามีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ 1737 cm^{-1} ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าการเติมกรดลงในแป้งมันสำปะหลังทำให้เกิดการเชื่อมโยงหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างโมเลกุลแป้งและโมเลกุลกรด และพีคที่ตำแหน่ง $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง

2. จากการศึกษาการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า ฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกมีปริมาณผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด และเมื่อเติมปริมาณกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมี ความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลคติกมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดปริมาณ 0% โดยน้ำหนักมีผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด รองลงมา คือ 10, 5, 2, 1 และ 0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลคติก มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด

4. จากการศึกษาการบวมตัว พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การบวมตัวลดลง ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักการบวมตัวน้อยที่สุด รองลงมาคือ 10, 5, 2, 1 และ 0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกมีการบวมตัวมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริก มีการบวมน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การดูดซับความชื้นลดลง ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักการดูดซับความชื้นตัวน้อยที่สุด รองมาคือ 10, 5, 2, 1 และ 0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีการดูดซับความชื้นมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริก มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด

6. จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักการบวมตัวน้อยที่สุด รองมาคือ 10% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริกมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำน้อยที่สุด

7. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสลดลง แต่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลกติก ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริกน้อยที่สุด

8. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดแลกติกน้อยที่สุด

9. จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติกเมื่อปริมาณกรดที่เติมเพิ่มขึ้นส่งผลให้การย่อยสลายได้เร็วขึ้น และพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกย่อยสลายได้เร็วที่สุด รองลงมา คือ กรดมาลิก และกรดซิตริก มีการย่อยสลายได้ช้าที่สุด

10. จากงานวิจัย พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก 20% โดยน้ำหนัก แสดงสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลทดสอบการบวมตัว การดูดซับน้ำ อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลาย

11. फिल्मแข็งมันสำหรับหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด फिल्मมีลักษณะขรุขระของเม็ดแป้ง มีปริมาณผลึกมากที่สุด ผลทดสอบการบวมตัว การดูดซับน้ำ อัตราการซึมผ่านไอน้ำมากที่สุด ส่วนสมบัติเชิงกลมีความแข็งแรงดี มอดุลัสมากที่สุด แต่เปอร์เซ็นต์การตั้งยัดต่ำสุด พบว่าน้ำหนักที่หายไปมากที่สุดและการย่อยสลายช้าที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มแข็งมันสำหรับหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้โดย

1. เปลี่ยนชนิดของแป้งที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แป้งมันสำหรับหลังซึ่งหาได้ง่าย ราคาถูก จึงอาจเลือกใช้แป้งชนิดอื่นทำการทดสอบ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งท้าว แป้งถั่วเขียว แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของแป้งแต่ละชนิดว่าให้สมบัติแตกต่างกันอย่างไร
2. เปลี่ยนอุณหภูมิ และเวลาในการ Curing เพื่อเปรียบเทียบผลว่าให้สมบัติแตกต่างกันอย่างไร
3. ใช้กรดไตรคาร์บอกซิลิกเป็นสารเชื่อมโยง เช่น Isocitric acid, Propane-1,2,3-tricarboxylic acid เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบผลชนิดของกรดแต่ละชนิดว่าให้สมบัติแตกต่างกันอย่างไร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith, P.S. 1982. Starch derivatives and their use in foods, pp. 237-269. In D.R. Lineback and G.E. Inglett, eds. Food Carbohydrates. AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.
- [2] วรวิทย์ โพนนิกร. 2546. “ผลของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝงกลบ.” วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Gonzalez, F.J.R. Ramsay, B.A. and Favis, B.D. 2003. “High performance LDPE/thermoplastic starch blends : a sustainable alternative to pure polyethylene.” *Polymer*. 44 : 1517-1526.
- [4] Nawang,R. Danjaji, I. D. Ishiaku, U. S. Ismail, H. and Ishak, Z.A.M. 2001. “Mechanical properties of sago starch filled linear low density polyethylene (LLDPE) composites.” *Polymer Testing*. 20 : 167-172.
- [5] Menzel, C. Olsson, E. Plivelic, T.S. Andersson, R. Johansson, C. Johansson, R. Jarnstrom, L. and Koch, K. 2013. “Molecular structure of citric acid cross-linked starch films.” *Carbohydrate Polymers*. 96 : 270-276.
- [6] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557. พลาสติกชีวภาพ... โอกาสการลงทุนของไทย. [Online]. Available : <http://www.nstda.or.th/news/17716-bioplastic>.
- [7] ธนาวิที ลี้จากภัย. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์.
- [8] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). 2557. ความเป็นไปได้ในการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์. [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/download/chapter2.pdf>.
- [9] อัจฉราพร รัตนมณี. 2552. .ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเพล็กซ์ผสมแป้งตัดแปรเอสเทอร์และแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตร.” วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2542. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2521. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. มอก. 274-2521.
- [12] เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 2538. “การตัดแปรสตาร์ชในแป้งมันสำปะหลังและข้าวด้วยวิธีแอซิติลเลชัน.” วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Knight, J.W. 1969. **The Starch Industry**. Pergamon Press Ltd., London
- [14] Rutenberg, M.W. 1980.. **Handbook of Water-Soluble Gums and Rasins**. McGraw-Hill Book Company. New York.
- [15] Galliard, T. and P. Bowler. 1987. **Starch: Properties and Potential**. John Wiley & Son, Brisbane.
- [16] Swinkels, J.J.M. 1985. **Starch Conversion Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [17] Wurzburg, O.B. and Szymanski, C.D. 1970. "Modified starch for the food industry." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 18 : 997-1001.
- [18] J.A. Radley. 1968. **Starch and Its Derivatives**. London.
- [19] Zobel, H.F. and Stephen, A.M. 1995. **Food Polysaccharides and Their Application**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [20] Rivard, C. Moens, L. Roberts, K. Brigham, J. and Kelley, S. 1995. "Starch esters as biodegradable plastics: effects of ester group chain length and degree of substitution on anaerobic biodegradation." *Enzyme and Microbial Technology* 17 : 848-852.
- [21] Whistler and Deniel, J.R.. 1984. **Starch: Chemistry and Technology**. 2nd ed, Academic Press, Inc., Florida.
- [22] Bennion, M. 1980. **The Science of Food**. John Wiley & Son, New York.
- [23] Zobel, H.F. 1984.. **Starch Chemistry and Technology**. 2nd ed, Academic Press, Inc., Florida.
- [24] Wurzburg, O.B. 1987. **Modified Starch: Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Florida. [25] Aberle, T. and Burchard, W. 1997. "Starch in semi-dilutes aqueous solution." *Starch/Starke* 49 : 215-224.
- [26] Tester, R.F. Karkalas, J. and Qi, X. 2006. "Starch—composition, fine structure and architecture." *Journal of Cereal Science*. 39(2) 151–165.
- [27] Light, J.M. 1990. "Modification food starch: why, what, where and how." *Cereal Foods World*. 35 : 1081-1092.
- [28] Fleche, G. 1985. **Starch Conversion Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [29] Rutenberg, M.W. and Solarek, D. 1984. **Starch: Chemistry and Technology**. 2nd ed, Academic Press, Inc., Florida.
- [30] ปณิตดา พวงเกษม. 2540. "การเตรียมฟิล์มบิโโรคได้จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์." *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[31] ณัฐยา บุญจินต์ พัทธราภรณ์ ขำเจริญ และ ยุทธศิลป์ บุญมัน. 2533. “พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลักโดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง.” ปรินญาณิพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

[32] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2557. กรดซิตริก.[Online]. Available : <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/146-6034.pdf>

[33] Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร.2557. citric acid / กรดซิตริก. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1339/citric-acid-กรดซิตริก>.

[34] เคมีภัณฑ์. 2557. กรดมาลิก. [Online]. Available : <http://www.chemipan.com/home/index>.

[35] Bloggang 2557. กรดมาลิก.[Online]. Available : <http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=psu3425079&month=11-2009&date=23&group=8&gblog=3>.

[36] รุจิราลัย พูลทวี. 2547. “การคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดแลคติก.” วิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[37] เคมีภัณฑ์. 2557. กรดแลคติก. [Online]. Available : https://www.chemipan.com/home/images/CF1201_Lactic_Acid_1.jpg.

[38] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. 2554. “พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้.” ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[39] สยามเคมี.คอม สารเคมี และผลิตภัณฑ์เคมี. 2557. กรดแลคติก. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/กรดแลคติก>.

[40] Wikipedia. 2557. Plasticizer. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/plasticizer>.

[41] วิกิพีเดีย. 2557. สารหล่อลื่น. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/สารหล่อลื่น>.

[42] กษิตศ อิมประไพ, อรพิน เกิดชูชื่น และ ณิชฎา เลหากุลจิตต์. 2553. “การศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของฟิล์มบริโกลด์ได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง”. ว.วิทยาสตรเกษตร ปีที่ 41 ฉบับที่ 3/1 คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ. หน้า 609-612.

[43] ปฐมมา จาตกานนท์ กุลฤดี แสงสีทอง รุ่งทิภา วันสุขศรี และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2555. “สมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดในน้ำและเอทานอล.” การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. หน้า 379-387.

[44] สุวิทย์ เอื้อโสภณ. 2546. ผลของพลาตีไซเซอร์ต่อสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังดัดแปร.

เอกสารนี้จัดทำโดยสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] Otey, F. H. Westhoff, R. P. and Russell, C. R. 1977. "Biodegradable films from starch and Ethylene-acrylic acid copolymer." *Ind.Eng.Chem.Prod.Res.Dev.* 16 305-308.
- [46] นพกาญจน์ จันทร์เดช. 2555. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดซิตริก. สารวิชาการ จากข่าวสารคณะวิทยาศาสตร์ ปีที่18 ฉบับที่ 1 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่. หน้า 1-3.
- [47] จูศิริรักษ์ วรพัฒน์ผดุง แสงระวี สุทธิปริญญาพันธ์ และ ผดุงขวัญ จิตโรภาส. 2555. "คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคใช้ต่างแกในแอลกอฮอล์." วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเภสัชภัณฑ์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [48] Da Roz, A. L. Zambon, M. D. Curvelo, A. A. S. and Carvalho, A. J. F. 2011. "Thermoplastic starch modified during melt processing with organic acids: The effect of molar mass on thermal and mechanical properties." *Industrial Crops and Products.* 33 : 152-157.
- [49] Beninca, C. Colnan, T. A. D. Lacerda, L. G. Filho, M. A. S. Bannach, C. G. and Schnitzler E. 2013. "The thermal, rheological and structural properties of cassava starch granules modified with hydrochloric acid at different temperatures." *Thermochimica acta.* 552 : 65-69.
- [50] Olsson, E. Menzel, C. Johansson, C. Andersson, R. Koch, K. and Jarnstrom, L. 2013. "The effect of pH on hydrolysis, cross-linking and barrier properties of starch barriers containing citric acid." *Carbohydrate polymers* 98 1505-1513.
- [51] Man, J. Qin, F. Zho, L. Shi, Y. C. Gu, M. Lui, Q. and Wei, C. 2012. "Ordered structure and thermal property of acid modified high-amylose rice starch." *Food chemistry.* 134 : 2242-2248.
- [52] The product conforms to the PD 227478-1 (บริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด).
- [53] Reddy, N. and Yang, Y. 2010. "Citric acid cross-linking of starch films." *Food Chemistry.* 118 : 702-711.
- [54] เย็นหทัย แน่นหนา. 2549. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [55] Huang, C. Roan, Y. . Kuo, M. C and Lu. W. L. 2005. "Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high-content starch/low-density polyethylene blend." *Polymer Degradation and Stability.* 90 : 95-105.
- [56] Fang, J. M. Fowler, P. A. Tomkinson, J. and Hill, C. A. S. 2002. "The preparation and characterization of a series of chemically modified potato starches." *Carbohydrate Polymers.* 47 : 245-252.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

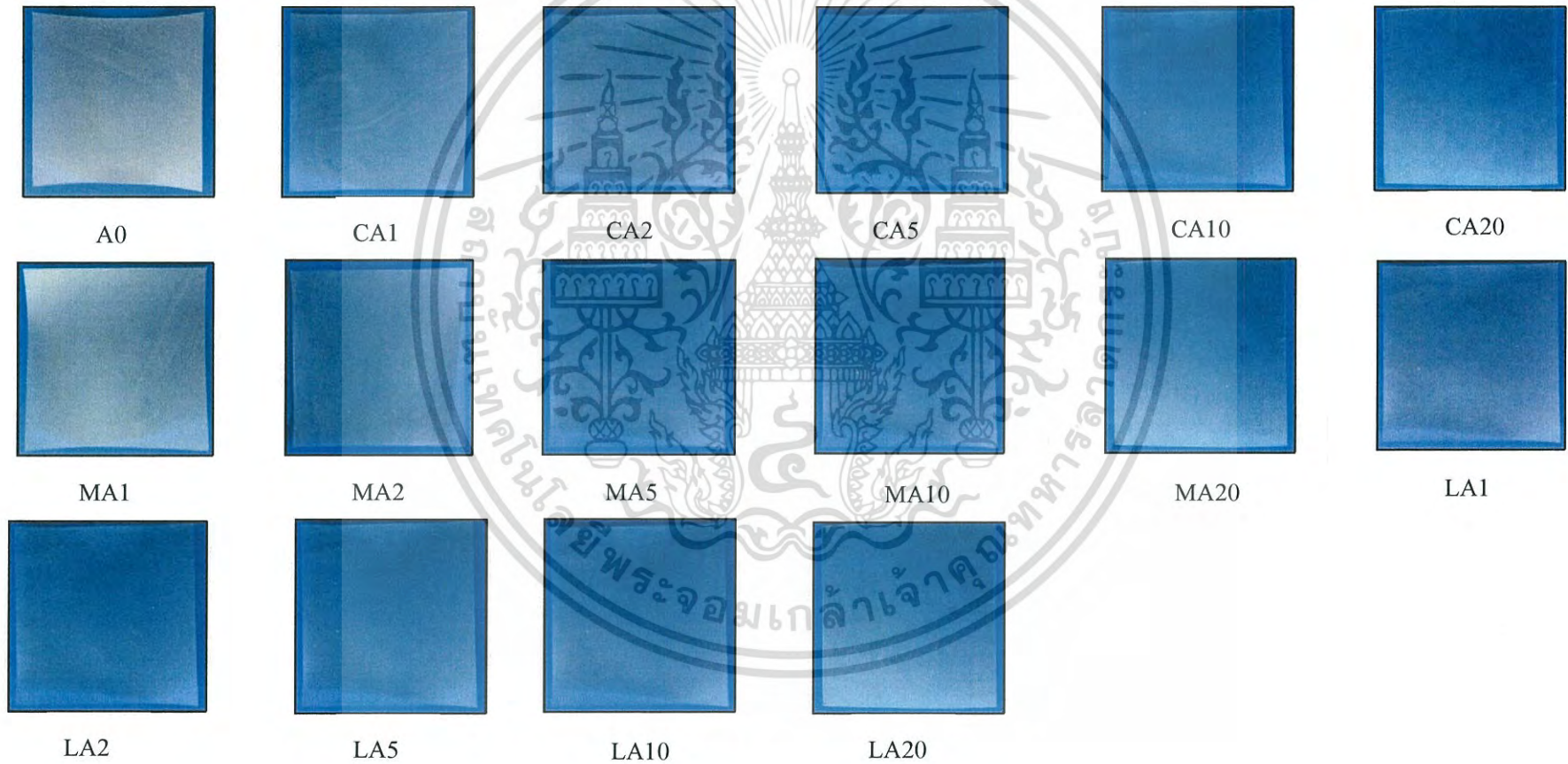
- [57] Pawlak, A. and Mucha, M. and Aoi, K. 2006. "Retrogradation of Ethyleneisformamide and Sorbital." *Starch*. 58(1) 580-586.
- [58] Aoi, K. Takasu, A. and Okada, M. 2000. "DNA-based Polymer Hybrid Part 1 Compatibility and Physical Properties of Poly (vinyl alcohol)/DNA sodium, salt Blend." *Polymer*. 41(1) 2846-2853.
- [59] Ghanbarzadeh, B. 2011. "Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose." *Industrial Crops and Products*. 33 : 229–235.
- [60] Garcia, P. S. Grossmann, M. V. E. Shirai, M. A. Lazaretti, M. M. Yamashita, F. Muller, C. M. O. and Mali, S. 2014 "Improving action of citric acid as compatibiliser in starch/polyester blown films." *Industrial Crops and Products*. 52 : 305– 312.
- [61] Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2013. "The effects of cross-linked starch on the properties of thermoplastic starch." *Materials and Design*. 45 : 586–589.
- [62] Hizukuri, S. 1985. "Relationship Between the Distribution of the Chain Length of Amylopectin and the Crystallite Structure of Starch Granules." *Carbohydrate Research*. 141(2) : 295-306.
- [63] Labchem. 2559. **Citric Acid, Anhydrous**. [online]. Available : <http://www.labchem.com/tools/msds/msds/LC13140.pdf>.
- [64] Datasheets.scbt.com. **Malic acid**. 2559. [online]. Available : <http://www.datasheets.scbt.com/sc-257687.pdf>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก



ภาคผนวก ข

ความสามารถในการเกิดเจลฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์เจล (%)
A0	0
CA10	34
CA20	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักแช่น้ำ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง

ชั่วโมง ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)															
	A0	CA1	CA2	CA5	CA10	CA20	MA1	MA2	MA5	MA10	MA20	LA1	LA2	LA5	LA10	LA20
1	520.72	410.64	384.75	319.67	265.85	182.35	452.45	341.53	380.38	334.34	210.62	495.81	472.79	413.66	379.55	310.54
2	615.83	546.52	459.29	437.38	385.81	251.42	579.5	564.23	468.59	437.42	351.32	585.48	565.13	551.51	502.18	428.21
3	672.48	604.59	515.42	495.43	443.52	310.59	638.38	624.52	525.42	494.51	409.52	647.42	622.64	564.51	525.38	484.28
4	705.38	643.45	539.81	528.67	468.66	352.42	668.56	653.81	561.71	523.66	443.54	684.42	643.76	597.89	537.17	517.34
5	729.58	668.49	581.21	547.11	519.09	387.08	700.11	680.21	565.24	529.34	479.47	697.67	676.42	626.51	567.04	558.08
6	744.72	683.19	600.29	571.67	540.65	413.48	724.76	699.66	616.64	599.01	503.08	718.66	699.67	638.89	585.92	573.04
72	787.38	728.49	641.54	608.62	571.71	452.53	767.42	735.67	661.09	637.81	550.31	757.42	746.57	681.1	631.12	611.51

ภาคผนวก ง

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

ชั่วโมง ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)															
	A0	CA1	CA2	CA5	CA10	CA20	MA1	MA2	MA5	MA10	MA20	LA1	LA2	LA5	LA10	LA20
1	5.64	5.31	4.45	4.56	5.74	3.19	5.41	5.42	4.65	4.42	3.25	5.93	5.85	4.71	4.57	3.52
2	6.77	6.37	5.75	5.15	6.12	4.36	6.47	5.75	5.42	5.33	4.55	6.65	6.45	5.47	4.99	4.65
3	7.19	6.44	6.50	5.59	6.15	4.75	6.45	6.25	6.12	5.91	5.65	6.93	6.71	6.20	6.12	5.77
4	7.39	6.70	6.69	5.95	6.21	5.19	6.73	6.55	6.45	6.25	6.01	7.10	6.91	6.57	6.35	6.12
5	7.43	6.86	6.82	6.51	6.29	5.44	6.88	6.75	6.62	6.45	6.21	7.21	7.01	6.68	6.55	6.32
6	7.61	7.01	6.93	6.61	6.34	5.69	7.10	6.93	6.82	6.62	6.42	7.33	7.05	6.87	6.75	6.55
7	7.70	7.15	7.00	6.75	6.45	5.77	7.18	7.02	6.96	6.74	6.51	7.54	7.21	6.97	6.84	6.74
8	7.87	7.26	7.10	6.90	6.50	6.16	7.36	7.21	7.01	6.93	6.63	7.63	7.41	7.13	7.00	6.86
9	7.73	7.35	7.18	7.01	6.55	6.51	7.38	7.23	7.15	7.01	6.91	7.62	7.51	7.24	7.11	7.00
10	7.75	7.36	7.19	7.11	6.62	6.55	7.37	7.25	7.17	7.03	6.93	7.63	7.53	7.26	7.13	7.01
11	7.86	7.39	7.21	7.23	6.66	6.56	7.37	7.30	7.24	7.13	6.94	7.68	7.58	7.34	7.24	7.24
12	7.87	7.43	7.37	7.23	6.68	6.58	7.37	7.31	7.25	7.15	6.95	7.75	7.60	7.35	7.25	7.06
13	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.59	7.37	7.32	7.25	7.17	6.96	7.78	7.62	7.36	7.25	7.10
14	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.59	7.38	7.34	7.27	7.21	6.97	7.79	7.65	7.38	7.26	7.15

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

ชั่วโมง ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)															
	A0	CA1	CA2	CA5	CA10	CA20	MA1	MA2	MA5	MA10	MA20	LA1	LA2	LA5	LA10	LA20
15	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.59	7.38	7.35	7.33	7.22	6.98	7.80	7.69	7.44	7.27	7.16
16	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.59	7.39	7.37	7.32	7.24	6.98	7.80	7.75	7.45	7.27	7.16
17	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.59	7.39	7.37	7.32	7.31	6.99	7.81	7.77	7.43	7.29	7.19
18	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.60	7.39	7.37	7.33	7.32	7.00	7.82	7.78	7.43	7.33	7.19
19	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.60	7.39	7.37	7.33	7.33	7.00	7.82	7.78	7.43	7.38	7.19
20	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.60	7.39	7.37	7.33	7.33	7.00	7.82	7.78	7.43	7.38	7.19
21	7.88	7.56	7.43	7.24	6.70	6.60	7.39	7.37	7.34	7.33	7.00	7.82	7.79	7.43	7.38	7.19

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

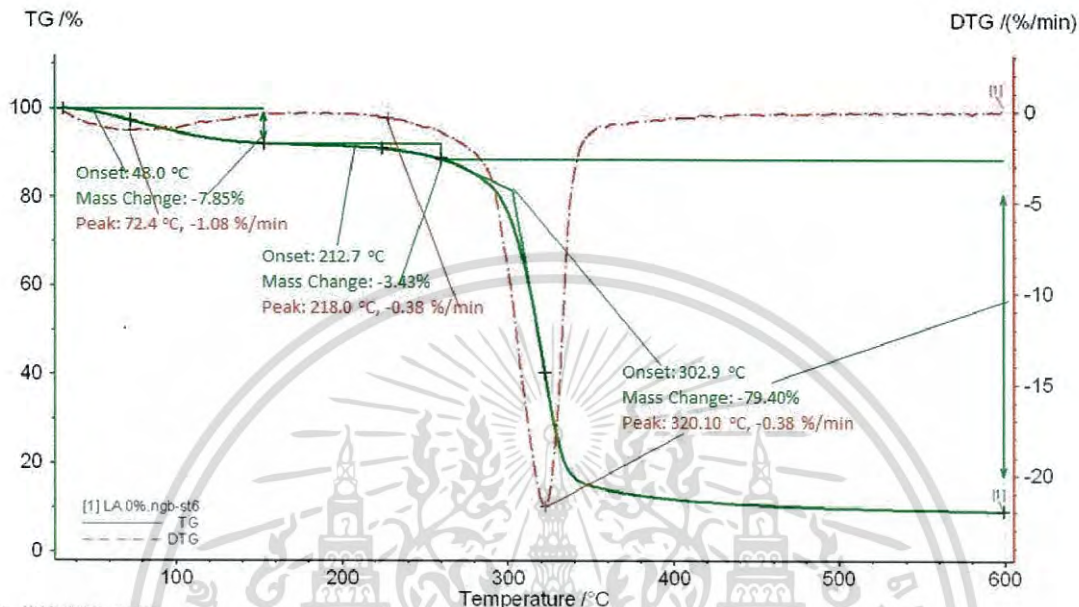
ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
A0	28.37±2.69	1430.92±3.24	3.36±0.54
CA1	16.84±3.71	464.64±1.80	3.62±0.42
CA2	15.26±2.69	398.58±4.85	3.53±0.33
CA5	14.77±3.96	382.02±4.27	4.12±0.80
CA10	12.86±1.43	256.45±3.67	6.55±1.28
CA20	5.02±0.29	107.93±6.60	13.57±4.70
MA1	15.60±4.79	1050.75±5.68	3.08±0.28
MA2	13.83±2.31	805.89±5.62	3.46±0.67
MA5	12.61±2.66	612.87±6.43	4.44±0.98
MA10	8.45±1.11	173.35±6.38	6.88±1.38
MA20	4.14±0.34	30.56±4.55	52.95±7.07

สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลกติก ในปริมาณ 0, 1, 2, 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก

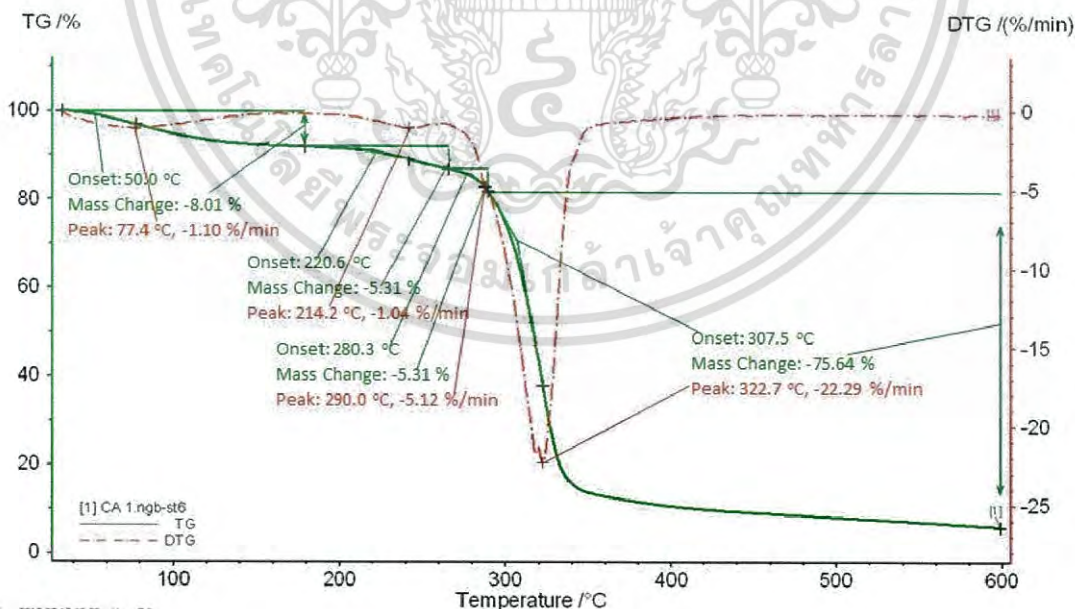
ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
LA1	11.01±3.85	581.31±2.09	2.89±1.12
LA2	11.63±3.20	561.94±5.75	3.47±0.45
LA5	11.08±3.33	460.23±4.95	3.51±0.60
LA10	6.18±2.84	260.55±4.05	26.68±5.75
LA20	1.73±0.34	40.27±1.21	72.31±6.15

ภาคผนวก จ

TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแล็กติก

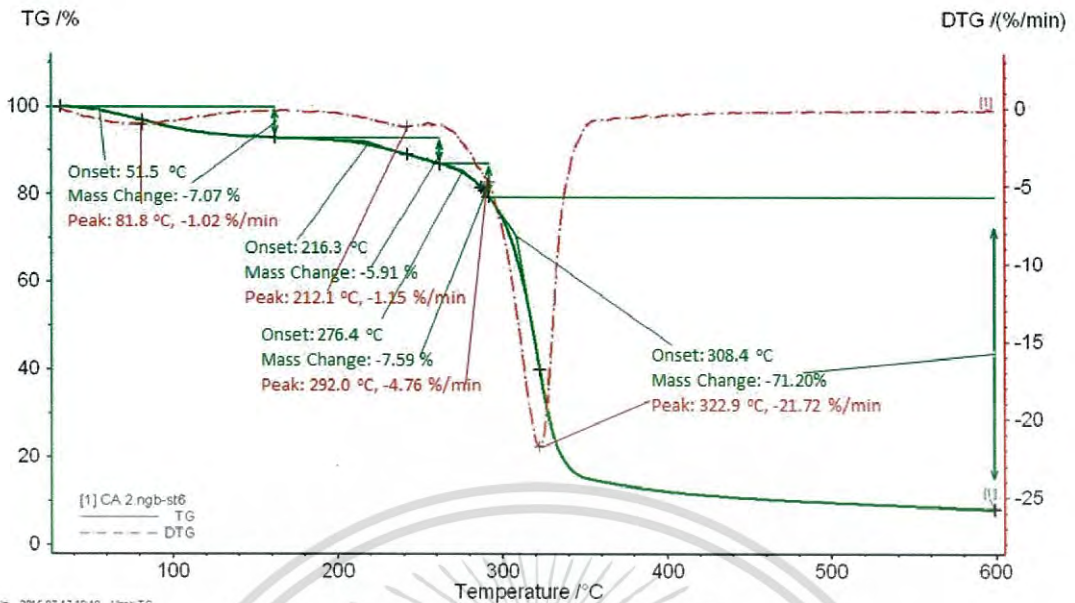


รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยกรด

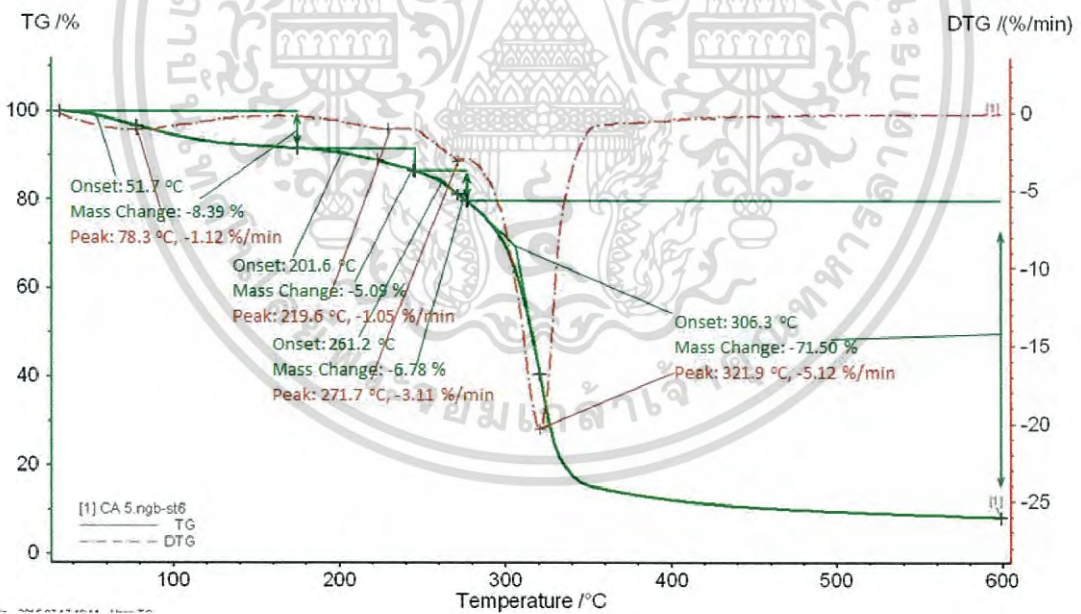


รูปที่ จ.2 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

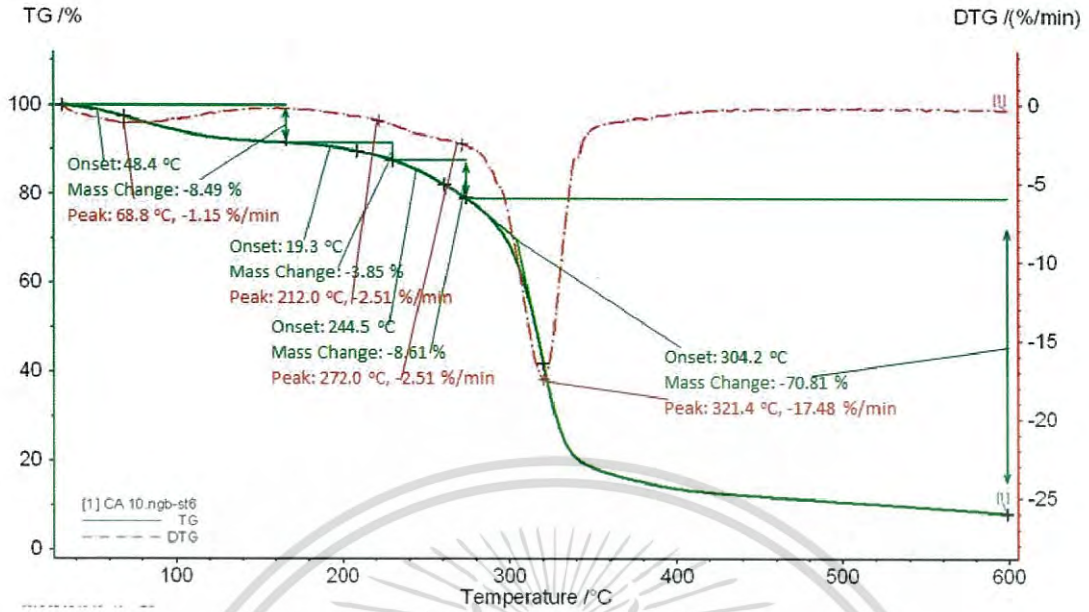


รูปที่ ๓.๓ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก

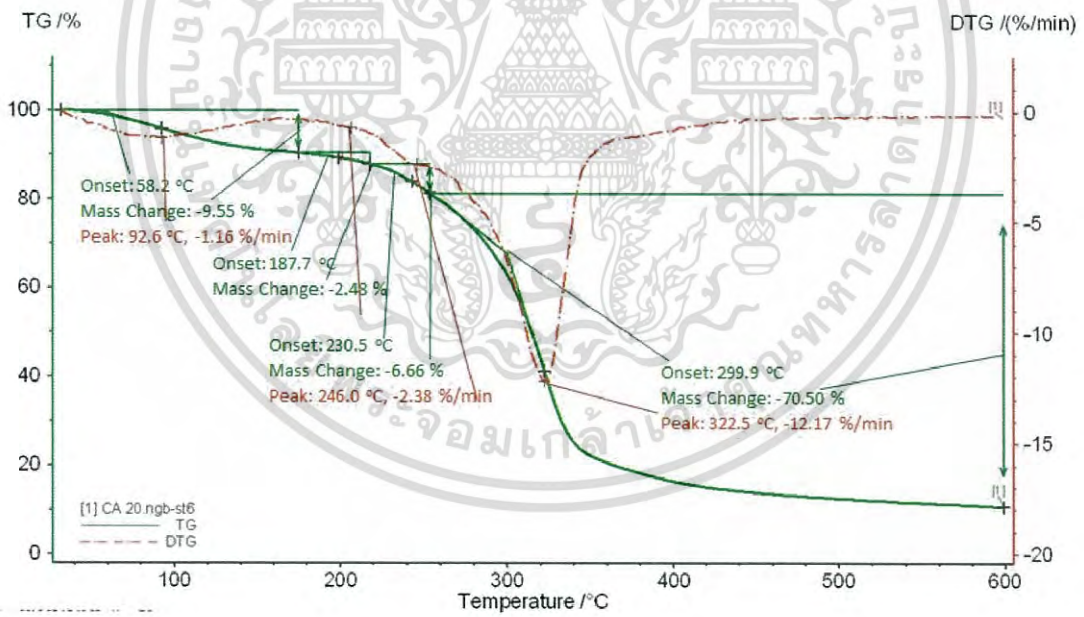


รูปที่ ๓.๔ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

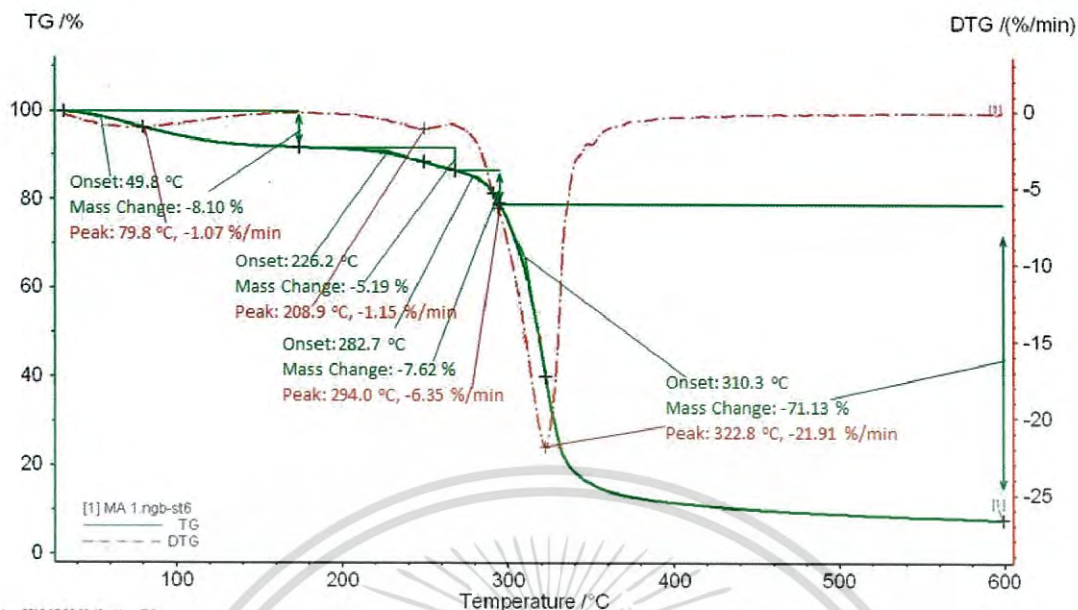


รูปที่ ง.5 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก

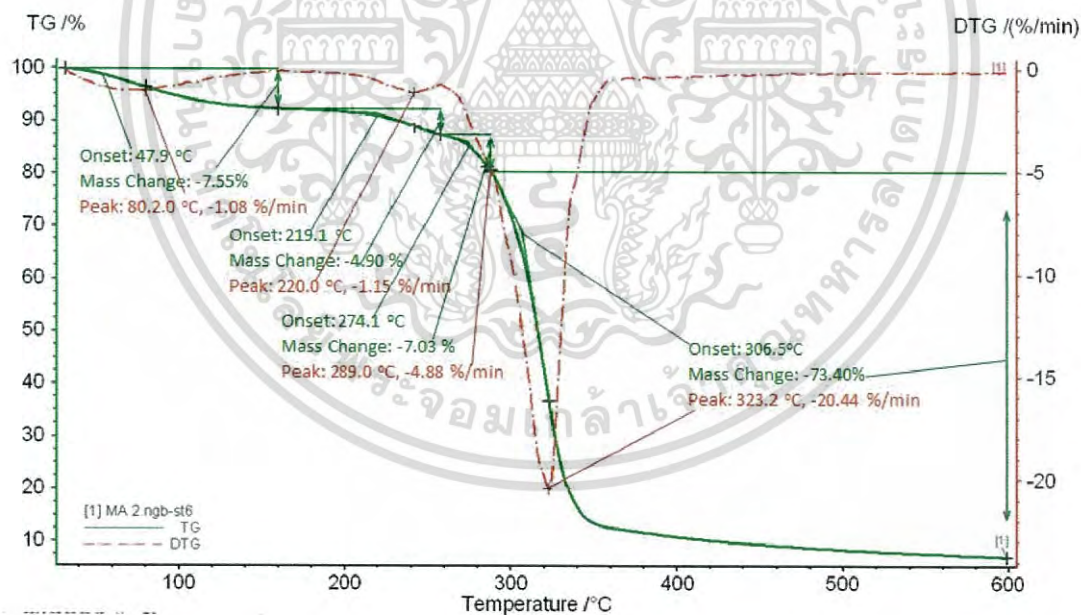


รูปที่ ง.6 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

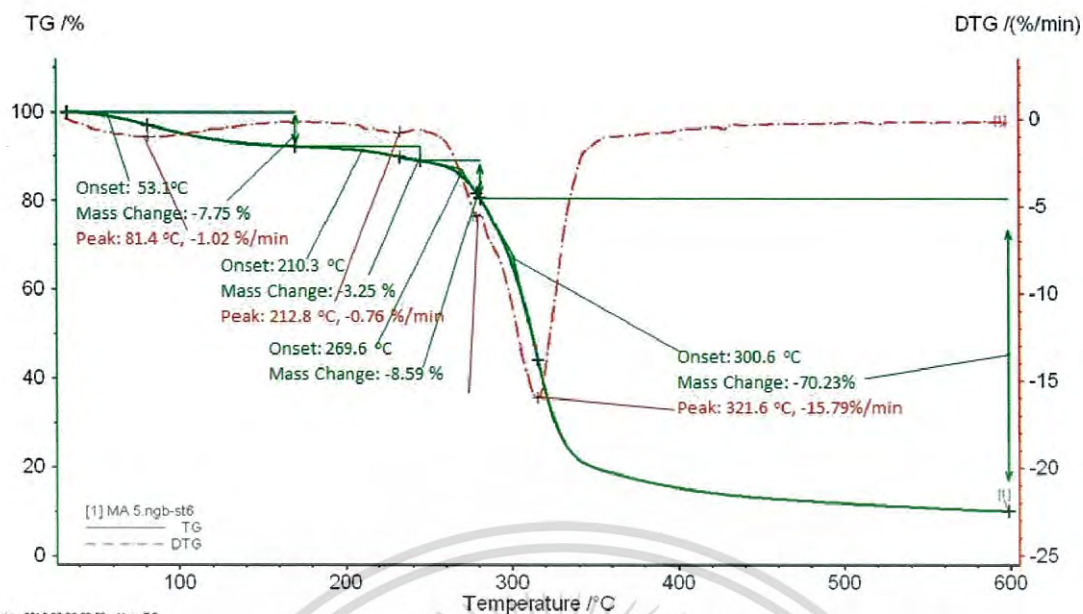


รูปที่ ๗.๗ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก

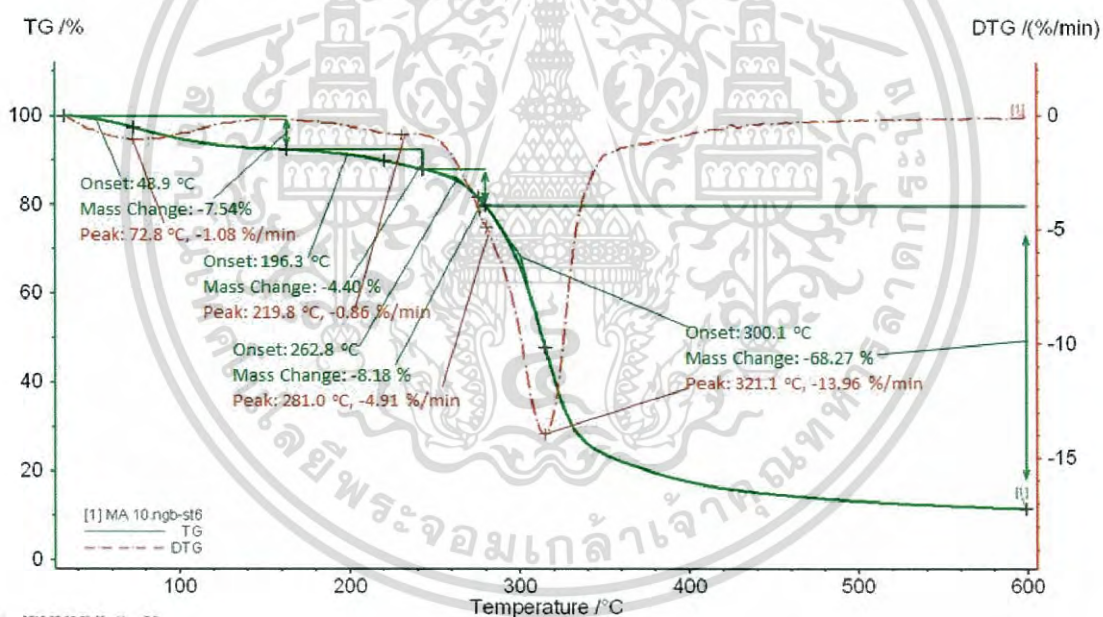


รูปที่ ๗.๘ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

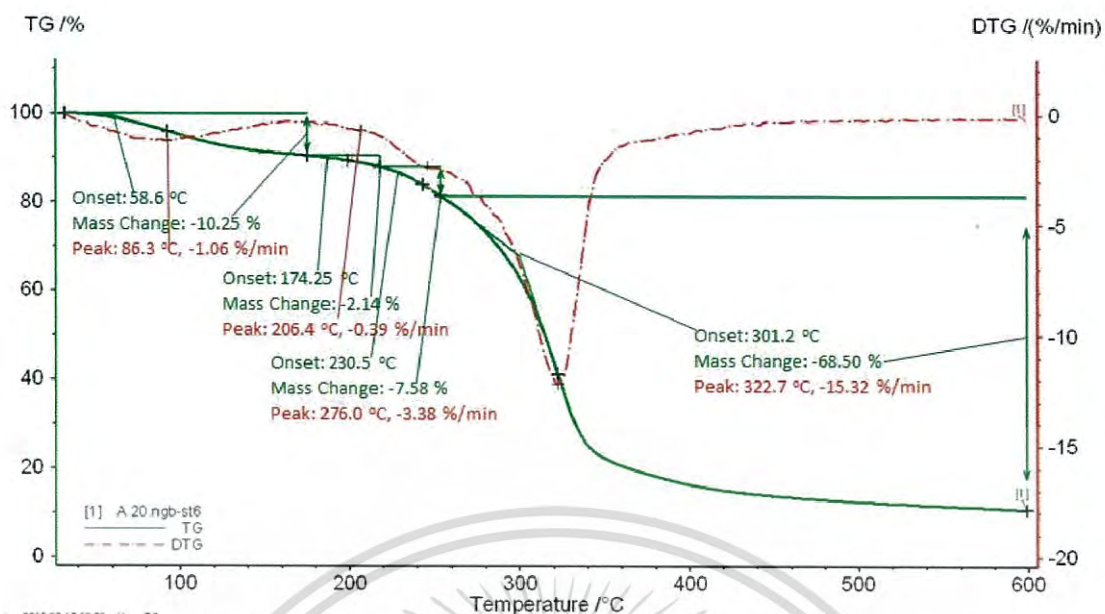


รูปที่ ๙.๙ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก

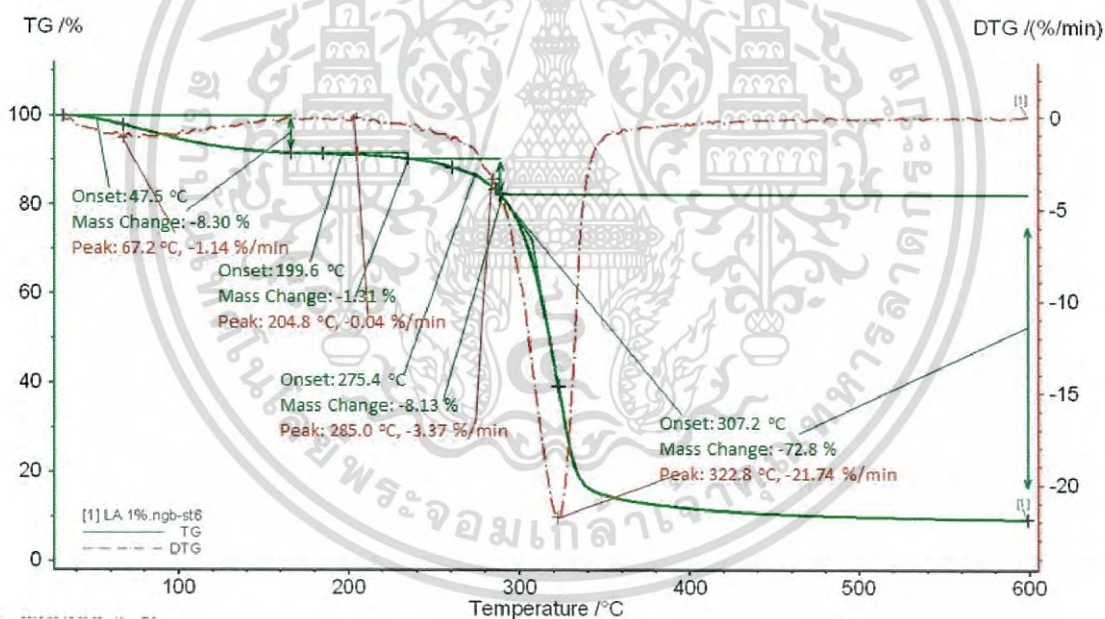


รูปที่ ๙.๑๐ เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

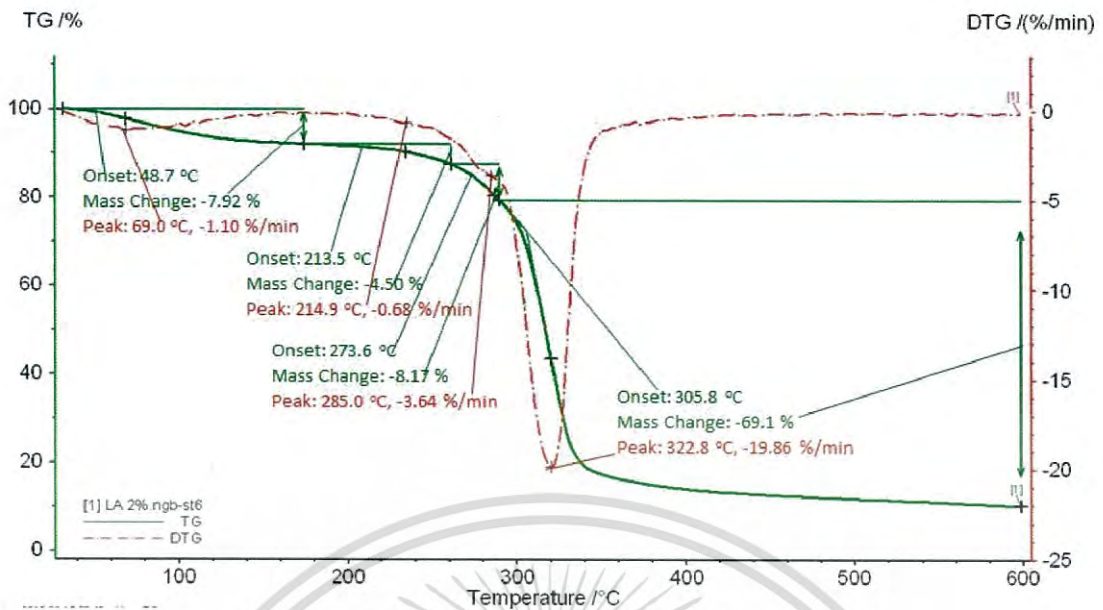


รูปที่ ง.11 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลิกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

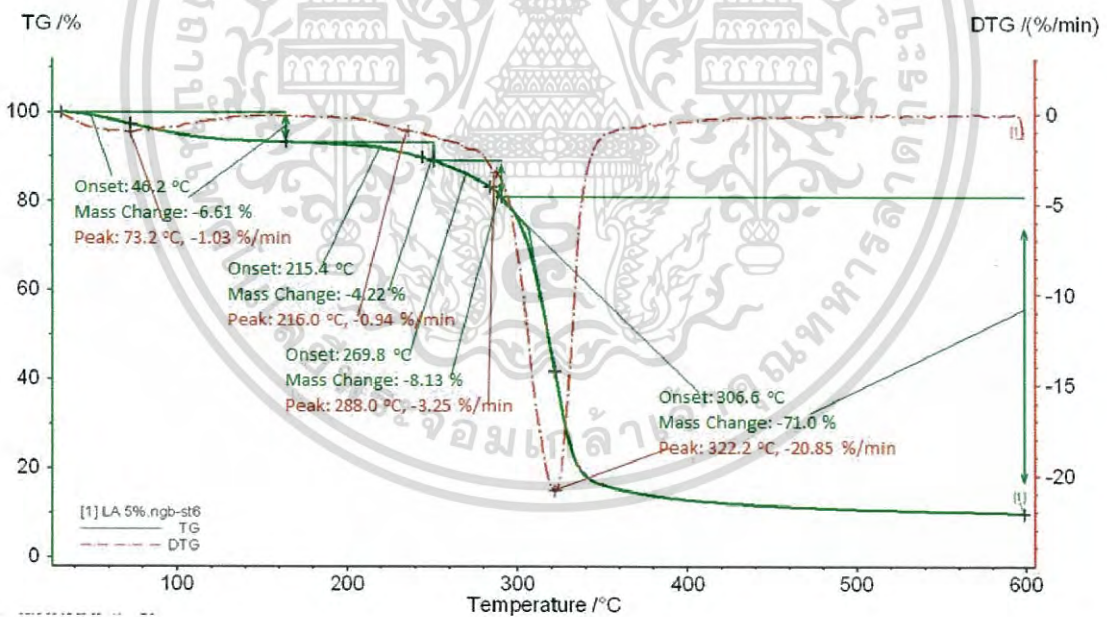


รูปที่ ง.12 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลกติกที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

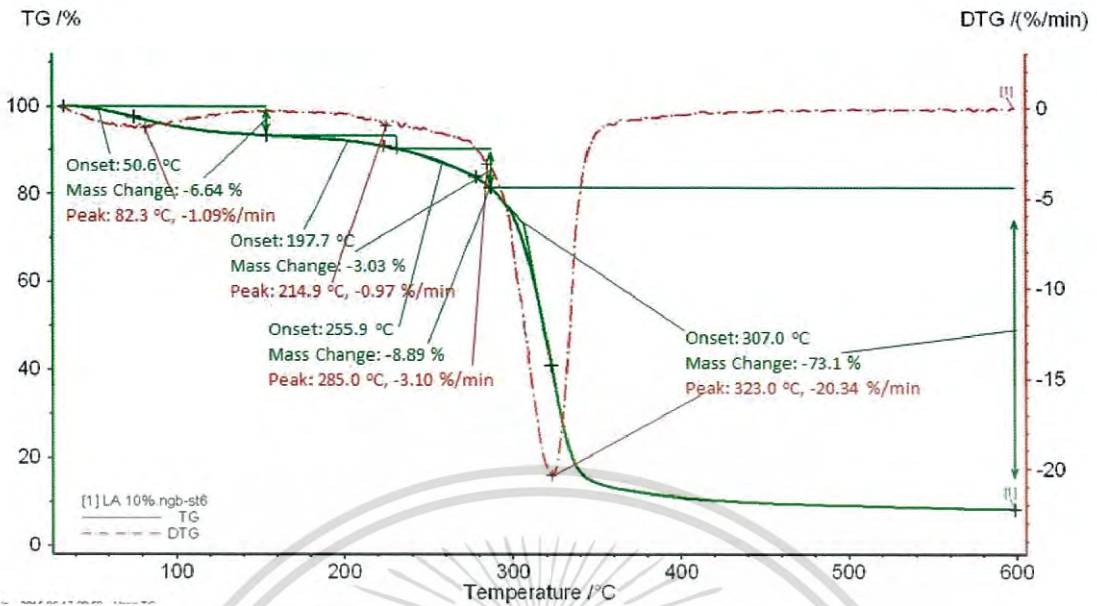


รูปที่ ง.13 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก

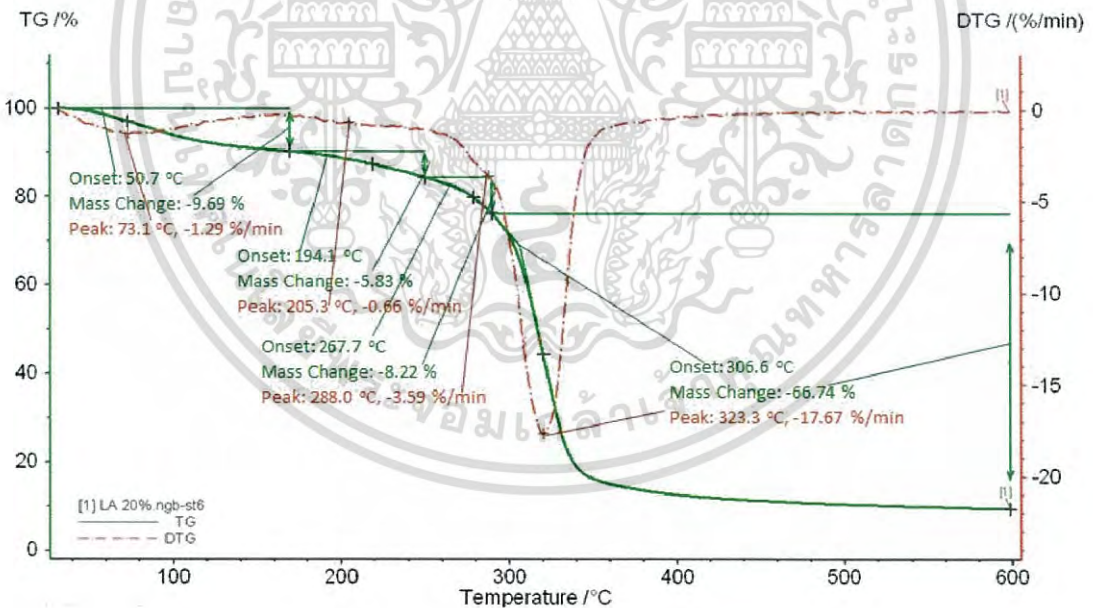


รูปที่ ง.14 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ง.16 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดแลคติกที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก ใน ปริมาณ 0, 10 และ 20% โดยน้ำหนัก ที่ทำการย่อยสลายโดยการฝังดิน 0, 5 และ 10 วัน

วัน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	A0	28.01±0.45	1432.74±1.24	2.80±1.46
	CA10	12.86±0.23	256.45±0.24	6.55±0.14
	CA20	5.02±0.42	107.93±1.46	13.57±1.15
	MA10	8.46±0.53	260.55±2.33	6.88±0.22
	MA20	4.14±0.85	40.27±2.54	52.95±1.25
	LA10	6.18±1.03	173.35±2.31	26.68±2.15
	LA20	1.73±1.33	30.56±1.02	72.31±2.08
5	A0	27.20±1.85	1388.63±1.55	2.52±1.59
	CA10	10.95±2.13	118.78±2.32	6.47±0.23
	CA20	4.23±2.15	82.22±3.13	11.61±1.51
	MA10	5.26±1.54	210.21±0.13	4.08±2.13
	MA20	4.02±1.46	26.13±2.16	35.05±2.14
	LA10	4.27±0.15	67.65±2.15	15.27±2.15
	LA20	1.21±2.32	21.43±2.25	45.12±2.05
10	A0	25.25±0.34	1271.24±0.54	1.59±1.79
	CA10	4.62±1.31	90.13±0.51	5.13±2.45
	CA20	2.05±1.12	50.13±1.25	9.62±3.13
	MA10	3.2548±0.7425	156.13±0.4837	2.65±0.55
	MA20	2.2216±0.4785	14.016±1.5795	26.27±0.46
	LA10	1.2887±2.4521	25.134±3.1254	6.27±0.13
	LA20	0.5054±1.5842	11.437±0.4157	20.27±0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ	จินตภา แต้มสีคราม
วันเกิด	22 มิถุนายน 2533
ภูมิลำเนา	บุรีรัมย์
ที่อยู่	เลขที่ 5 หมู่ที่ 5 ตำบลทุ่งวัง อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ 31150
การศึกษา	- ระดับมัธยมต้น โรงเรียนสตึก -ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสตึก -ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีประยุกต์) สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน -ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้