

ผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน
และการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของฟิล์มแป้ง

Effect of dual modification of cassava starch by oxidation
and crosslinking on starch film properties

พรทิพย์ ก้านสันเทียะ

Pornthip Kansanthia

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2020-SC-M-014-013

ผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน
และการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของฟิล์มแป้ง

Effect of dual modification of cassava starch by oxidation
and crosslinking on starch film properties

พรทิพย์ ก้านสันเทียะ

Pornthip Kansanthia

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2020-SC-M-014-013

Effect of dual modification of cassava starch by oxidation
and crosslinking on starch film properties

PORNTHIP KANSANTHIA

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

2020

KMITL-2020-SC-M-014-013

COPYRIGHT 2020

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของฟิล์มแป้ง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพรทิพย์ ก้านสันเทียะ
รหัสประจำตัว	60605060
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการดัดแปรขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนผ่านการออกซิเดชันและการเชื่อมโยง โดยการใชไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง และใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่แตกต่างเช่นกัน ได้แก่ 1, 2, 3 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง ซึ่งทำการขึ้นรูปฟิล์มทุกสูตรด้วยวิธีการเทหล่อ (Solution casting) และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม จากผลของปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มสูงขึ้นทั้งในแป้งออกซิไดส์ และแป้งดัดแปรสองขั้นตอน ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ส่งผลให้องค์การเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้น และในแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์นั้น้องศาการเชื่อมโยงสูงกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบพีกใหม่เกิดขึ้นที่ 1735 cm^{-1} และพบการลดลงของสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีก 1642 cm^{-1} ที่แสดงถึงพันธะไฮโดรเจน ซึ่งจากผลนี้สามารถยืนยันการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงในฟิล์มจากแป้งดัดแปรขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนได้ ในการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าการออกซิเดชันส่งผลให้ความเป็นผลึกในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์และฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร (NSF) ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ ไม่พบความแตกต่างของปริมาณผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NSF นอกจากนี้ในการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์มีความเรียบมากกว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ แต่ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์นั้นมีความเรียบที่มากที่สุด และฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนมีสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ที่ดีขึ้น โดยเฉพาะสูตร 20% OS-1% CSF ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกลูตารัลดีไฮด์ทำให้ฟิล์มมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและการดูดซับน้ำที่ลดต่ำลง จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนในสูตร 4% CS-10% OSF และ 1% CS-10% OSF มีความเค้น ณ จุดรับแรง

ดิ่งสูงสุด และมอดุลัสที่สูง อีกทั้งยังมีเปอร์เซ็นต์การดิ่งยืด ณ จุดรับแรงดิ่งสูงสุดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ดัดแปรเพียงขั้นตอนเดียว และฟิล์มจากแป้งดัดแปรทุกสูตรมีสมบัติเชิงกลต่ำลงหลังจากการฝังดิน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถเกิดการย่อยสลายได้

คำสำคัญ : กลูตาร์ลดีไฮด์ แป้งดัดแปรสองขั้นตอน ฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Thesis Title	Effect of dual modification of cassava starch by oxidation and crosslinking on starch film properties
Student Name	Pornthip Kansanthia
Student ID	60605060
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

The objective of this study was to prepare single and dual-modified cassava starch films by oxidation and crosslinking processes. The oxidizing and crosslinking agents in this study were hydrogen peroxide (H_2O_2) and glutaraldehyde at various percentages of – 5, 10, 20 wt% and 1, 2, 3, 4 wt% (based on dry weight of starch), respectively. All starch films were prepared by solution casting technique with glycerol as a plasticizer and various properties were examined. The results showed that the carbonyl and carboxyl contents increased as the concentration of H_2O_2 increased in both oxidized and dual-modified starch. Likewise, the degree of crosslinking increased with glutaraldehyde content and crosslinked-oxidized starch presented higher degree of crosslinking than that of oxidized-crosslinked starch. The oxidation and crosslinking in single and dual modified starch films were also confirmed by FT-IR spectra. The new peak was evidenced at 1735 cm^{-1} and the decrease in ratio of peak height of hydrogen bonding at 1642 cm^{-1} was also observed. X-ray diffraction patterns revealed that the oxidation process caused higher degree of crystallinity of oxidized and dual modified starch films compared with native starch films (NSF) but the degree of crystallinity of crosslinked starch film was similar to that of NSF. Moreover, the oxidized-crosslinked starch films showed smoother surface than those of crosslinked-oxidized starch films. However, the smoothest surface was observed in oxidized starch film. The hydrophobic property of the dual-modified starch films were improved, especially for 20% OS-1% CSF. In

addition, both percentage of swelling and moisture absorption decreased with the increasing content of H₂O₂ and glutaraldehyde. For mechanical properties, 4% CS-10% OSF and 1% CS-10% OSF represented high stress at maximum load and Young's modulus and also high strain at maximum load when compared with all single-modified starch films. In addition, all modified starch films showed the decrease in mechanical properties after soil burial test, which confirmed its biodegradability.

Keywords : Biodegradable film, Glutaraldehyde, Hydrogen peroxide, Dual-modified starch

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่กรุณาให้ความรู้และแนวทางในการปฏิบัติงาน อีกทั้งสอนแนวคิดในการแก้ไขปัญหา ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ รศ.ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด ผู้เป็นเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ท่านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัว และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาคเคมี ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจสำคัญในการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่น ๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือที่อาจมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวพรทิพย์ ก้านสันเทียะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics).....	5
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.1.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.1.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	8
2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	9
2.1.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน.....	9
2.1.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป.....	9
2.1.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	9
2.1.4.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	10
2.1.4.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	10
2.1.4.6 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	10
2.2 แป้ง (Starch).....	11
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง.....	11
2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	11
2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose).....	12
2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin).....	13
2.2.2.3 สารตัวกลาง.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง	14
2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	14
2.4 สมบัติของแป้ง.....	15
2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย	15
2.4.2 การเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้ง (Gelatinization).....	16
2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation).....	18
2.5 แป้งดัดแปร (Modified starch).....	18
2.5.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร.....	18
2.5.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification).....	18
2.5.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)	21
2.5.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ.....	21
2.5.2 คำศัพท์ที่พบบ่อยในการดัดแปร.....	21
2.6 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch).....	22
2.6.1 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง	23
2.6.2 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	23
2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	24
2.8 กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde).....	26
2.9 แป้งดัดแปรสองขั้นตอน (Dual-modified starch).....	28
2.10 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	28
2.10.1 กลีเซอรอล (Glycerol)	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 สารเคมี	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.3 การทดลอง.....	40
3.3.1 การเตรียมแป้งออกซิไดส์.....	40
3.3.2 การเตรียมแป้งครอสลิงค์.....	40
3.3.3 การเตรียมแป้งดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน-การเชื่อมโยง.....	41
3.3.4 การเตรียมแป้งดัดแปรสองขั้นตอนโดยการเชื่อมโยง-การออกซิเดชัน.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.5 การเตรียมฟิล์มแข็ง.....	41
3.4 การทดลอง.....	43
3.4.1 การหาจำนวนหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl content).....	43
3.4.2 การหาจำนวนหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl content).....	44
3.4.3 การหาองค์การเชื่อมโยง ด้วยเครื่องวัดความหนืดของแข็ง.....	44
3.4.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	45
3.4.5 การหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย.....	45
3.4.6 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	46
3.4.7 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	46
3.4.8 การทดสอบการบวมตัว (Swelling).....	46
3.4.9 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)	47
3.4.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	47
3.4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	48
3.4.12 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)	48
3.4.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis).....	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	50
4.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการตัดแปรง.....	52
4.2 การทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล และองค์การเชื่อมโยง	54
4.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)	60
4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	74
4.4.1 สัณฐานวิทยาของเม็ดแข็ง	74
4.4.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแข็ง	78
4.5 การทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Averaged molecular weight)	83
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA).....	86
4.7 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	98
4.8 การทดสอบการบวมตัว (Swelling).....	103
4.9 การดูดซับความชื้น (Moisture absorption).....	109
4.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	116
4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	128
5.1 สรุปผลการวิจัย	128
5.2 ข้อเสนอแนะ	130
เอกสารอ้างอิง	132
ภาคผนวก	140
ประวัติผู้เขียน.....	182

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	12
2.2 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ.....	17
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	23
2.4 สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	24
2.5 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	25
2.6 สมบัติทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์	27
2.7 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์	27
2.8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล	29
2.9 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลีเซอรอล	30
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง ทรายปาลามังกร	36
3.2 อัตราส่วนของแป้งตัดแปรที่เตรียม	42
3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้	48
4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	50
4.2 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งออกซิไดส์สูตรต่างๆ	55
4.3 ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร และแป้งครอสลิงค์ สูตรต่างๆ	55
4.4 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ ตัดแปร และแป้งตัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูตรต่างๆ.....	56
4.5 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ ตัดแปร และแป้งตัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตรต่างๆ.....	56
4.6 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	57
4.7 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	57
4.8 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน.....	58
4.9 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน.....	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.23	พื้นที่ได้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ได้กราฟของพีคในฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน.....	72
4.24	พื้นที่ได้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ได้กราฟของพีคในฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน.....	72
4.25	ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและแบงก์ออกซิไดส์สูตรต่างๆ.....	83
4.26	ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและแบงก์ครอสลิงค์สูตรต่างๆ.....	84
4.27	ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูตรต่างๆ.....	84
4.28	ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตรต่างๆ.....	85
4.29	เปรียบเทียบความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน.....	85
4.30	เปรียบเทียบความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน.....	86
4.31	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและแบงก์ตัดแปรสูตรต่างๆ....	90
4.32	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแบงก์ตัดแปรสูตรต่างๆ.....	94
4.33	เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างแบงก์ออกซิไดส์-ครอสลิงค์และแบงก์ครอสลิงค์-ออกซิไดส์.....	95
4.34	เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของฟิล์มจากแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างฟิล์มจากแบงก์ออกซิไดส์-ครอสลิงค์และฟิล์มจากแบงก์ครอสลิงค์-ออกซิไดส์.....	96
4.35	เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแบงก์ตัดแปรสองชั้นตอนทั้งแบงก์ออกซิไดส์-ครอสลิงค์และแบงก์ครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน.....	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ทั้งฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์และฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	97
4.37 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทั้ง แป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์และแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ ที่แตกต่างกัน	97
4.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ทั้งฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์และฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่ต่างกัน	97
4.39 ปริมาณผลึกของฟิล์มจากแป้งดัดแปรต่างๆ	102
4.40 เพอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสูตรต่างๆ ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน.....	122
ข.1 ปริมาตรของขูดพิกโนและความหนาแน่นของสารละลาย.....	155
ข.2 เวลาในการทดสอบความหนืดของสารละลาย.....	156
ข.3 ความหนืดสัมพัทธ์ของสารละลาย.....	156
ข.4 ความหนืดจำเพาะของสารละลายและค่า η_{sp}/C ของสารละลาย.....	157
จ.1 เพอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซิไดส์ และแป้งโครสลิงค์สูตร ต่างๆ เป็นระยะเวลาต่างๆ.....	177
ฉ.1 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซิไดส์ และแป้งโครสลิงค์สูตรต่างๆ เป็นระยะเวลา 10 วัน	178
ฉ.2 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตรต่างๆ เป็นระยะเวลา 10 วัน.....	179
ช.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ.....	180
ช.1 สมบัติเชิงกลหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน ของฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ.....	181

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการย่อยสลาย.....	7
2.2 วัฏจักรของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
2.3 โครงสร้างของอะไมโลส	12
2.4 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส	13
2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	13
2.6 (ก) โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง แบบ A และ B (ข) X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้าง- ผลึก A, C และ B	15
2.7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม.....	16
2.8 ระยะในการเกิดเจลลาทีนในเซชันของเม็ดแป้ง	17
2.9 ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมในหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส	21
2.10 โครงสร้างของกลูตารัลดีไฮด์.....	26
2.11 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล	29
3.1 แผนภาพการเตรียมแป้งตัดแปรต่างๆ	38
3.2 แผนภาพการเตรียมฟิล์มจากแป้งตัดแปรต่างๆ	39
4.1 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อเกิดการออกซิเดชันแป้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	53
4.2 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อเกิดการเชื่อมโยงแป้งด้วยกลูตารัลดีไฮด์	53
4.3 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อตัดแปรแป้งสองชั้นโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์.....	54
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NS (ข) 5% OS (ค) 10% OS และ (ง) 20% OS.....	61
4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF.....	62
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NS (ข) 1% CS (ค) 2% CS, (ง) 3% CS และ (จ) 4% CS.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF, (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF	65
4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการ เชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NS (ข) 10% OS-1% CS (ค) 10% OS-4% CS (ง) 20% OS-1% CS (จ) 1% CS-10% OS (ฉ) 1% CS-20% OS และ (ช) 4% CS-10% OS	66
4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน และการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF.	67
4.10 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 5% OS (ค) 10% OS และ (ง) 20% OS.....	74
4.11 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 1% CS (ค) 2% CS, (ง) 3% CS และ (จ) 4% CS.....	76
4.12 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน และการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 10% OS-1% CS (ค) 10% OS-4% CS (ง) 20% OS-1% CS (จ) 1% CS-10% OS (ฉ) 1% CS-20% OS และ (ช) 4% CS-10% OS	77
4.13 ลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF	78
4.14 ลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF	79
4.15 ลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรสองขั้นตอนโดยการ ออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG	87
4.17 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG	88
4.18 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) TG และ (ข) DTG.....	89
4.19 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG	91
4.20 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG.....	92
4.21 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) TG และ (ข) DTG.....	93
4.22 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF	99
4.23 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF, (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF	101
4.24 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF	101
4.25 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน.....	103
4.26 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน.....	104
4.27 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (เส้นกราฟสีดำ) และ ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (เส้นกราฟสีแดง)	106
4.29 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	107
4.30 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	107
4.31 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน	108
4.32 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน	108
4.33 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน	110
4.34 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน	111
4.35 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ.....	112
4.36 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (เส้นกราฟสีดำ) และ ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (เส้นกราฟสีแดง)	113
4.37 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	113
4.38 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	114
4.39 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน	115
4.40 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	119
4.42 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	120
4.43 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	121
4.44 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	125
4.45 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	126
4.46 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	127
ก. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร.....	141
ก. 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 5% OS.....	141
ก. 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS	142
ก. 4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 20% OS	142
ก. 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS.....	143
ก. 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 2% CS.....	143
ก. 7 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 3% CS.....	144
ก. 8 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 4% CS.....	144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก. 9 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS-1% CS	145
ก. 10 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS-4% CS	145
ก. 11 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 20% OS-1% CS	146
ก. 12 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS-10% OS	146
ก. 13 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS-20% OS	147
ก. 14 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 4% CS-10% OS	147
ก. 15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร.....	148
ก. 16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 5% OSF.....	148
ก. 17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 10% OSF.....	149
ก. 18 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 20% OSF.....	149
ก. 19 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์สูตร 1% CSF	150
ก. 20 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์สูตร 2% CSF	150
ก. 21 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์สูตร 3% CSF	151
ก. 22 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์สูตร 4% CSF	151
ก. 23 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF	152
ก. 24 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF	152
ก. 25 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF	153
ก. 26 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF	153
ก. 27 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 1% CS-20% OSF	154
ก. 28 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนสูตร 4% CS-10% OSF	154
ข. 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{sp} และ C	157
ค.1 เทอร์โมแกรมของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร	158
ค.2 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 5% OS	158
ค.3 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS	159
ค.4 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 20% OS	159
ค.5 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS.....	160
ค.6 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 2% CS.....	160
ค.7 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 3% CS.....	161
ค.8 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 4% CS.....	161

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.9 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS-1% CS	162
ค.10 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS-4% CS	162
ค.11 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 20% OS-1% CS	163
ค.12 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS-10% OS	163
ค.13 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS-20% OS	164
ค.14 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 4% CS-10% OS	164
ค.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร	165
ค.16 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 5% OSF.....	165
ค.17 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 10% OSF	166
ค.18 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 20% OSF	166
ค.19 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 1% CSF	167
ค.20 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 2% CSF	167
ค.21 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 3% CSF	168
ค.22 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 4% CSF	168
ค.23 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF	169
ค.24 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF	169
ค.25 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF	170
ค.26 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF	170
ค.27 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 1% CS-20% OSF	171
ค.28 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 4% CS-10% OSF	171
ง.1 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร	172
ง.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 5% OSF	172
ง.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 10% OSF	172
ง.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 20% OSF	173
ง.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 1% CSF	173
ง.6 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 2% CSF	173
ง.7 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 3% CSF	174
ง.8 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 4% CSF	174
ง.9 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF	174

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.10 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF	175
ง.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF	175
ง.12 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF	175
ง.13 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-20% OSF	176
ง.14 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 4% CS-10% OSF	176

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และราคาถูก จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตเป็นอุปกรณ์ เครื่องมือหรือเครื่องใช้ต่างๆ ปริมาณการใช้งานพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ยาก และยากต่อการกำจัด เมื่อนำไปกำจัดด้วยการเผา ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ส่งผลเสียต่อร่างกายมนุษย์และทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาของขยะพลาสติกที่กำจัดได้ยาก โดยแป้งเป็นวัตถุดิบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ เนื่องจากหาได้ง่าย สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ราคาถูก นำมาผลิตเป็นพลาสติกได้ และย่อยสลายได้ แต่ข้อจำกัดของพลาสติกที่ทำมาจากแป้ง คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ มีความเปราะ และดูดซับน้ำสูง [1]

จากข้อจำกัดของพลาสติกที่ทำมาจากแป้ง จึงเกิดการดัดแปรแป้งเกิดขึ้น โดยแป้งดัดแปร (Modified starch) เป็นแป้งที่ผ่านการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้มีสมบัติทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ตามที่ต้องการ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างนั้นทำได้ด้วยการให้ความร้อน ใช้เอนไซม์ หรือสารเคมีต่างๆ กับแป้ง โดยแป้งดัดแปรทางเคมีมีหลายชนิด ได้แก่ แป้งแอซิเตต (Starch acetate) แป้งไฮดรอกซีเอทิล (Hydroxyethyl starch) แป้งที่ดัดแปรโดยใช้กรด (Acid-modified starch) แป้งครอสลิงค์ (Crosslinked starch) และ แป้งออกซิไดส์ (Oxidized starch) เป็นต้น [2]

แป้งออกซิไดส์ (Oxidized starch) เป็นการดัดแปรแป้งโดยการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดส์ โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเป็นหมู่คาร์บอนิล และหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งการเกิดออกซิเดชันนั้น ทำให้มีการตัดโมเลกุลของแป้ง ส่งผลให้ความหนืดต่ำลง สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ง่ายขึ้น อีกทั้งเกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวเพิ่มขึ้น [2-3]

นอกจากนี้แป้งครอสลิงค์ (Crosslinked starch) เป็นแป้งที่เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้ง โดยพันธะที่เกิดขึ้นนั้นช่วยเสริมให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน แรงเฉือน และลดการพองตัวของเม็ดแป้ง [2]

แป้งออกซิไดส์ และแป้งครอสลิงค์ที่ได้กล่าวไปนั้นถือว่าเป็นแป้งดัดแปรทางเคมีชั้นตอนเดียว (Single-modified starch) โดยข้อดีของการดัดแปรแป้งทางเคมีชั้นตอนเดียวด้วย

การออกซิเดชัน (Oxidation) คือ อัตราการคืนตัวของแป้งเปียกลดลง มีความหนืดที่ต่ำลง และมีความใสมากขึ้น มีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างการออกซิเดชัน [2] จึงทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น แต่ทำให้มีความเป็นผลึกและเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดต่ำลง ส่วนข้อดีของแป้งที่ดัดแปรทางเคมีขึ้นตอนเดียวด้วยการเชื่อมโยง (Crosslinking) ส่งผลให้ความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน ความทนทานต่อการละลายน้ำ และความสามารถในการบวมตัวนั้นเพิ่มขึ้น แต่ข้อเสีย คือ มีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแป้ง [4-5]

จากข้อดีและข้อเสียของแป้งที่ดัดแปรขึ้นตอนเดียวนั้น ทำให้แป้งดัดแปรสองชั้นตอน (Dual-modified starch) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในการช่วยขจัดข้อบกพร่องบางประการของแป้งดัดแปรเพียงชั้นตอนเดียวและเพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้การใช้งานของแป้งที่ดัดแปรสองชั้นตอนครอบคลุมมากยิ่งขึ้น [6]

จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า ได้มีการศึกษาผลของการดัดแปรแป้งข้าวสาลีด้วยโซเดียมไฟเตท (Sodium phytate) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) [6] โดยใช้โซเดียมไฟเตทเป็นสารเชื่อมโยง และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ พบว่าแป้งดัดแปรสองชั้นตอนมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติเนชันสูงกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์นั้นมีการบวมตัวน้อยที่สุด นอกจากนี้มีการศึกษาผลของแป้งบุกดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) เป็นสารออกซิไดส์ และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Sodium trimetaphosphate, STMP) เป็นสารเชื่อมโยง [7] พบว่าแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ที่ดัดแปรสองชั้นตอน มีความใสของแป้งสูง และความหนืดที่ดีขึ้น อีกทั้งมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติเนชันที่สูงกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการออกซิเดชันโดยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ เชื่อมโยงโดยอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) และแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรสองชั้นตอน [8] ซึ่งผลจากการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาพบว่า การเชื่อมโยงและการออกซิไดส์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีการบวมตัวและการละลายต่ำ อีกทั้งยังมีความสามารถในการทนทานต่อแรงเฉือนที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองชั้นตอนที่มีต่อฟิล์มแป้ง [9] โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ และใช้กรดบอริก (Boric acid) เป็นสารเชื่อมโยง จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ได้จากการดัดแปรแป้งสองชั้นตอนมีสมบัติเชิงกล การบวมตัว และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และฟิล์มจากแป้งที่ดัดแปรเพียงชั้นตอนเดียว และยังพบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งสูงกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบการศึกษาถึงการเตรียมฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

ซึ่งกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เป็นหมู่ไดอัลดีไฮด์ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์ได้ถึง 4 หมู่ [10] นอกเหนือจากนี้ อีกหนึ่งการใช้งานที่ได้รับความนิยมคือ การใช้ฆ่าเชื้อโรค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเตรียมแป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์และแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง และการเตรียมฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเทหล่อ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น วิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติความเป็นผลึก สมบัติการบวมตัว การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงที่เตรียมได้นั้นจะมีสมบัติในการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือต่อยอดในทางอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมแป้งออกซิไดส์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ และเตรียมแป้งครอสลิงค์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง โดยการตัดแปรขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน
- 2) เพื่อเตรียมฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง และทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมแป้งออกซิไดส์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง และเตรียมแป้งครอสลิงค์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1 2 3 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้งแห้ง โดยการตัดแปรขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน
- 2) เตรียมฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง
- 3) ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติความเป็นผลึก สมบัติการบวมตัว การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง
- 2) สามารถเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยง
- 3) ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่กำจัดได้ยากที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ส่งผลต่อปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ยิ่งปริมาณพลาสติกที่ใช้และขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาเพื่อกำจัดขยะพลาสติกนั้นยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงได้เกิดแนวคิดในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทน ซึ่งแบ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ด้วยข้อดีของแบ่งที่สามารถปลูกทดแทนขึ้นใหม่ได้ และยังสามารถใช้ได้ง่าย ราคาถูก แต่ด้วยข้อจำกัดของพลาสติกที่ผลิตมาจากแบ่ง จึงได้มีการนำแบ่งมาดัดแปรเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกที่ผลิตมาจากแบ่ง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้มากยิ่งขึ้น [7]

2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastics)

ในปัจจุบันพลาสติกที่ย่อยสลายได้เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นที่นิยมอย่างมาก แต่พลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่ผลิตออกมามีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ จึงมีหลายองค์กรที่ได้จัดทำมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเกิดขึ้นและให้คำนิยามของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ขึ้นมา ดังนี้

American society for testing and materials (ASTM) D6400-99 – พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้จากการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น รา แบคทีเรีย และสาหร่าย เป็นต้น

International organization for standardization (ISO) 472:1998 – พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ ส่งผลให้สมบัติบางประการนั้นแย่งลง ซึ่งตรวจสอบได้จากการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นนั้นต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

Biodegradable Plastics Society, Japan (BPS Japan) 1994 – พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบมวลโมเลกุลต่ำ โดยมีขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายอย่างน้อย 1 ขั้นตอนที่เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ

Deutsches Institut Fur Normung (DIN) FNK103.2 1994 – ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดในวัสดุพอลิเมอร์เกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการทดสอบมาตรฐานจึงจะเรียกวัสดุพอลิเมอร์นั้นว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้

European Committee for Standardization (CEN) 1993 – วัสดุที่ย่อยสลายได้ เป็น วัสดุที่เกิดการย่อยสลายจากกระบวนการของจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติ ส่งผลให้ในขั้นตอนสุดท้ายวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ มีเทน และมวลชีวภาพใหม่ [11]

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastic) คือ พลาสติกที่มักถูกเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงไป หรือทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง สามารถแตกหักได้ง่ายภายใต้สภาวะที่มีแสง เช่น มีหมู่คีโตนในโครงสร้างของพอลิเมอร์ เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสงจะทำให้เกิดการแตกของพันธะเคมีเกิดขึ้น กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่อได้อย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ แต่การย่อยสลายของพลาสติกประเภทนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานเฉพาะพลาสติกที่ต้องสัมผัสกับแสงโดยตรงเท่านั้น [2, 12]

2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) พลาสติกประเภทนี้มักเป็นพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) โดยมีหลักการสำคัญ คือ เกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยจะสามารถเกิดขึ้นได้เองอย่างช้าๆ ในธรรมชาติ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสง ความร้อน และออกซิเจน ส่งผลให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ [2, 12]

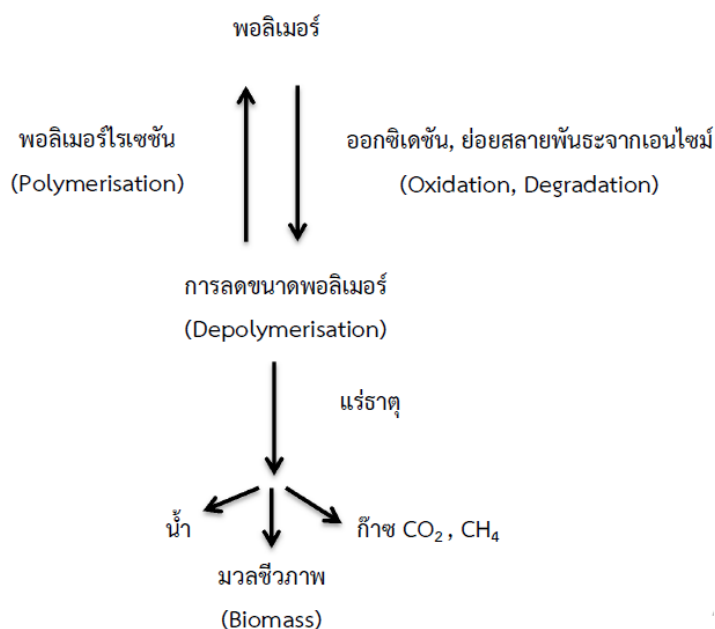
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic) คือ พลาสติกที่มีหมู่เอสเทอร์ (Ester groups) หรือเอไมด์ (Amide groups) อยู่ในโครงสร้างสามารถเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ เช่น แป้งพอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิยูรีเทน (Polyurethane) หรือ พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) [2, 12]

โดยประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1.แบบที่ใช้เร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น เอนไซม์เอสเทอร์เรส (Esterase) และเอนไซม์ไลเปส (Lipase) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkali metals) เบส และกรด ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ 2.แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl groups) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [2, 12]

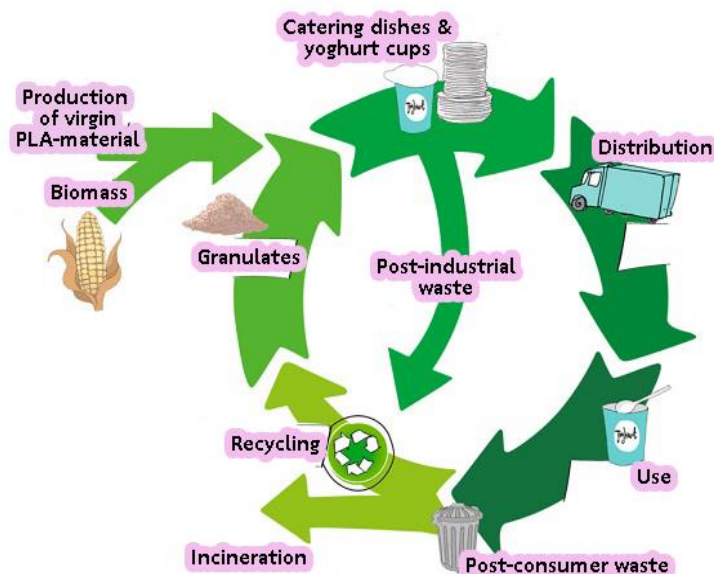
4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) คือ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ ทั้งในสภาวะที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ ได้เป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งจะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม โดยการย่อยสลายเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการย่อยสลายทำให้เกิดการแตกออกของโมเลกุล (Depolymerisation) ซึ่งเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบสุ่มและแบบตามลำดับโดยตัดพันธะจากมอนอเมอร์ที่ปลายสุดก่อน จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ การเปลี่ยนสารประกอบที่ได้จากการย่อยขั้นแรกเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP, ก๊าซ และชีวมวล (Biomass) [2]

2.1.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตรถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ จากนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จะทำการปรับปรุงสมบัติและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไป เมื่อหมดอายุการใช้งานหรือไม่เป็นที่ต้องการแล้วการนำไปทิ้งในสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้พลาสติกเหล่านี้ถูกย่อยสลายเป็นน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมวลชีวภาพ (รูปที่ 2.1) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช วนเวียนเป็นวัฏจักรเช่นนี้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนวัสดุที่ไม่สามารถรีไซเคิลหรือย่อยสลายได้จะถูกนำมาเผาเพื่อให้ได้พลังงาน [2, 13]



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการย่อยสลาย [2]



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [14]

2.1.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น

1. การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

ในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์เป็นด้านที่ได้รับความนิยมมากที่สุด มีการใช้งานพลาสติกเพื่อทดแทนวัสดุอื่นๆ หลายชนิด เช่น โลหะ กระดาษ ไม้ หรือแก้ว เนื่องจากพลาสติกนั้นมีราคาถูก และน้ำหนักเบา ส่งผลให้ปริมาณขยะที่เป็นพลาสติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและยังไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นพลาสติกที่ย่อยสลายได้จึงมีศักยภาพเพียงพอในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไป [15]

2. การใช้งานด้านการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำเทียม ไหมละลาย ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยด้วยซ้ำๆ อุปกรณ์ประสาทศัลยกรรม และแผ่นตามกระดูกที่ฝังอยู่ในร่างกาย โดยสามารถย่อยสลายได้เองหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น จึงไม่ต้องผ่าตัดซ้ำอีกครั่งเพื่อนำแผ่นตามกระดูกออก ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้ [16]

3. พลาสติกคลุมดินและวัสดุสำหรับการเกษตร

พลาสติกคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ โดยพลาสติกคลุมดินจะช่วยกักเก็บความชื้น ชะลอการระเหยของน้ำในดิน ทำให้พืชที่ต้องการความชุ่มชื้นได้รับน้ำอย่างเพียงพอและให้ผลผลิตที่คุ้มค่า อีกทั้งยังช่วยป้องกันวัชพืช การใช้ฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลัง

เสร็จสิ้นการใช้งาน สามารถกำจัดได้โดยไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม และยังช่วยลดขยะพลาสติกจากเกษตรกรรมและลมหวนในดินได้อย่างมาก นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร เป็นต้น [15]

2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

2.1.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์โดยจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่สามารถละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) หรือใช้การคำนวณน้ำหนักแห้ง สมมูลมวลคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ ดังนี้ [2]

$$C_d = C_g + C_s + C_m \quad (2.1)$$

เมื่อ	C_d	คือ คาร์บอนที่ถูกย่อยสลาย
	C_g	คือ คาร์บอนในสถานะก๊าซ
	C_s	คือ คาร์บอนที่ละลายได้
	C_m	คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\%f = \frac{C_d}{C_i} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	C_i	คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนย่อยสลาย
-------	-------	--

2.1.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก หรือการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป ทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณที่สูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งในปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถย่อยสลายได้ในสถานะที่มีออกซิเจน [2]

2.1.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

- การใช้กล้องจุลทรรศน์

นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือน มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ เมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายไปแล้วด้วยจุลินทรีย์ [2]

- การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูง ได้ภาพออกมาในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่า พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ที่มีการฝังไว้ในดินมีขนาดเล็ก มีจุดสีดำ และเป็นทางสีขาว เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [2]

2.1.4.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไประหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ในขณะที่จุลินทรีย์ย่อยแป้ง จะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวพอลิเมอร์ โดยที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด [2]

2.1.4.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

- การวิเคราะห์ด้วย DSC พบว่า ในระหว่างการย่อยสลายลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนที่เป็นอสัณฐานนั้นจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก [2, 12]

- การวิเคราะห์ด้วย TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว โดยมีการศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ซึ่งจะวิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย [2]

2.1.4.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบโดยการฝังดินต้องเตรียมชิ้นงานที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 ตารางมิลลิเมตร จำนวนหลายตัวอย่าง จากนั้นทำการฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดชิ้นงานออกมา โดยการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างจะต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะขาดและกระจายหายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ [2]

2.2 แป้ง (Starch)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสทั้งหมด แป้งมีลักษณะเป็นผงสีขาว โดยเม็ดแป้งมีขนาด 1-100 ไมครอน ซึ่งขนาด รูปร่าง และลักษณะของเม็ดแป้งนั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ แป้งจัดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าว ก๋วยเตี๋ยว พาสต้า และขนมปัง เป็นต้น [2]

ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำแป้งมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุป และน้ำปรุงรสอาหาร ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) สภาวะกรด การทำพาสเจอไรเซชัน (Pasteurization) และสเตอริไรเซชัน (Sterilization) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมแป้งตัดแปร [2]

แป้งในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อยู่เล็กน้อย ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไป ที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) แต่เมื่อสกัดสิ่งเจือปน อันได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่นๆ ออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็น แป้งสตาร์ช (Starch) และเนื่องจากแป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่า แป้งดิบ (Raw starch หรือ Native starch) ส่วนแป้งที่มีการตัดแปรหรือแปรรูปแล้ว เรียกว่า แป้งตัดแปร (Modified starch) [2]

2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง

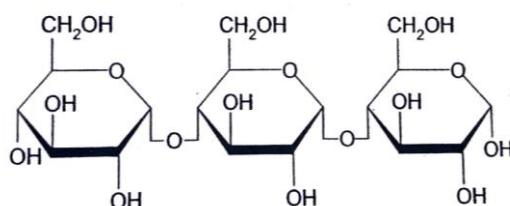
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ซึ่งแป้งประกอบไปด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาไกลูโคซิดิก (α -glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (Reducing end group) ซึ่งวางอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติรีดิวซิง (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่งหมู่ปลาย 1 ตำแหน่ง โดยแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ซึ่งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง เช่น สารตัวกลาง โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส และเถ้า [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [2]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1.ลักษณะโครงสร้าง	เส้นตรง และมีกิ่งเล็กน้อย	กึ่งก้าน
2.พันธะที่จับ	α -1, 4	α -1, 4 และ α -1, 6
3.ขนาด	200–2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
4.การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
5.การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
6.การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α -1, 4) และอาจมีโซ่กิ่งในโมเลกุลของอะไมโลสในปริมาณเล็กน้อย [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



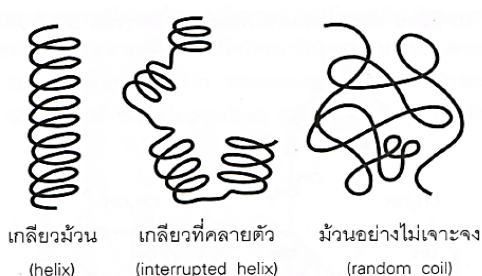
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส [2]

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวฟ่าง แป้งสาลี และแป้งข้าวโพด มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แต่แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาคู มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคือ 20% ส่วนแป้งข้าวเหนียวนั้นจะไม่มีอะไมโลสเลย น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งนั้นอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักแตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีองศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกันไป โดยแป้งที่มีโมเลกุลอะไมโลสที่ยาวขึ้น หรือมี DP ของอะไมโลสที่สูงมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง [2]

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) จากการศึกษาการเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบว่า อะไมโลสอยู่ในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะไมโลสที่มี

ขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง [2]

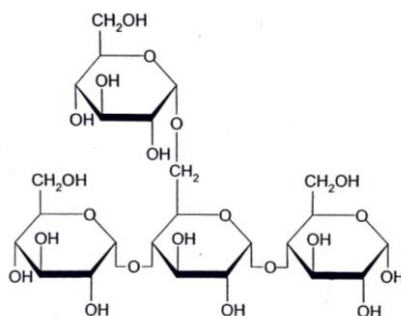
โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิด อะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ [2]



รูปที่ 2.4 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [2]

2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส เป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสตั้งแต่หนึ่งหมื่นถึงสิบล้านหน่วย [17] โดยส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 4 และส่วนที่เป็นสายโซ่กิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [2]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [2]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างที่มีกิ่งสาขาในปริมาณมาก ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง [2, 12]

2.2.2.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลางเป็นองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคติน แต่มากกว่าอะไมโลส และพบว่ามีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพคติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ซึ่งปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นกับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช โดยจะมีองค์ประกอบนี้เพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิดเท่านั้น [2]

2.2.2.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

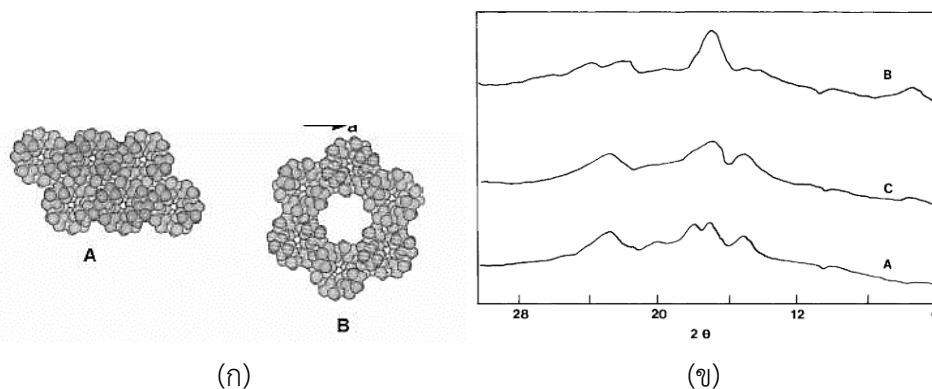
ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง นอกเหนือจาก 3 องค์ประกอบที่ได้กล่าวไปข้างต้น แบ่งได้ดังนี้

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) เช่น ผงเซลลูโลส ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง และโปรตีนที่ไม่ละลาย
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์ (Amyloplast)
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal component) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมูฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจน

2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) และส่วนที่ไม่เป็นผลึก ที่เรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helices) บางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน โดยเม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้าง 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ในกรณีที่เกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดผลึกแบบ A เช่น แป้งจากธัญพืชต่างๆ ถ้าเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B เช่น แป้งจากพืชหัว ส่วนกรณีที่มีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B ผสมกันจะจัดเป็นผลึกแบบ C เช่น แป้งจากตระกูลถั่ว และสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V ซึ่งแป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้ง

มันสำปะหลัง ตรวจพบผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติ (Treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น การบ่มแป้งมันฝรั่งที่ขึ้นเป็นเวลานาน โดยใช้อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส, 30 นาที : Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนไปเป็นชนิด A จากเดิมที่เป็นชนิด B [2]



รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง แบบ A และ B (ข) X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึก A, C และ B [2, 18]

2.4 สมบัติของแป้ง

2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

แป้งเมื่อเติมน้ำและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งแป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% [2]

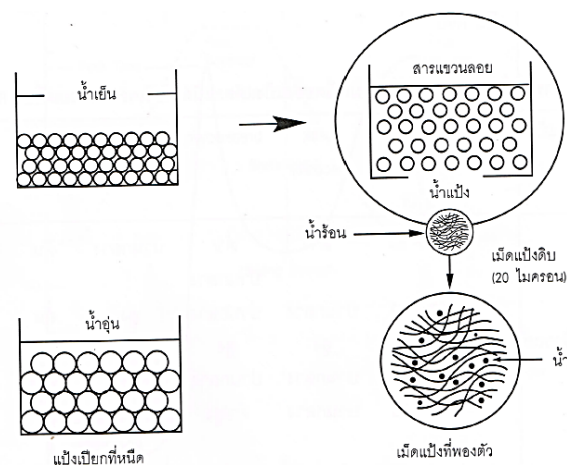
น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นที่สูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะทำให้ได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [2]

ของเหลวสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ เนื่องจากเม็ดแป้งนั้นประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (Molecular sieve) รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง [2]

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารผสมน้ำแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง ลักษณะร่างแหในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรทางเคมี เป็นต้น [2]

2.4.2 การเกิดเจลลาทีไนเซชันของแป้ง (Gelatinization)

การเกิดเจลลาทีไนเซชันของแป้งนั้นเกี่ยวข้องกับการหลอมของเม็ดแป้งในน้ำภายใต้การให้ความร้อน [19] โดยโมเลกุลของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของไมเซลล์ ทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงและถูกทำลาย ส่งผลให้เม็ดแป้งดูดน้ำและพองตัวจากการที่น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดและความใสที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization) โดยอุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาทีไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด [2]



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [2]

ตารางที่ 2.2 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ [20]

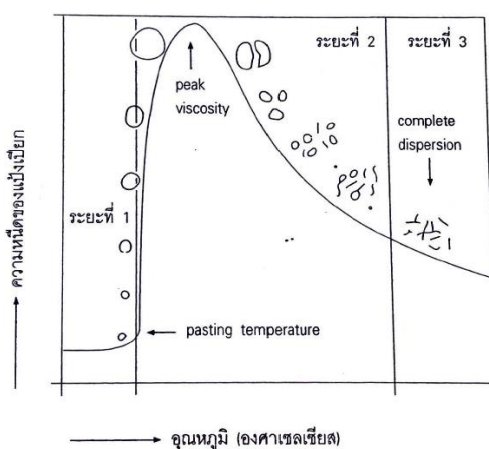
ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิการเกิดเจลลาคีในเซชัน (°C)
แป้งมันสำปะหลัง	58-70
แป้งข้าวโพด	62-73
แป้งมันฝรั่ง	56-67
แป้งข้าวเจ้า	68-78
แป้งข้าวสาลี	58-64
แป้งข้าวฟ่าง	68-78
แป้งมันเทศ	58-72
แป้งท้าวยายม่อม	62-70

การเกิดเจลลาคีในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่

1. ระยะที่ 1 เป็นระยะที่เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนสังเกตเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้เมื่อใส่สารเคมี หรือเพิ่มอุณหภูมิแก่สารละลายน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาคีในเซชัน

2. ระยะที่ 2 เป็นระยะที่เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ทำให้เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลลาคีในเซชัน ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

3. ระยะที่ 3 เป็นระยะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิต่อจากระยะที่ 2 โดยรูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล [2]



รูปที่ 2.8 ระยะในการเกิดเจลลาคีในเซชันของเม็ดแป้ง [2]

2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวเพิ่มมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) โดยเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกจะมีการจัดเรียงโครงสร้างที่แน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Synresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น [2]

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการคืนตัวของแป้งมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง เป็นต้น โดยพบการคืนตัวสูงและเร็วในแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ส่วนอะไมโลเพคตินเกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันออกไป [2, 21]

2.5 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดัดแปร หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาเปลี่ยนสมบัติโดยผ่านกระบวนการทางเคมีหรือทางกายภาพ โดยการใช้ความร้อน เอนไซม์ หรือสารเคมี เพื่อเป็นการปรับสมบัติบางประการให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป เช่น ทำให้มีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น สามารถทนต่อสภาวะการผลิตได้ดี มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น มีความคงตัวในการคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.5.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

สามารถแบ่งประเภทของแป้งดัดแปรได้หลายประเภท ในที่นี้จะแบ่งประเภทตาม BeMiller ซึ่งเสนอไว้ดังนี้

2.5.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

แบ่งออกเป็น

1. การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีบางประเภทในสภาวะเบส โดยทั่วไปแป้งอนุพันธ์มักจะมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งปกติ เช่น การพองตัว การละลาย และความทนต่อการคืนรูปเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลลดต่ำลง ความหนืดมากขึ้นหรือน้อยลง เป็นต้น โดยสามารถแบ่งแป้งอนุพันธ์ได้ 3 ประเภท ดังนี้

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อีเทอร์ ได้แป้งดัดแปรที่เรียกว่า แป้งอีเทอร์ สมบัติของแป้งที่ได้คือ เกิดการคืนตัวน้อยลง อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันต่ำลง ทำให้แป้งสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น แป้งเปียกมีความเหนียว คงตัว และยึดติดได้ดี มีความต้านทานต่อกรด เบส และสารออกซิไดส์ (Oxidizing agent) เมื่อนำไปทำฟิล์มส่งผลให้ตัวฟิล์มที่ได้มีความใส ยืดหยุ่น และมันเงามากขึ้น อีกทั้งยังได้แผ่นฟิล์มที่มีความต่อเนื่อง และละลายน้ำได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งตัวอย่างของแป้งชนิดนี้ ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีอัลคิล (Hydroxyalkyl starch) หรือ แป้งไม่มีประจุ แป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl starch) หรือ แป้งประจุลบ และแป้งแคทไอออนิก หรือ แป้งประจุบวก [2, 22-23]

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับกรดคาร์บอกซิลิกชนิดต่างๆ หรือเตรียมโดยอ้อมจากการทำปฏิกิริยาของแป้งกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น เอสเทอร์ แอนไฮไดรด์ (Anhydrides) และเอซิลคลอไรด์ (Acyl chlorides) โดยสมบัติของแป้งเอสเทอร์จะมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเจลจะมีความใส ความอ่อนตัวและยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะในการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง ซึ่งแป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ทางการค้า ได้แก่ แป้งแอสซิเทท (Starch acetate) และแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Starch phosphate monoester) [2]

- แป้งเชื่อมโยง (Cross-linked starch) เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกสารเคมีนั้นว่า สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) อาจเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชันหรือเอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้มากกว่า 1 หมู่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับสารแขวนลอย พันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง โดยเมื่อเพิ่มระดับการเชื่อมโยง ความแข็งแรงของเม็ดแป้งก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง มีความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน เพิ่มความหนืดของแป้งเปียกที่ร้อน อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นที่มีความหนืดสูง โดยโครงสร้างภายนอกของเม็ดแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลง [2]

2. แป้งที่ดัดแปรโดยใช้กรด (Acid-modified starch) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือหรือกรดกำมะถัน เกิดการตัดโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลของแป้งเล็กลงเพื่อให้ได้ความหนืดที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง แต่มีความหนืดขณะร้อนที่ต่ำกว่าแป้งดิบ ทำให้สามารถใช้แป้งได้ในปริมาณที่มากขึ้น เมื่อคืนตัวจะได้เจลที่แข็ง สามารถยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งแป้งชนิดนี้นิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตลูกกวาด อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ใช้ในการเคลือบเส้นด้าย และอุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เคลือบกระดาษเพื่อกันไม่ให้หมึกซึมผ่าน เป็นต้น [2]

3. เดกซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งแห้งที่มีลักษณะเป็นกรด โดยแป้งจะเกิดการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ ซึ่งสมบัติที่สำคัญที่เกิดขึ้นคือสามารถละลายในน้ำเย็นได้เพิ่มมากขึ้น มีความหนืดในขณะร้อนลดลง เมื่อนำไปผลิตฟิล์มจะได้ฟิล์มที่มีสมบัติการยึดเกาะมากกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกครีมเทียม ลูกกวาด ชูปังสำเร็จรูป เป็นต้น [2, 24]

4. แป้งออกซิไดส์ (Oxidized starch) เป็นแป้งที่ผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (Calcium hypochlorite) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดแบบสุ่มที่ 4 ตำแหน่ง ได้แก่

-เกิดการออกซิเดชันที่ตำแหน่ง Aldehydic reducing end groups ของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน เปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล

-เกิดการออกซิเดชันที่ตำแหน่งไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 เปลี่ยนไปเป็นหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde) ในตอนแรก ต่อจากนั้นถูกออกซิไดส์ต่อได้หมู่คาร์บอกซิล

-เกิดการออกซิเดชันที่ตำแหน่งไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 เปลี่ยนไปเป็นหมู่คีโตน (Ketone)

-เกิดการออกซิเดชันที่หมู่ไกลคอล (Glycol groups) เปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ และสามารถถูกออกซิไดส์ต่อได้อีกเป็นหมู่คาร์บอกซิล

โดยแป้งออกซิไดส์ที่ได้ จะเป็นประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุล ทำให้อัตราคินตัวของแป้งเปียก และความหนืดลดต่ำลง เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแป้งขาวขึ้น และเมื่อนำไปทำฟิล์มพบว่า ฟิล์มมีความใสที่เพิ่มมากขึ้น และการละลายน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากสมบัติชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดระหว่างการออกซิเดชัน การนำใช้งานมีทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ลูกอม น้ำสลัด ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้เป็นสารยึดเกาะเพื่อเคลือบกระดาษ และยังมีการใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝ้าผนัง กระเบื้อง ฉนวน [2-3]

5. การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ การตัดแปรประเภทนี้ทำได้โดยการผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้มีหลายชนิด เช่น กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) เบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยภายนอก (Exo-enzyme) ส่วนอัลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) เป็นเอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-enzyme) ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะตัดพันธะ α -1, 4 เท่านั้น ไม่สามารถตัดพันธะ α -1, 6 ได้ [2, 22-23]

2.5.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

1. แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch) หรือแป้งพรีเจลาทีไนซ์ ในทางการค้าเรียกว่า อัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งเพื่อทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจล แล้วทำให้แห้งก่อนนำไปบดให้ละเอียด แป้งพรีเจลที่ได้สามารถละลายได้ในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่สามารถละลายให้ความหนืดได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้ความร้อน เช่น น้ำเกรวี่ ซอส ขนมพุดดิ้ง [2]

2. แป้งละลายน้ำเย็น เป็นแป้งที่ดัดแปรด้วยการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และเบส ทำให้แป้งที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น มันเงา และมีความแข็งแรงมากกว่าแป้งพรีเจล [2]

3. การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล เนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งมีผลต่อสมบัติหลายประการของตัวเม็ดแป้งเอง เช่น การละลาย การพองตัว เป็นต้น ตัวอย่างการลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกลสามารถทำได้โดยวิธีการโม่ด้วยลูกบอล (Ball mill) [2]

4. การใช้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนเซชัน โดยปกติจะทำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงของผลึก [2]

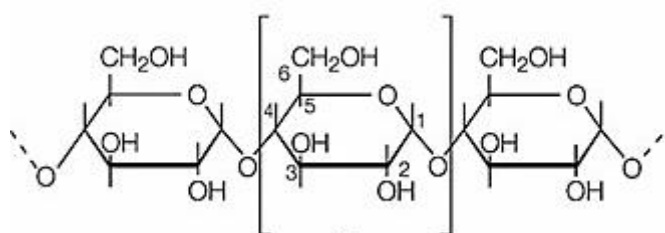
5. การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น เป็นการให้ความร้อนสูง โดยจำกัดปริมาณน้ำ ทำให้ลักษณะและสมบัติของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลง เช่น โครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งบางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างผลึกแบบ B เปลี่ยนเป็นแบบ A ซึ่งทำให้สมบัติความร้อนและความหนืดนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [2]

2.5.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification)

เป็นการดัดแปรโดยนำเทคโนโลยีทางชีวภาพและพันธุวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้เพื่อให้แป้งที่ได้นั้นมีสมบัติตามความต้องการหรือให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงพันธุ์พืชที่จะนำมาผลิตแป้ง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งชนิดที่มีอะไมโลสสูง (High amylose starch) และ แป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว (Waxy starch) [2]

2.5.2 คำศัพท์ที่พบบ่อยในการดัดแปรแป้ง

1. ตำแหน่งของคาร์บอน (C) ในหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมในหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส [25]

ตัวเลขที่กำกับในแต่ละตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนในหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสนั้นมีไว้เพื่อประกอบการอธิบายในการเข้าทำปฏิกิริยาหรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ทำให้สามารถเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

2. องศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP)

หมายถึง จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในสายโซ่ ใช้คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ในหัวข้อเรื่องที่เกี่ยวข้องกับแป้งสามารถอธิบายได้ว่า DP คือ จำนวนโดยเฉลี่ยของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ต่อ 1 สายโซ่โมเลกุล [26]

3. ระดับการแทนที่ (Percent substitution)

หมายถึง ระดับการแทนที่ของสารที่เข้าไปทำปฏิกิริยาและจับกับเม็ดแป้ง ซึ่งแสดงในรูปของน้ำหนักของสารที่เข้าไปจับหรือแทนที่ในเม็ดแป้งเป็นหน่วย เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง

4. องศาการแทนที่ (Degree of substitution, DS)

หมายถึง จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ ได้แก่ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งค่าสูงสุดของ DS มีค่าเท่ากับ 3 ในกรณีที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ 3 หมู่ จะมีค่า DS เท่ากับ 3 ถ้าถูกแทนที่ 2 หมู่ จะมีค่า DS เท่า 2 และถ้าถูกแทนที่เพียง 1 หมู่ จะได้ค่า DS เท่ากับ 1 โดยค่านี้จะบ่งบอกเพียงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น ไม่ได้บ่งบอกตำแหน่งที่ถูกแทนที่ และค่า DS จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยทั้งกลุ่มโมเลกุล [2]

5. สมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose equivalent)

หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง เมื่อใช้วิธีตรวจวัดโดยวิธีรีดักชัน (Reduction) แสดงเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ในอุตสาหกรรมน้ำเชื่อมกลูโคสนิยมใช้วิธีรีดักชันเป็นตัวตรวจวัดความสามารถในการย่อย เนื่องจากกลูโคสสามารถทำปฏิกิริยารีดักชันได้ที่ตำแหน่งปลายรีดิวซิง (Reducing end group) [2]

2.6 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ได้มาจากส่วนรากหรือส่วนหัวของต้นมันสำปะหลัง โดยมีชื่อเรียกสามัญที่หลากหลายแตกต่างกันไปตามพื้นที่ต่างๆ เช่น Yucca นิยมเรียกในแถบอเมริกากลาง, Mandioca หรือ Manioca นิยมเรียกในประเทศบราซิล, Tapioca นิยมเรียกในประเทศอินเดียและมาเลเซีย และ Cassava หรือ Cassada นิยมเรียกในแถบแอฟริกาและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนชื่อวิทยาศาสตร์ของแป้งมันสำปะหลังคือ *Manihot esculenta* L. [27]

มันสำปะหลังจัดเป็นไม้พุ่ม ที่เป็นพืชยืนต้น สามารถเพาะปลูกได้ง่าย แต่ส่วนหัวหรือรากของมันสำปะหลังนั้นจะเติบโตได้ดีในดินร่วน ซึ่งรากเป็นส่วนที่สะสมอาหาร มีลักษณะเป็นแท่งหนาอยู่ใต้ดินมีประมาณ 5-10 รากต่อต้น เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะทำการ

สะสมคาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้งไว้ในราก โดยความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในรากนั้น จะมีความแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของมันสำปะหลัง ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว อายุการเก็บเกี่ยว และปัจจัยด้านอื่นๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังมีความแตกต่างกันออกไป [27-28]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [29]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
อะไมโลส	18.6-23.6
อะไมโลเพคติน	76.4-81.4
ไขมัน	0.1
ไนโตรเจน	0.009-0.0131
ฟอสฟอรัส	0.001

2.6.1 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเป็นผงละเอียดสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน ไม่มีกลิ่น โดยลักษณะเด่นของแป้งชนิดนี้ คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ เมื่อทำให้สุก จะเหลวเหนียวหนืด เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียวคงตัว ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสะดวกและพร้อมที่จะนำไปใช้ผสมกับอาหารที่ต้องการความเหนียวหนืดใส รวมถึงใช้ผสมกับสารแต่งกลิ่นรสและสารแต่งสี นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอีกมากมาย [28]

2.6.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

การผลิตแป้งมันสำปะหลังจากหัวมันสำปะหลังที่มีการใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม มีขั้นตอนดังนี้ [2]

1. ทำการร่อนเศษดินและทรายออกจากหัวมัน จากนั้นล้างให้สะอาดผ่านเครื่องล้าง
2. ตัดหัวมันให้เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นทำการโม่หัวมันด้วยเครื่องโม่ มีการเติมน้ำเพื่อให้สามารถโม่ได้ง่ายขึ้น จะได้ของเหลวชั้นที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และสิ่งเจือปนต่างๆ ในขั้นตอนนี้
3. สกัดแป้งด้วยเครื่องสกัดแป้ง เพื่อแยกโปรตีน ไขมัน เส้นใย และกากออกจากแป้ง
4. นำแป้งอบให้แห้ง จากนั้นนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงก่อนนำไปใช้งานได้ทันที

2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีสูตรโมเลกุล คือ H_2O_2 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ซึ่งสารประกอบนี้จะเก็บในขวดพลาสติกทึบแสง โดยจะมีการขายอยู่ในรูปสารละลายในน้ำ ในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ประมาณ 3 ถึง 6% สามารถใช้ในการฆ่าเชื้อบาดแผลได้ โดยจะมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคทั้งไวรัส แบคทีเรีย และยีสต์ ช่วยลดความเสี่ยงที่จะติดเชื้อได้ แต่ในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะมีคุณสมบัติเป็นสารอันตรายที่สามารถเกิดการระเบิดได้ หากได้รับความร้อนจากภายนอกที่สูง เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ และทำให้ผิวหนังเกิดการไหม้อย่างรุนแรง จึงต้องมีความระมัดระวังในการทำงาน โดยความเข้มข้นที่สูงถึง 70 ถึง 98% มีการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการทำ ความสะอาด ฟอกสี บำบัดน้ำเสีย สกัดสารเคมี และใช้เป็นตัวริเริ่มในปฏิกิริยา เป็นต้น [30]

ในการจัดเก็บของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีการใส่สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) เช่น ฟอสเฟต และเกลือลงไปเพื่อลดการสลายตัวขณะการจัดเก็บ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นสลายตัวได้ง่ายเมื่อให้ความร้อน ได้เป็นน้ำและออกซิเจนเกิดขึ้น ซึ่งในการใช้งานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ อาจมีการใช้งานที่น้อยกว่าสารออกซิไดส์ชนิดอื่น เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) แต่ข้อดีของตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นคือ ไม่มีผลผลิตพลอยได้ (By-product) ที่อันตราย เป็นกระบวนการที่ไม่มีคลอรีนเกิดขึ้น ทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [30-31]

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [32]

สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	ฉุนเล็กน้อยถึงไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	34.02 g/mol
อุณหภูมิการสลายตัว	110 °C ที่ 1,013 hPa
ความถ่วงจำเพาะ	1.132 ที่ 20 °C
ความสามารถในการละลาย	ละลายน้ำได้
ค่าพีเอช (pH)	4.6

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [32]

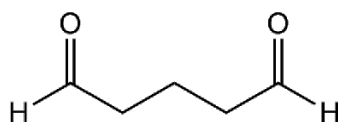
ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	Hydrogen peroxide
ชื่อเคมีทั่วไป	Hydrogen peroxide
รหัส IMO	<p>ประเภท 5.1 วัตถุออกซิไดส์</p> <p>ประเภท 8 วัตถุกัดกร่อน มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อและวัสดุ</p>
CAS NO.	7722-84-1
UN/ID No.	2014
รหัส RTECS	MX 0900000
ดัชนี NFPA	<p>-ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่เกิดการติดไฟ เมื่อสัมผัสกับความร้อนอุณหภูมิสูงที่ 815.5 °C เป็นเวลา 5 นาที</p> <p>-การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 1 คือ สารที่ปกติจะมีความเสถียร แต่จะไม่เสถียรเมื่ออุณหภูมิและความดันสูงขึ้น โดยสารจะเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวเมื่อสัมผัสกับอากาศ แสง หรือความชื้น</p> <p>-อันตรายต่อสุขภาพ (สีน้ำเงิน) ระดับ 3 คือ สารที่มีความเป็นพิษสูงมากจากการเผาไหม้ สารกัดกร่อนอย่างรุนแรง อาจเกิดการบาดเจ็บอย่างรุนแรงเมื่อมีการสัมผัสระยะสั้น</p>

จากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Material Safety Data Sheet, MSDS) ระบุถึงผลกระทบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสุขภาพไว้ว่า

- หากหายใจเข้าไป อาจเกิดอาการไอ เจ็บคอ หายใจติดขัด เนื่องจากสารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน แก้ไขได้โดยให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้ามีอาการหายใจติดขัดทำการให้ออกซิเจนช่วย และนำส่งแพทย์ การป้องกันคือควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล
- หากสัมผัสผิวหนังจะเกิดผื่นแดง และปวดแสบปวดร้อน ทางแก้ไข คือ ล้างด้วยน้ำปริมาณมากทันที
- หากกลืนเข้าไป จะเกิดอาการเจ็บคอ ปวดท้อง และอาเจียนได้ ควรไปพบแพทย์ทันที
- หากสัมผัสลูกดวงตา จะก่อให้เกิดความระคายเคืองตา ตาแดง ปวดตา และสายตาสายตาพร่ามัว ทางแก้ไข คือ ใช้น้ำเย็นล้างดวงตาทันที เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที [33]

2.8 กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เป็นหมู่ไดอัลดีไฮด์ที่มีคาร์บอน 5 ตัว มีโครงสร้างที่แข็งโดยปราศจากหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic group) และยังมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการเป็นสารเชื่อมโยง และใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากไม่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนยาง พลาสติก และโลหะ จึงมีการนำกลูตารัลดีไฮด์มาใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้ออย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามถึงแม้กลูตารัลดีไฮด์ไม่จัดเป็นสารก่อมะเร็ง แต่จากการวิจัยสารกลูตารัลดีไฮด์พบว่าเมื่อนำมาใช้กับคนหรือสัตว์ อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ฆ่าเชื้อสำหรับคนหรือสัตว์เลี้ยง [10, 34-35]





รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกลูตารัลดีไฮด์ [10]

ตารางที่ 2.6 สมบัติทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์ [35]

สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
น้ำหนักโมเลกุล	100.12 g/mol
อุณหภูมิการสลายตัว	100.5 °C ที่ 1,013 hPa
ความถ่วงจำเพาะ	0.7
ความสามารถในการละลาย	ละลายน้ำได้
ค่าพีเอช (pH)	>3.00

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลูตารัลดีไฮด์ [36]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	1,5-Pentanedione
ชื่อเคมีทั่วไป	Glutaric dialdehyde
CAS NO.	111-30-8
UN/ID No.	2811
รหัส IMO	 <p>ประเภท 6.1 วัตถุพิษ ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต เจ็บป่วยอย่างรุนแรงเมื่อถูกสัมผัส</p>
ดัชนี NFPA	 <p>-ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 คือ สารที่ไม่เกิดการติดไฟ เมื่อสัมผัสกับความร้อนอุณหภูมิสูงที่ 815.5 °C เป็นเวลา 5 นาที</p> <p>-การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารที่มีความเสถียรทั้งในสภาวะปกติและเกิดเพลิงไหม้</p> <p>-อันตรายต่อสุขภาพ (สีน้ำเงิน) ระดับ 2 คือ สารที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บเมื่อมีการสัมผัสในระยะสั้น</p>

2.9 แป้งดัดแปรสองขั้นตอน (Dual-modified starch)

การดัดแปรแป้งสองขั้นตอน เป็นการรวมการดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) สองรูปแบบเข้าด้วยกัน เช่น

- ดัดแปรโดยผ่านปฏิกิริยาแอซีทิลเลชัน (Acetylation) – ออกซิเดชัน (Oxidation)
- ดัดแปรโดยการเชื่อมโยง (Crosslinking) – แอซีทิลเลชัน (Acetylation)
- ดัดแปรโดยการเชื่อมโยง (Crosslinking) – ไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (Hydroxypropylation)
- ดัดแปรโดยการออกซิเดชัน (Oxidation) – เชื่อมโยง (Crosslinking) เป็นต้น

โดยการดัดแปรสองขั้นตอนนี้ทำเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติและการใช้งานของแป้งให้ดีขึ้นและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยขจัดข้อบกพร่องบางประการของแป้งที่ผ่านการดัดแปรเพียงขั้นตอนเดียวอีกด้วย ซึ่งแป้งดัดแปรสองขั้นตอนมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น สารเพิ่มความข้น และอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ส่วนในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวกับอาหาร มีการนำแป้งดัดแปรสองขั้นตอนไปใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ในโลหะหนัก [6, 37]

2.10 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

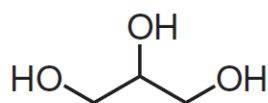
พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้มากในพอลิเมอร์ ซึ่งเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและยืดหยุ่นได้ดีขึ้น ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิมและทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง แต่ความยาว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงความทนแรงกระแทกที่ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ลดต่ำลงอีกด้วย โดยสารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติ ดังนี้

- เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง ควรมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ต่ำกว่าประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ระหว่างการใช้งาน
- ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ที่จะผสม
- พลาสติไซเซอร์ไม่ควรตกผลึกในช่วงอุณหภูมิขณะใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้ [38]

สำหรับการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ซนั้น เนื่องจากแป้งมีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก หากให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แป้งจะเกิดการไหม้และสลายตัวแทนที่จะเกิดการหลอม ดังนั้นจึงต้องมีการเติมพลาสติไซเซอร์เพื่อให้แป้งสามารถเกิดการหลอมได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงเชิงกล จึงจะสามารถขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตา์ซออกมาได้ตามความต้องการ

2.10.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล หรือ ที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (Glycerin) มีลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ สามารถดูดความชื้นในบรรยากาศได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความนุ่ม และความยืดหยุ่น นอกจากนี้กลีเซอรอลมีการใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางค์ เป็นต้น โดยกลีเซอรอลเป็นสารจำพวกพอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งเป็นหมู่ของไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) 2 หมู่ และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่ [39] ดังแสดงในรูปที่ 2.11

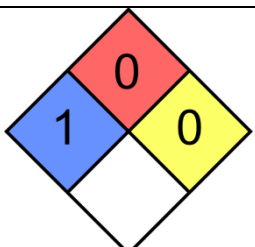


รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล [40]

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล [40]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรทางเคมี	CH ₂ OH-CHOH-CH ₂ OH หรือ C ₃ H ₈ O ₃
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะและสี	ของเหลว ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
จุดหลอมเหลว	17.9 °C
จุดเดือด	290 °C
สมบัติการละลายใน 100 ส่วน	
- น้ำ	ละลายดีมาก
- แอลกอฮอล์	ละลายดีมาก
- อีเทอร์	ไม่ละลาย
ความหนืดของกลีเซอรินเหลวที่	
- ความบริสุทธิ์ 100 %	10 cP
- ความบริสุทธิ์ 50 %	25 cP

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลด้านความปลอดภัยทั่วไปของกลีเซอรอล [41]

ข้อมูล	รายละเอียด
ชื่อ IUPAC	Propane-1,2,3-Triol
ชื่อเคมีทั่วไป	Glycerol, Glycerine
CAS NO.	56-81-5
ดัชนี NFPA	 <p>- ความไวไฟ (สีแดง) ระดับ 0 สารที่ไม่เกิดการติดไฟ เมื่อสัมผัสกับความร้อนอุณหภูมิสูงที่ 815.5 °C เป็นเวลา 5 นาที</p> <p>- การเกิดปฏิกิริยา (สีเหลือง) ระดับ 0 คือ สารที่มีความเสถียรทั้งในสภาวะปกติและเกิดเพลิงไหม้ โดยไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ</p> <p>- อันตรายต่อสุขภาพ (สีน้ำเงิน) ระดับ 1 คือ สารที่ทำให้เกิดการระคายเคือง และเจ็บป่วยเล็กน้อยเมื่อสัมผัสในระยะสั้น</p>

จากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (MSDS) ระบุถึงผลกระทบของกลีเซอรอลต่อสุขภาพของมนุษย์ในระยะสั้นไว้ว่า

- หากสัมผัสกับผิวหนัง อาจเกิดการระคายเคืองกับผิวหนังได้
- หากสัมผัสสูดดมดวงตา อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตา
- หากมีการสูดดมเข้าไป อาจทำให้เกิดการระคายเคืองที่ระบบทางเดินหายใจ
- หากมีการกลืนกินเข้าไป อาจมีการคลื่นไส้ ปวดศีรษะเกิดขึ้น

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

F. Sun และคณะ [6] ทำการศึกษาผลของการดัดแปรแป้งข้าวสาลีด้วยการใช้โซเดียมไฟเตท (Sodium phytate, $C_6H_6Na_{12}O_{24}P_6$) เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณ 2% ของน้ำหนักแป้งแห้ง และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ที่ความเข้มข้น 12% ที่มีต่อสมบัติของเม็ดแป้ง โดยทำการดัดแปรชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน จากการทดสอบการละลายพบว่า สูตรแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์สามารถละลายน้ำได้มากที่สุด เนื่องจากในสูตรนี้มีเปอร์เซ็นต์หมู่คาร์บอกซิลที่เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมากกว่าทุกสูตร ด้วยหมู่คาร์บอกซิลที่มีสมบัติชอบน้ำจึงส่งผลให้ค่าการละลาย

มากขึ้นตามไปด้วย และในสูตรนี้ยังพบว่าเกิดการบวมตัวน้อยที่สุด จากการศึกษาความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร แป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์ แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ และแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ดังนี้ 21.10, 24.23, 20.51, 25.89 และ 24.52% ตามลำดับ ซึ่งการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมไฟเตทไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึก แต่การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นส่งผลให้แป้งมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น อาจเกิดเนื่องจากการออกซิเดชันทำให้เกิดการสลายตัวในส่วนอนสัณฐานหรือมีการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ จึงทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้แป้งสาลีที่มีการตัดแปรสองชั้นตอนพบว่า มีอุณหภูมิเจลลาทีนเซชันสูงกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากมีทั้งหมู่คาร์บอกซิลที่มากขึ้นและเกิดการเชื่อมโยงภายในเม็ดแป้งที่เสริมให้เม็ดแป้งแข็งแรงและมีความเสถียรมากขึ้น

S. Sukhija และคณะ [7] ทำการศึกษาผลของการตัดแปรแป้งบุกโดยการออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่มีต่อสมบัติของเม็ดแป้ง ซึ่งทำการตัดแปรทั้งชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน พบว่า ความสามารถในการจับกับน้ำ (Water binding capacities, WBC) ของแป้งตัดแปรทุกสูตรมีค่ามากกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร และมีค่าสูงที่สุดในสูตรของแป้งตัดแปรสองชั้นตอน เนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นภายในเม็ดแป้งหลังจากการทำปฏิกิริยานั้นทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนแอลง ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกเข้ามาในเม็ดแป้งได้ง่ายมากขึ้น ขณะที่การศึกษาการบวมตัวพบว่า แป้งตัดแปรทุกสูตรนั้นมีการบวมตัวที่ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร และความใสของแป้งสุกมีค่าสูงในสูตรของแป้งออกซิไดส์ และแป้งตัดแปรสองชั้นตอน และจากการศึกษาความเป็นผลึก โดยเทคนิค XRD พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร แป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์ แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ และแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ดังนี้ 32.5, 38.24, 33.11, 37.23 และ 36.48% ตามลำดับ ซึ่งการออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ส่งผลให้ค่าความเป็นผลึกสูงขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของอะไมโลสและมีการจัดเรียงตัวใหม่โดยส่งผลให้มีโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตไม่มีผลต่อความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง และในแป้งสูตรที่ผ่านการออกซิเดชัน ได้แก่ แป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ และแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ พบว่ามีความหนืดที่ต่ำจากการแตกออกของโครงสร้างจากการออกซิเดชัน นอกจากนี้ในแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ยังไม่พบการเกิดเจลของแป้งเปียกอีกด้วย และจากการศึกษาลักษณะการเกิดเจลลาทีนซ์จากเทคนิค DSC พบว่า แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนเซชันที่สูงกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจึงทำให้เม็ดแป้งบวมตัวและเกิดเจลยากขึ้น

H.X. Xiao และคณะ [8] ทำการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของเม็ดแป้งจากตัดแปรแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการออกซิเดชันโดยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ เชื่อมโยงโดยอีพิคลอโรไฮดริน และแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรสองชั้นตอน จากการศึกษาการบวมตัวพบว่า แป้งออกซิไดส์มีการ

บวมตัวต่ำที่สุด เนื่องจากโครงสร้างภายในเม็ดแป้งเกิดการแตกออกผ่านการออกซิเดชันและด้วยเหตุผลนี้ทำให้แป้งออกซิไดส์มีความใสของแป้งเปียกที่มากกว่าสูตรอื่นๆ ส่วนแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์พบการบวมตัวที่ต่ำกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ จากการทดสอบการละลายพบว่าแป้งครอสลิงค์ และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ มีค่าการละลายต่ำ เนื่องมาจากโครงสร้างของเม็ดแป้งที่แข็งแรงขึ้นจากการเชื่อมโยงภายในโมเลกุล และจากการศึกษาลักษณะการเกิดเจลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันจากเทคนิค DSC พบว่า แป้งครอสลิงค์มีอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันสูงที่สุด รองลงมาเป็นแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่งผลให้เม็ดแป้งต้านทานต่อการบวมตัว นอกจากนี้แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำที่สุด อีกทั้งยังมีความสามารถในการทนทานต่อแรงเฉือนสูงอีกด้วย

Y. Tanetrungroj และ J. Prachayawarakorn [9] ทำการศึกษาผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองขั้นตอนที่มีต่อฟิล์มแป้ง โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ในอัตราส่วนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อแป้ง 0.7:1 และใช้กรดบอริก (Boric acid) เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของแป้งที่แห้ง จากการศึกษาความเป็นผลึกโดยเทคนิค XRD พบว่า การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งลดลง เนื่องจากมีการตัดสายโซ่และการลดลงของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของแป้ง ระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งยังมีการทำให้แป้งเกิดเจลาทีโนเซชันก่อนนำไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ส่วนที่เป็นผลึกนั้นถูกทำลาย ขณะที่การเชื่อมโยงด้วยกรดบอริกไม่ได้ทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นเพราะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่อาจเกิดขึ้นที่บริเวณอสัณฐาน จึงไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มแป้ง จากผลการทดสอบการบวมตัวและความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (WVP) พบว่า ฟิล์มจากแป้งดัดแปรทุกชนิดมีการบวมตัวและ WVP ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร นอกจากนี้พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีการบวมตัวและ WVP ต่ำที่สุด เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งที่ลดลงหลังจากการผ่านการดัดแปร ส่วนการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้ง พบว่าฟิล์มจากแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันมีลักษณะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ซึ่งเป็นเพราะในขั้นตอนการออกซิเดชันเกิดการทำลายเม็ดแป้งเกิดขึ้น และยังพบว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ทั้งในความแข็งแรง และความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนยังพบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีอุณหภูมิสลายตัวที่สูงกว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ และฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และในฟิล์มแป้งทุกสูตรสามารถเกิดการย่อยสลายได้

J. Liu และคณะ [42] ทำการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต โดยศึกษาสมบัติของเม็ดจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์ และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ พบว่าการดัดแปรแป้งสองขั้นตอน โดยการ

ดัดแปรในขั้นตอนแรกเป็นการเชื่อมโยงก่อน แล้วตามด้วยการดัดแปรขั้นตอนที่สองด้วยการออกซิเดชัน ทำให้แปงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเห็นได้จากปริมาณหมู่คาร์บอกซิลในแปงครอสลิงค์-ออกซิไดส์ที่สูงกว่าแปงออกซิไดส์ และการแทนที่หมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำอย่างเช่นหมู่คาร์บอกซิล ผ่านการออกซิเดชันนั้นส่งผลให้ความสามารถในการจับกับน้ำ (WBC) และการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยแปงครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามการแทนที่หมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำเข้าไปในเม็ดแปงมากเกินไปทำให้ความคงตัวต่อกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw stability) ลดลง จากการศึกษาความเป็นผลึกจาก XRD พบว่าทั้งการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของแปง และยังพบอีกว่าแปงข้าวเหนียวครอสลิงค์-ออกซิไดส์มีสมบัติความชอบน้ำมากกว่าแปงอีกสามชนิด

S.D. Zhang และคณะ [4] ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแปงข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ในอัตราส่วนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อแปง 0.7:1, 1:1 และ 2:1 โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าการเกิดเจลลาตินในซึของแปงทำให้การออกซิไดส์แปงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดได้ง่ายมากขึ้น และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลต่อองศาการเกิดออกซิเดชัน (Degree of oxidation, DO) อย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อแปง 0.7:1 มี DO เท่ากับ 0.385, 1:1 มี DO เท่ากับ 0.495 และ 2:1 มี DO เท่ากับ 0.554 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ปริมาณหมู่อัลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรก และหลังจากนั้นปริมาณหมู่อัลดีไฮด์จะลดลงและถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอกซิลจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบพีกใหม่เกิดขึ้นจากการสั่นของ C=O stretching ที่ประมาณ $1,735\text{ cm}^{-1}$ เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเกิดหมู่อัลดีไฮด์และหมู่คาร์บอกซิลขึ้นในแปง และ DO มีผลต่อการดูดซับความชื้นและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแปงออกซิไดส์ โดยแปงออกซิไดส์ที่มี DO เท่ากับ 0.385 และมีหมู่อัลดีไฮด์มากที่สุด พบว่ามีการดูดซับความชื้นต่ำที่สุด และมีสมบัติเชิงกลดีกว่าสูตรอื่นๆ

B. Han [43] ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของเม็ดแปงของแป้งมันฝรั่งที่ดัดแปรด้วยการออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คลอรีนไดออกไซด์ และโซเดียมไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดส์ พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์นั้นมีค่า 0.329% ซึ่งมากกว่าการใช้สารออกซิไดส์ตัวอื่นๆ และยังพบอีกว่าค่าการส่องผ่านของแสงและการเกิดรีโทรเกรเดชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละการใช้สารออกซิไดส์ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่าแปงที่ออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจน-

เปอร์ออกไซด์มีความเข้มของพีคที่ $1,735\text{ cm}^{-1}$ จากการสั่นของ C=O stretching มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกันกับปริมาณของหมู่คาร์บอนิล

K. Sangseethong และคณะ [44] ทำการเปรียบเทียบสมบัติของเม็ดแป้งจากการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยการออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโปคลอไรท์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ จากการศึกษาพบว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาวะเบสที่ pH เป็น 10 ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์นั้นทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันหลัก คือ หมู่คาร์บอนิล และหมู่ฟังก์ชันรองคือ หมู่คาร์บอกซิล เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแป้งอย่างรวดเร็ว โดยสารออกซิไดส์จำนวนมากถูกใช้ในการจับไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) จากแป้ง ซึ่งส่งผลให้เกิดหมู่คาร์บอนิลปริมาณมากในช่วงแรกของปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเหลือสารออกซิไดส์ที่สามารถเปลี่ยนหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่คาร์บอกซิลได้น้อยลง และสารออกซิไดส์ทั้งสองสามารถเกิดแป้งออกซิไดส์ที่มีความหนืดและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งออกซิไดส์เพิ่มขึ้นในการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่ลดลงในการใช้ไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดส์

E. Olsson และคณะ [45] ทำการศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis), การเชื่อมโยง และสมบัติการต้านการซึมผ่าน (Barrier properties) ของฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งที่ถูกดัดแปรด้วยการเชื่อมโยงโดยกรดซิตริก (Citric acid) และกระดาษที่ผ่านการเคลือบผิว (Coating) ด้วยแป้งที่มีการดัดแปรด้วยกรดซิตริก จากการศึกษาพบว่า สามารถทำการเคลือบผิวกระดาษให้มีสมบัติการต้านการซึมผ่านที่ดีขึ้นได้จากแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกโดยการปรับ pH ซึ่ง pH ที่เพียงพอต่อการป้องกันการเกิดไฮโดรไลซิสคือ pH 4 ยิ่งไปกว่านั้นที่ pH 4 มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ที่ต่ำที่สุด โดยลดลง 20% เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ทำการปรับ pH และพบว่า ปริมาณความชื้นของฟิล์มจากแป้งลดลงในสูตรที่ให้ความร้อนในการเชื่อมโยงที่ pH 3, 4 และ 5 เนื่องมาจากการเกิดไฮโดรไลซิสที่ลดลง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การปรับเพิ่ม pH ส่งผลกระทบบ่อยมากต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากกว่าการเชื่อมโยง โดยมีการลดลงของการเกิดไฮโดรไลซิสเมื่อเพิ่ม pH

C. Menzel และคณะ [46] ศึกษาผลของการเชื่อมโยงแป้งมันฝรั่งด้วยกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้ง จากการศึกษาพบว่า ในการเชื่อมโยงแป้งด้วยกรดซิตริกไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเชื่อมโยง แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิในการเชื่อมโยงสูงส่งผลให้องศาการเชื่อมโยงนั้นสูงตามไปด้วย นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการสลายตัวระหว่างการทำให้แห้ง เนื่องมาจากการเกิดไฮโดรไลซิส จากการศึกษาการละลายน้ำ (Water solubility)

พบว่า พิล์มแข็งละลายน้ำได้ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเกิดการเชื่อมโยงที่สามารถเสริมแรงพันธะในเม็ดแข็งได้มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แปะงมันสำปะหลัง ตราปลามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจัน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแปะงมันสำปะหลัง ตราปลามังกร

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
อะไมโลส	17
อะไมโลเพคติน	83
ไขมัน	0.25
โปรตีน	6.50-7.50
ความชื้น	<13
เถ้า	0.23
ขนาด	< 160 ไมโครเมตร
ความเป็นกรด-ด่าง	6 - 7

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

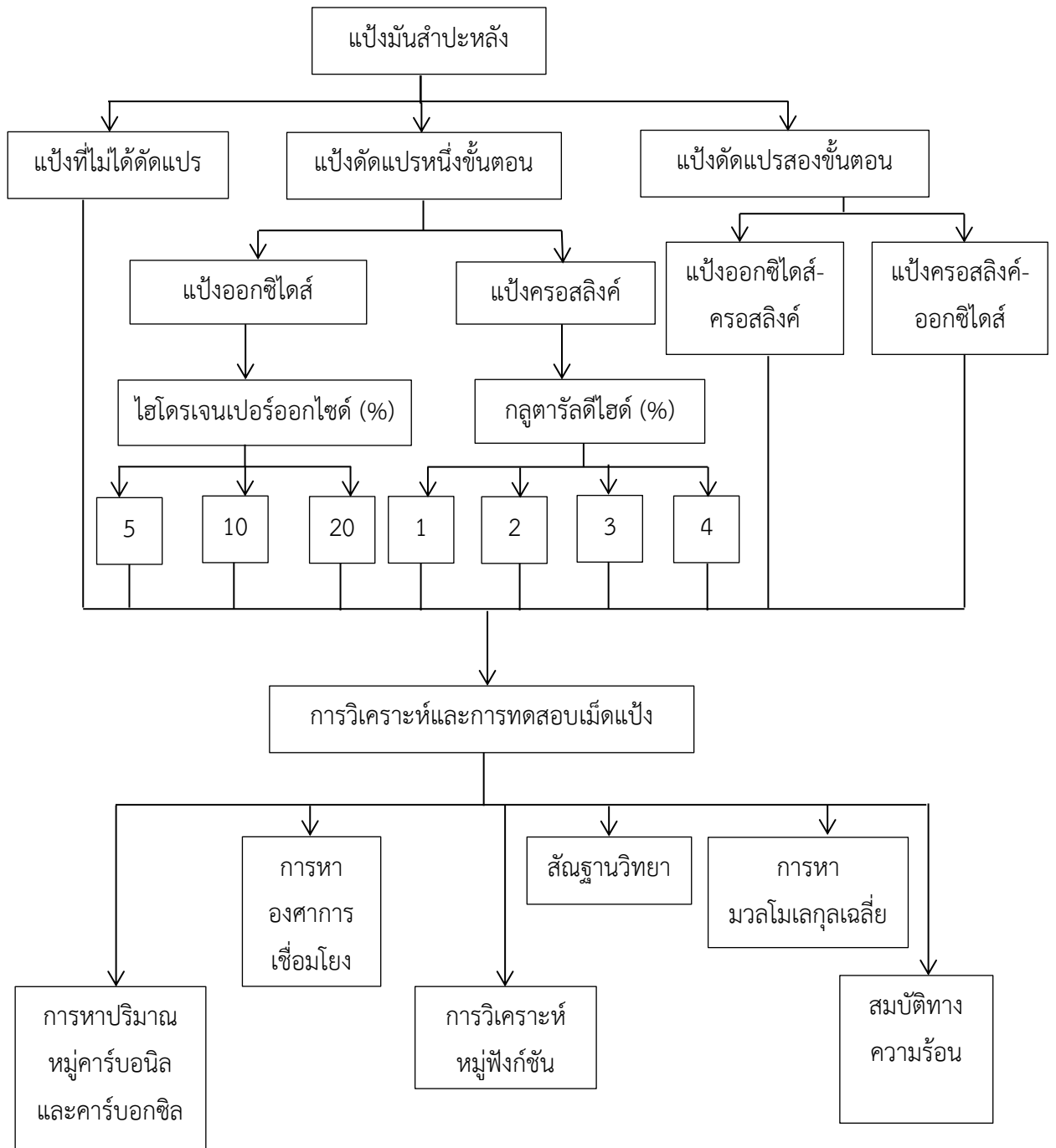
2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System จำกัด
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% w/v เกรดห้องปฏิบัติการ จากบริษัท Chem-supply
4. กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde solution 50% in water) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka analytical
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด
7. กรดซิตริก (Citric acid) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
8. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด
9. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด
10. ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด

11. ไดมethylซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
12. เอทานอล (Ethanol) 95% เกรดการค้า จากองค์การสุรากรมสรรพสามิต
13. น้ำกลั่น (Distilled water)

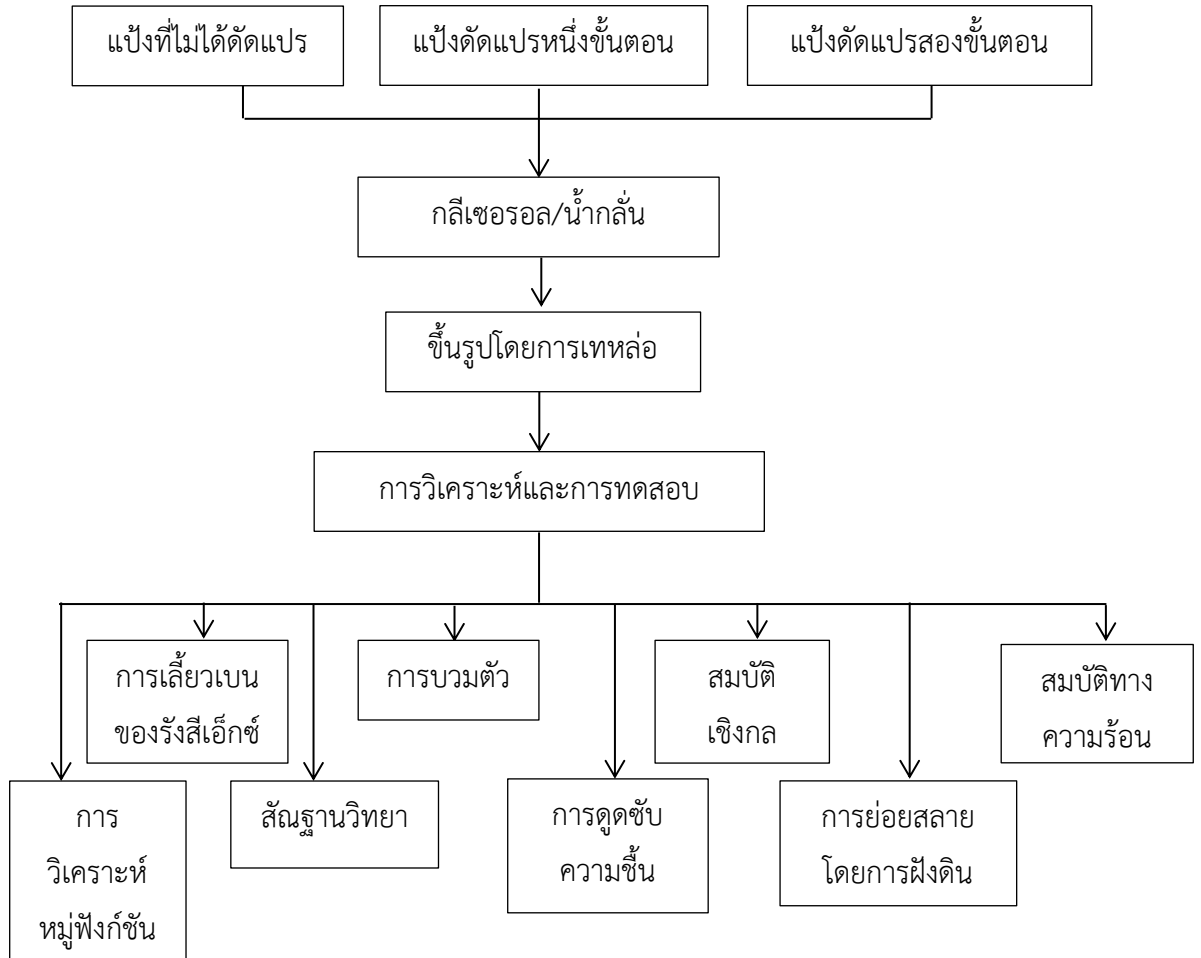
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เตาหลุมให้ความร้อน (Heating mantle) รุ่น MQ 1000 ml จากบริษัท FALC
3. เครื่องปั่นกวนและให้ความร้อน (Hot plate stirrer) รุ่น CMAG HS7 5000 จากบริษัท IKA
4. มอเตอร์ใบพัดปั่นกวน รุ่น RW 20 D จากบริษัท IKA
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น MS204TS/00 จากบริษัท Mettler toledo
6. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น UF110 จากบริษัท Memmert
7. เครื่องปั่นอนุภาคประสมค์ รุ่น EM 44A จากบริษัท SHARP
8. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) รุ่น A35 จากบริษัท Eyla ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Universal 320 จากบริษัท Hettich ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde Viscometer)
11. เครื่องวัดความหนืดของแป้ง (Rapid visco analyzer, RVA) รุ่น RVA-4 จากบริษัท Newport ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เครื่องทดสอบบอเนกประสมค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 5 K จากบริษัท Lloyd Instrument ประเทศอังกฤษ
13. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) รุ่น SPECTRUM GX จากบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JSM-5410 จากบริษัท Jeol ประเทศญี่ปุ่น
15. เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 Advance จากบริษัท Bruker ประเทศสหรัฐอเมริกา
16. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Pyris 1 จากบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา

การดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมแบ่งตัดแปรรต่างๆ



รูปที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมฟิล์มจากแบ่งตัดแปรรต่างๆ

3.3 การทดลอง

3.3.1 การเตรียมแป้งออกซีไดส์

1. เตรียมสารละลายชั้น (Slurry) จากการชั่งแป้ง 50 กรัม และน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายชั้นเทลงในขวดก้นกลม จากนั้นใช้เตาหลุมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้มอเตอร์ใบพัดปั่นกวนของผสมที่ความเร็วรอบ 300 rpm ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แป้งเกิดเจลลาทีโนเซชัน [4]
3. หลังจากครบ 1 ชั่วโมง ทำการหล่อเย็นของผสมด้วยการเปิดน้ำผ่านขวดก้นกลม จากนั้นปรับ pH ให้เป็น 10 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 mol/L [47]
4. หยดของผสมที่เตรียมได้จากน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ลงในของผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และให้ pH คงไว้เท่ากับ 10 [4, 47]
5. เมื่อครบเวลา 2 ชั่วโมง ทำการปรับ pH ของของผสมให้เป็น 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 mol/L
6. นำของผสมมาตกตะกอนในเอทานอลทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นกรองผ่านตะแกรง และล้างด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และทำการล้างด้วยเอทานอล 250 มิลลิลิตร อีกครั้งเพื่อดึงน้ำออกจากแป้ง
7. นำตะกอนที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดแป้งด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์เพื่อให้แป้งมีขนาดเล็กก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

3.3.2 การเตรียมแป้งครอสลิงค์

1. ชั่งแป้ง 50 กรัม และเติมน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้เป็นสารละลายชั้น (Slurry) [48]
2. ปรับ pH สารละลายเป็น 4 ด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.2 mol/L
3. เติมกลูตารัลดีไฮด์ปริมาณ 1, 2, 3 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง ลงในสารละลาย จากนั้นให้ความร้อนในอ่างน้ำโดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 70 ± 2 องศาเซลเซียส [49] เป็นเวลา 4 นาที พร้อมกับปั่นกวนตลอดเวลาด้วยความเร็วรอบ 300 rpm
4. เมื่อครบเวลา 4 นาที นำของผสมที่ได้มาล้างน้ำกลั่นจำนวนหลายๆ ครั้ง เพื่อให้มี pH เท่ากับ 7 จากนั้นนำไปทำให้ตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง โดยให้ความเร็วในการปั่นเหวี่ยงที่ 3500 rpm เป็นเวลา 15 นาที
5. นำตะกอนที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดแป้งด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์เพื่อให้แป้งมีขนาดเล็กก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

3.3.3 การเตรียมแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน-การเชื่อมโยง

1. นำแป้งมันสำปะหลังมาตัดแปรด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 โดยเลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง ซึ่งทำให้ได้แป้งออกซิไดส์ออกมาในขั้นตอนนี้

2. นำแป้งออกซิไดส์ที่ผ่านการบดแป้งให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ มาตัดแปรครั้งที่สองด้วยการเชื่อมโยงโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.3.2 โดยเลือกใช้ปริมาณใช้กลูตารัลดีไฮด์ที่ 1 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง ซึ่งแป้งที่ได้ออกมาในขั้นตอนนี้เป็นแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์

3.3.4 การเตรียมแป้งตัดแปรสองขั้นตอนโดยการเชื่อมโยง-การออกซิเดชัน

1. นำแป้งมันสำปะหลังมาตัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.3.2 โดยเลือกใช้ปริมาณใช้กลูตารัลดีไฮด์ที่ 1 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้งซึ่งทำให้ได้แป้งครอสลิงค์ออกมาในขั้นตอนนี้

2. นำแป้งครอสลิงค์ที่ผ่านการบดแป้งให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ มาตัดแปรครั้งที่สองด้วยการออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดส์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 โดยเลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้งซึ่งแป้งที่ได้ออกมาในขั้นตอนนี้เป็นแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์

3.3.5 การเตรียมฟิล์มแป้ง

1. ชั่งแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรชนิดต่างๆ 6 กรัม ลงในบีกเกอร์ และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 30% โดยน้ำหนักของแป้ง

2. ปั่นกวนของผสมตลอดเวลา พร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องให้ความร้อนจนกระทั่งแป้งเริ่มเกิดเจลลาทีนเซชัน

3. เทของผสมที่มีลักษณะเป็นเจลลงในถาดพอลิพรอพิลีน (ที่มีความกว้าง 19.4 เซนติเมตร ความยาว 28.0 เซนติเมตร และความสูง 1.9 เซนติเมตร) โดยเทให้ของผสมมีน้ำหนัก 70 ± 2 กรัม

4. นำถาดที่มีของผสมไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีการปรับความแรงลมภายในตู้อบที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้ฟิล์มที่แห้งสนิท

5. เมื่อครบเวลา 6 ชั่วโมง นำถาดออกจากตู้อบ และทำการลอกแผ่นฟิล์มออกจากถาดพอลิพรอพิลีน ซึ่งฟิล์มที่ได้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.1-0.3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งตัดแปรที่เตรียม

สูตร	แป้ง มัน สำปะหลัง (กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนเปอร์- ออกไซด์		กลูตาร์ลดีไฮด์	
			(กรัม)	(% โดย น้ำหนัก ของแป้ง)	(กรัม)	(% โดย น้ำหนักของ แป้ง)
● NS	50	-	-	-	-	-
● 5% OS	50	250	2.5	5	-	-
● 10% OS	50	250	5.0	10	-	-
● 20% OS	50	250	10.0	20	-	-
● 1% CS	50	50	-	-	0.5	1
● 2% CS	50	50	-	-	1.0	2
● 3% CS	50	50	-	-	1.5	3
● 4% CS	50	50	-	-	2.0	4
● 10% OS-1% CS	50	250/50	5.0	10	0.5	1
● 10% OS-4% CS	50	250/50	5.0	10	2.0	4
● 20% OS-1% CS	50	250/50	10.0	20	0.5	1
● 1% CS-10% OS	50	50/250	5.0	10	0.5	1
● 1% CS-20% OS	50	50/250	10.0	20	0.5	1
● 4% CS-10% OS	50	50/250	5.0	10	2.0	4

หมายเหตุ NS คือ แป้งที่ไม่ได้ตัดแปร

OS คือ แป้งออกซิไดส์

CS คือ แป้งครอสลิงค์

OS-CS คือ แป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์

CS-OS คือ แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์

*OS โดย * คือ เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักของแป้ง) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในแต่ละสูตร

*CS โดย * คือ เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักของแป้ง) ของกลูตาร์ลดีไฮด์ในแต่ละสูตร

โดยแป้งตัดแปรสองขั้นตอนในงานวิจัยนี้ มีปัจจัยที่พิจารณา ดังต่อไปนี้

1. ลำดับในการตัดแปรของแป้งตัดแปรสองขั้นตอน ได้แก่ การตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นขั้นตอนแรก ส่วนขั้นตอนที่สองตัดแปรโดยการเชื่อมโยง

ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (แบ่งออกซิไดส์-ครอสลิงค์) และการตัดแปรโดยการเชื่อมโยงเป็น
ขั้นตอนแรก ส่วนขั้นตอนที่สองตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วย
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (แบ่งออกซิไดส์-ครอสลิงค์)

2. ปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างในแป้งตัดแปรสองขั้นตอน โดยมีปริมาณสารออกซิไดส์
ที่คงที่ ได้แก่ สูตร 10% OS-1% CS เปรียบเทียบกับ 10% OS-4% CS และ 1% CS-
10% OS เปรียบเทียบกับ 4% CS-10% OS
3. ปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างในแป้งตัดแปรสองขั้นตอน โดยมีปริมาณสารเชื่อมโยง
ที่คงที่ ได้แก่ สูตร 10% OS-1% CS เปรียบเทียบกับ 20% OS-1% CS และ 1% CS-
10% OS เปรียบเทียบกับ 1% CS-20% OS

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl content) [50]

1. ชั่งแบ่งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการออกซิเดชันมา 1 กรัม ใส่ปิ๊กเกอร์ และเติมน้ำกลั่น
ปริมาณ 300 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดจนแป้งเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์
2. ปรับ pH ของสารละลายที่เย็นตัวแล้วให้เป็น 3.2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความ
เข้มข้น 0.118 mol/L
3. เติมสารละลายไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ 60 มิลลิลิตร (เตรียมได้จาก
ไฮดรอกซีลามีน 25 กรัม ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 mol/L ปริมาณ 100
มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้ถึง 500 มิลลิลิตร)
4. ปั่นกวนและให้ความร้อนแก่ของผสมในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 40
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. นำของผสมมาไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.118 mol/L โดยใช้
เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็นตัวอย่างควบคุม
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วจึงนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{Carbonyl content (\%)} = 0.118 \times 0.028 \times (V \text{ control} - V \text{ sample}) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ V control คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่างควบคุม

V sample คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับแป้งที่ผ่านการตัดแปร
ด้วยการออกซิเดชัน

0.118 คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก

0.028 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนหน่วยของหมู่คาร์บอนิล

3.4.2 การหาปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl content) [51-52]

1. ชั่งแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการออกซิเดชันมา 0.2 กรัม ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 mol/L ปริมาณ 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นจนสารละลายขึ้นด้วยเครื่องปั่นจนเป็นเวลา 30 นาที
2. เมื่อครบเวลา นำของผสมมากรองแบบสุญญากาศ และล้างด้วยน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เพื่อให้ pH เท่ากับ 7
3. นำตะกอนที่ได้ใส่ปิเกตอร์ จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 30 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
4. ให้ความร้อนของผสมในอ่างน้ำเดือดและปั่นจนตลอดเวลา เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้แป้งเกิดเจลาทีไนซ์
5. จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 45 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น และทำการไทเทรตกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.01 mol/L โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วจึงนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{Milliequivalents of acidity/100 g starch} = \frac{[(V_s - V_b) \times C_{\text{NaOH}} \times 100]}{\text{Sample weight (dry basis)}} \quad (3.2)$$

$$\text{Carboxyl content (\%)} = [\text{milliequivalents of acidity/100 g starch}] \times 0.045 \quad (3.3)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตกับแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการออกซิเดชัน

V_b คือ ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตกับแป้งที่ไม่ได้ผ่านตัดแปร

C_{NaOH} คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

0.045 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนหน่วยของหมู่คาร์บอกซิล

3.4.3 การหาองศาการเชื่อมโยง (Degree of cross-linking) ด้วยเครื่องวัดความหนืดของแป้ง (Rapid Visco Analyzer, RVA) [53]

1. ชั่งแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการเชื่อมโยง มากระจายตัวในน้ำกลั่น แล้วใส่ถ้วยอะลูมิเนียมตัวอย่าง
2. ตั้งสภาวะอุณหภูมิของเครื่อง RVA ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และเพิ่มอุณหภูมิไปถึง 95 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 11 องศาเซลเซียส/นาที

3. คงไว้ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และทำการลดอุณหภูมิมาที่ 50 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่เท่าเดิม
4. คงไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ แล้วจึงคำนวณหาองศาการเชื่อมโยงได้ตามสมการ

$$\text{Degree of cross-linking (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ A คือ ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของตัวอย่างแบ่งที่ไม่ได้ตัดแปร
 B คือ ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของแบ่งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการเชื่อมโยง
 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาองศาการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดความหนืดของแบ่ง โดยเลือกสูตรเม็ดแบ่งที่ทำการทดสอบ ดังนี้ NS, 1% CS, 4% CS, 10% OS-1% CS, 1% CS-10% OS, 10% OS-4% CS, 4% CS-10% OS, 20% OS-1% CS และ 1% CS-20% OS

3.4.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) นำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อจากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยทำการทดสอบที่ความยาวคลื่น 4000-400 cm⁻¹ พร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการหาสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1735 cm⁻¹, 1644 cm⁻¹ และ 709 cm⁻¹ ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณในเม็ดแบ่ง ส่วนในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของชั้นงานฟิล์ม ทำการหาสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1735 cm⁻¹, 1642 cm⁻¹ และ 709 cm⁻¹

3.4.5 การหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Averaged molecular weight) [54]

การวัดความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity) ใช้บ่งบอกน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่าง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25±0.1 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde Viscometer) ใช้ไตเมทริกซ์ฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายแบ่ง และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบ่งได้จากการวัดความหนืดภายใน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการของ Mark-Houwink :

$$[\eta] = KM^a \quad (3.5)$$

เมื่อ $[\eta]$ คือ ความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity)

K คือ ค่าคงที่ มีค่า 8.5×10^{-3} mL/g

a คือ ค่าคงที่ มีค่า 0.76

M คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

3.4.6 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มุมต่างๆ กัน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยแหล่งกำเนิดที่รังสีที่ใช้คือ $\text{CuK}\alpha$ มีความยาวคลื่น เท่ากับ 1.54 อังสตรอม และกำหนดขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 5-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/ นาที ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{Crystallinity (\%)} = \frac{\text{Raw area}}{\text{Net area}} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ Raw area คือ พื้นที่ใต้พีคที่สนใจ ช่วง $2\theta = 12-28$ องศา

Net area คือ พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด ช่วง $2\theta = 5-60$ องศา

3.4.7 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยการนำตัวอย่างฟิล์มมาแช่ในไนโตรเจนเหลวและหักทันที จากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ต่อไปโดยกำลังขยายที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม ได้แก่ 5000 เท่า

3.4.8 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

ทำการทดสอบการบวมตัวของตัวอย่างฟิล์มในน้ำกลั่น โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1×1 ตารางนิ้ว จำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่น้ำ และทำการชั่งน้ำหนักของฟิล์มด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำฟิล์มไปวางในตะแกรงลวดปิดที่มีการชั่งน้ำหนักของตะแกรงมาแล้ว และนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยนำฟิล์มมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง

จนครบ 6 ชั่วโมง และพอครบ 72 ชั่วโมงจึงชั่งน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนไปอีกครั้ง ซึ่งเปอร์เซ็นต์การบวมตัวคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของฟิล์มก่อนแช่น้ำ

W_2 คือ น้ำหนักของฟิล์มหลังแช่น้ำ

3.4.9 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

ทำการทดสอบการดูดซับความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM E104 โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1x1 ตารางนิ้ว จำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่น้ำ และทำการชั่งน้ำหนักของฟิล์มด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มวางไว้ในบรรยากาศอิมมิดด้วยความชื้นสัมพัทธ์ $99 \pm 1\%$ ชั่งน้ำหนักชิ้นงานฟิล์มทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นได้จากสมการ

$$W_a (\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.8)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของฟิล์มก่อนการดูดซับ

W_2 คือ น้ำหนักของฟิล์มหลังการดูดซับ

3.4.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ASTM D882-02 ซึ่งเตรียมชิ้นงานฟิล์มขนาด 100 x 15 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้นงาน ในแต่ละสูตร โดยมีการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยจะทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามสภาวะดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) : 50 mm/min

ระยะทดสอบ (Gauge length) : 50 mm

โหลดเซลล์ (Load cell) : 100 N

ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) มอดุลัส (Young's Modulus, E) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Stress at maximum load} = F/A \quad (3.9)$$

$$\text{Young's Modulus} = (F/A) / [(L-L_0)/L_0] \quad (3.10)$$

$$\% \text{ Strain at maximum load} = [(L-L_0)/L_0] \times 100 \quad (3.11)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดตัวอย่างฟิล์ม (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะชิ้นงานตัวอย่างที่แคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วย
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D882-02	MPa
มอดุลัส (Young's Modulus, E)	ASTM D882-02	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D882-02	%

3.4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ทำการทดสอบโดยตัดชิ้นงานฟิล์มขนาด 100×15 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร ฝังดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร และทำการควบคุมสถานะของดินโดยให้ความชื้นอยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 16 วัน จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มหลังจากการฝังดินมาทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างชิ้นงานฟิล์มก่อนฝังดินและหลังฝังดิน

3.4.12 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) โดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 10-12 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง

TGA โดยอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2)

3.4.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้ Analysis of variance (ANOVA) จากโปรแกรม IBM SPSS statistics 25 และทำการทดสอบด้วยวิธี Turkey's range test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง และการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparisons) โดยกำหนด $p < 0.05$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแป้งออกซีไดส์ แป้งโครสลิงค์ และแป้งดัดแปรสองขั้นตอน โดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาผลของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเทหล่อโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยทำการออกซีไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5 10 และ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง และการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1 2 3 และ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น วิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติความเป็นผลึก สมบัติการบวมตัว การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	NS	แป้งมันสำปะหลัง
2	5% OS	แป้งมันสำปะหลังที่ออกซีไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% โดยน้ำหนักของแป้ง
3	10% OS	แป้งมันสำปะหลังที่ออกซีไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
4	20% OS	แป้งมันสำปะหลังที่ออกซีไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง
5	1% CS	แป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
6	2% CS	แป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ 2% โดยน้ำหนักของแป้ง
7	3% CS	แป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ 3% โดยน้ำหนักของแป้ง
8	4% CS	แป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง

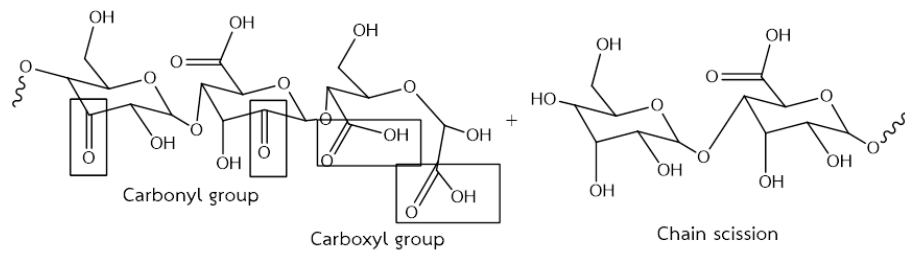
ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
9	10% OS-1% CS	แป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
10	10% OS-4% CS	แป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง
11	20% OS-1% CS	แป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
12	1% CS-10% OS	แป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
13	1% CS-20% OS	แป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง
14	4% CS-10% OS	แป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
15	NSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง
16	5% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% โดยน้ำหนักของแป้ง
17	10% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
18	20% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง
19	1% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
20	2% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 2% โดยน้ำหนักของแป้ง
21	3% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 3% โดยน้ำหนักของแป้ง

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
22	4% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง
23	10% OS-1% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
24	10% OS-4% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง
25	20% OS-1% CSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง และกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง
26	1% CS-10% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
27	1% CS-20% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 1% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20% โดยน้ำหนักของแป้ง
28	4% CS-10% OSF	ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 4% โดยน้ำหนักของแป้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง

4.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการดัดแปรแป้ง

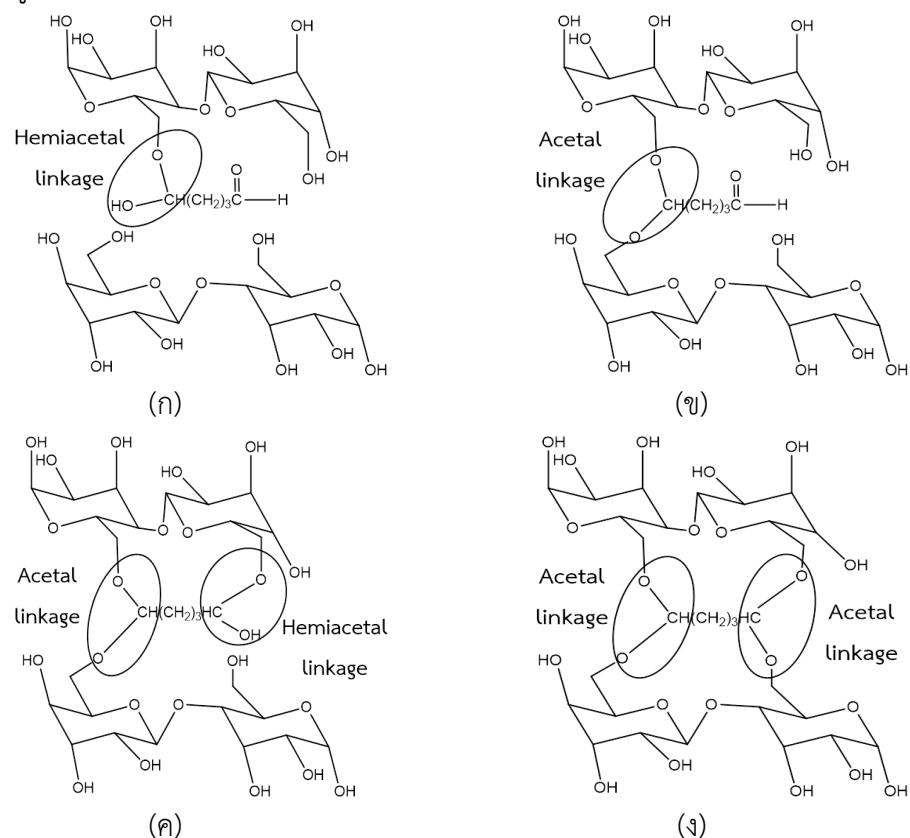
ปฏิกริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน ได้แก่ การออกซิเดชัน (Oxidation) ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การตัดสายโซ่ (Chain scission) ขณะทำการออกซิเดชัน และการเชื่อมโยง (Crosslinking) ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1-4.3

ในการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งที่ตำแหน่ง C2 C3 และ C6 แล้วเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอนิลและ/หรือคาร์บอกซิล ซึ่งปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นนี้สามารถบ่งบอกถึงระดับการออกซิเดชันว่าได้มากหรือน้อยเพียงใด นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการตัดสายโซ่ระหว่างการออกซิเดชันได้ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งสั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลง

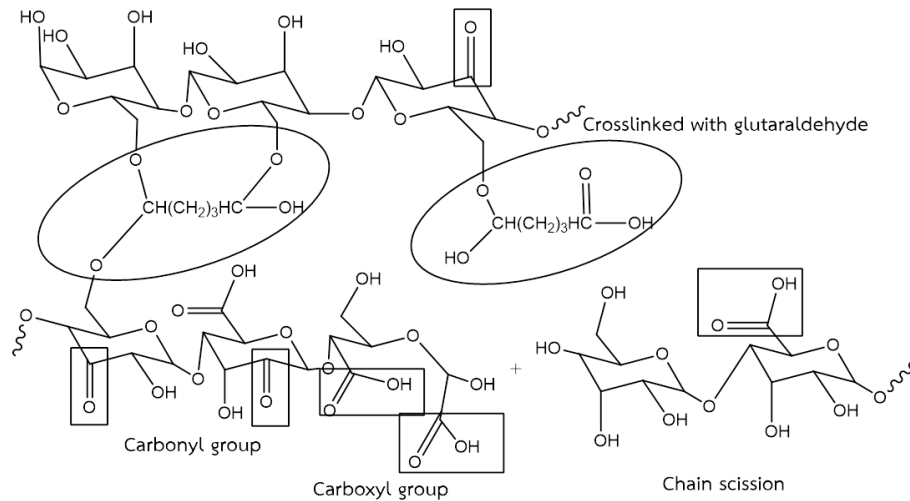


รูปที่ 4.1 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อเกิดการออกซิเดชันแบ่งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นได้เกิดการผ่านการเชื่อมโยงแบ่งด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยหมู่อัลดีไฮด์ 2 หมู่ ในกลูตารัลดีไฮด์ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งได้มากที่สุด 4 หมู่ สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่ 4.2 (ก) กลูตารัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระของแป้งเพียง 1 ตำแหน่ง เกิดเป็นพันธะเฮมิอะซีทัล (Hemiacetal linkage) รูปที่ 4.2 (ข) ไฮดรอกซิลอิสระของแป้ง 2 ตำแหน่ง และรูปที่ 4.2 (ง) ไฮดรอกซิลอิสระของแป้ง 4 ตำแหน่ง เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง ทำให้เกิดเป็นพันธะอะซีทัล (Acetal linkage) และรูปที่ 4.2 (ค) เกิดทั้งพันธะเฮมิอะซีทัลและอะซีทัลเกิดขึ้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อเกิดการเชื่อมโยงแบ่งด้วยกลูตารัลดีไฮด์



รูปที่ 4.3 โครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อตัดแปรร่วมสองชั้นโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อตัดแปรร่วมสองชั้นโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยถ้าเกิดการออกซิเดชันในการตัดแปรร่วมครั้งแรก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งได้ที่ตำแหน่ง C2, C3 และ C6 เปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอนิลและ/หรือคาร์บอกซิล และมีการตัดสายโซ่ (รูปที่ 4.1) ซึ่งเมื่อทำการตัดแปรร่วมที่สองโดยการเชื่อมโยง หมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่เหลืออยู่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่อไปได้ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเกิดขึ้น

ส่วนในกรณีที่ตัดแปรร่วมครั้งแรกโดยการเชื่อมโยง กลูตารัลดีไฮด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้ง เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเกิดขึ้น (รูปที่ 4.2) จากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่เหลือจากขั้นแรก สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นที่สองต่อไปได้ อีกทั้งยังอาจเกิดการตัดสายโซ่ที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงได้อีกด้วย

4.2 การทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล และองค์การเชื่อมโยง

ในการทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล รวมทั้งการทดสอบหาองค์การเชื่อมโยงทำเพื่อบ่งบอกระดับและยืนยันการตัดแปรร่วมว่ามีเกิดการตัดแปรร่วมเกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2-4.9 โดยการทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลนั้น ทำการทดสอบในแป้งที่ผ่านการออกซิเดชัน เนื่องจากแป้งออกซิไดส์มีสองหมู่ที่เกิดขึ้น และการทดสอบหาองค์การเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดความหนืดของแป้งนั้น ทดสอบในแป้งที่ผ่านการเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร่วม แป้งออกซิไดส์ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์ พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NS แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันโดยการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้ง ให้เป็นหมู่คาร์บอกซิลและคาร์บอนิลได้มากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาแป้งออกซิไดส์ที่ปริมาณสารออกซิไดส์แตกต่างกัน ได้แก่ 5% OS, 10% OS และ 20% OS พบว่าการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ส่งผลให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang S.D. และคณะ ที่พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อแป้ง ทำให้มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เพิ่มมากขึ้น [4]

ตารางที่ 4.2 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งออกซิไดส์สูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (%)
NS	0 ^a	0 ^a
5% OS	0.60±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b
10% OS	0.72±0.01 ^c	0.08±0.01 ^c
20% OS	0.87±0.08 ^d	0.20±0.05 ^d

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งครอสลิงค์สูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการเชื่อมโยง (%)
NS	6980±0.19 ^a	0 ^a
1% CS	4305±5.66 ^b	38.32±0.08 ^b
2% CS	-	-
3% CS	-	-
4% CS	3087±91.92 ^c	55.04±1.32 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งครอสลิงค์ พบว่าแป้งครอสลิงค์ ได้แก่ 1% CS และ 4% CS มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงขึ้นในแป้งดัดแปรสูตรดังกล่าว โดยพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่ของแป้งนั้นทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้

ลดลง การพองตัวของแป้งเกิดยากขึ้น จึงส่งผลต่อความหนืดสูงสุด ทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าสูตรแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร [55] และเมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น พบแนวโน้มองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Sakshi S. และคณะ ที่ค่าความหนืดสูงสุดลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยง [56] ซึ่งสูตรที่มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุด ได้แก่ 4% CS

ตารางที่ 4.4 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งดัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการเชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
10% OS-1% CS	0.49±0.01 ^b	0.05±0.02 ^b	5048±6.36 ^b	27.67±0.09 ^b
10% OS-4% CS	0.45±0.04 ^b	0.03±0.01 ^b	4750±9.90 ^c	31.95±0.14 ^c
20% OS-1% CS	0.75±0.02 ^c	0.05±0.01 ^b	5435±43.84 ^d	22.13±0.63 ^d

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการเชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
1% CS-10% OS	0.39±0.07 ^b	0.02±0.01 ^b	4545±21.21 ^b	34.89±0.30 ^b
1% CS-20% OS	0.54±0.03 ^c	0.04±0.02 ^c	5284±19.09 ^c	24.29±0.27 ^c
4% CS-10% OS	0.31±0.01 ^b	0.01±0.01 ^b	3975±77.78 ^d	43.05±1.11 ^d

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

นอกจากนี้ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ที่แสดงดังตารางที่ 4.4-4.5 พบว่าแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NS

แสดงถึงการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้ง ให้เป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลได้มากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เมื่อพิจารณาลำดับของการดัดแปรของแป้งดัดแปรสองขั้นตอน โดยที่เปรียบเทียบที่ปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน (ตารางที่ 4.4-4.5) พบว่าแป้งที่ดัดแปรขั้นตอนแรกโดยการออกซิเดชัน และขั้นที่สองโดยการเชื่อมโยง (แป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์) จากตารางที่ 4.4 มีแนวโน้มปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลที่สูงกว่าแป้งดัดแปรสองขั้นตอนโดยดัดแปรขั้นตอนแรกด้วยการเชื่อมโยงและขั้นที่สองด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (แป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์) จากตารางที่ 4.5 เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันในขั้นแรกของแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์นั้นมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระอยู่มากกว่า เพราะยังไม่ได้ผ่านการดัดแปรมาก่อน จึงมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่า ส่งผลให้มีแนวโน้มปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่สูงกว่าในแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งดัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการเชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
10% OS-1% CS	0.49±0.01 ^b	0.05±0.02 ^b	5048±6.36 ^b	27.67±0.09 ^b
10% OS-4% CS	0.45±0.04 ^b	0.03±0.01 ^b	4750±9.90 ^c	31.95±0.14 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการเชื่อมโยงของแป้งดัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการเชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
1% CS-10% OS	0.39±0.07 ^b	0.02±0.01 ^b	4545±21.21 ^b	34.89±0.30 ^b
4% CS-10% OS	0.31±0.01 ^b	0.01±0.01 ^b	3975±77.78 ^c	43.05±1.11 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ที่แตกต่างกัน ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงใน แป้งตัดแปรสองขั้นตอน โดยมีปริมาณสารออกซิไดส์อย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เท่ากัน จากตาราง ที่ 4.6-4.7 ไม่พบความแตกต่างของปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล เมื่อเพิ่มปริมาณสาร เชื่อมโยง ทั้งในแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ อาจเพราะปริมาณสาร เชื่อมโยงอย่างกลูตารัลดีไฮด์ที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ได้ส่งผลต่อการออกซิเดชันโดยตรง จึงไม่พบความ แตกต่างของปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการ เชื่อมโยงของแป้งตัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณ หมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณ หมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการ เชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
10% OS-1% CS	0.49±0.01 ^b	0.05±0.02 ^b	5048±6.36 ^b	27.67±0.09 ^b
20% OS-1% CS	0.75±0.02 ^c	0.05±0.01 ^b	5435±43.84 ^c	22.13±0.63 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่ เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ค่าความหนืดสูงสุด และองศาการ เชื่อมโยงของแป้งตัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณ หมู่คาร์บอนิล (%)	ปริมาณ หมู่คาร์บอกซิล (%)	ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, cps)	องศาการ เชื่อมโยง (%)
NS	0 ^a	0 ^a	6980±0.19 ^a	0 ^a
1% CS-10% OS	0.39±0.07 ^b	0.02±0.01 ^b	4545±21.21 ^b	34.89±0.30 ^b
1% CS-20% OS	0.54±0.03 ^c	0.04±0.02 ^c	5284±19.09 ^c	24.29±0.27 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่ เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ขณะที่พิจารณาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน แต่มีปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ที่ เท่ากันในแป้งตัดแปรสองขั้นตอน ดังตารางที่ 4.8-4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์อย่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (จากตารางที่ 4.8) มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่ม สูงขึ้น ซึ่งได้ผลที่คล้ายคลึงกันกับแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (จากตารางที่ 4.9) ที่เมื่อเพิ่มปริมาณ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล เนื่องจากปริมาณสารออกซิไดส์เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลให้มีโอกาสเกิดการออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งไปเป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลได้มากยิ่งขึ้น

จากผลของค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และองศาการเชื่อมโยง ในตารางที่ 4.4-4.5 พบว่าแป้งที่ดัดแปรสองชั้นตอนทุกลูตร มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ลดลง แป้งพองตัวได้ยากขึ้น จึงส่งผลต่อความหนืดสูงสุดที่ได้มีค่าลดต่ำลง [55] โดยค่าความหนืดสูงสุดนี้แปรผกผันกับองศาการเชื่อมโยง แสดงว่าเมื่อมีการเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น ความหนืดสูงสุดจะมีค่าลดต่ำลง และจากลำดับในการดัดแปรในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าสูตรแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (ตารางที่ 4.5) มีค่าความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่าสูตรแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (ตารางที่ 4.4) เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน เนื่องจากการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในชั้นตอนแรกมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารเชื่อมโยงอย่างกลูตาไรลดีไฮด์ได้มากกว่า จึงมีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่าสูตรแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ โดยสอดคล้องกันกับค่าองศาการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น (ตารางที่ 4.4-4.5) ของสูตรแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ที่มีค่าสูงกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน จากตารางที่ 4.6-4.7 พบว่าความหนืดสูงสุดมีค่าต่ำลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงในแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทั้งแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ เนื่องจากสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมโยง

ขณะที่พิจารณาที่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน แต่ปริมาณสารออกซิไดส์แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน จากตารางที่ 4.8-4.9 พบว่าสูตรที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ต่ำกว่า มีค่าความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่า เนื่องจากสารออกซิไดส์ในปริมาณที่ต่ำกว่านั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในแป้งได้น้อยกว่าเช่นกัน จึงเหลือหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากกว่าที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่อได้ อีกทั้งการขาดของสายโซ่แป้งระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดน้อยกว่าในปริมาณสารออกซิไดส์ที่ปริมาณต่ำ ดังนั้นค่าความหนืดสูงสุดที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำกว่าในสูตร 10% OS-1% CS และ 1% CS-10%OS ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าองศาการเชื่อมโยงที่สูง โดยจากผลของค่าความหนืดสูงสุดนี้มีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Sakshi S. และคณะ ที่ค่าความหนืดสูงสุดลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยง [56] ซึ่งสูตรที่มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุด และมีองศาการเชื่อมโยงที่สูงที่สุดในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ได้แก่ 4% CS-10% OS โดยสามารถเรียงลำดับองศาการเชื่อมโยงจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ 4% CS-10% OS > 1% CS-10% OS > 10% OS-4% CS > 10% OS-1% CS > 1% CS-20% OS > 20% OS-1% CS

จากการทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล และองศาการเชื่อมโยง สามารถสรุปได้ว่าสูตร 20% OS มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลสูงที่สุด ขณะที่สูตร 4% CS-10%OS มี

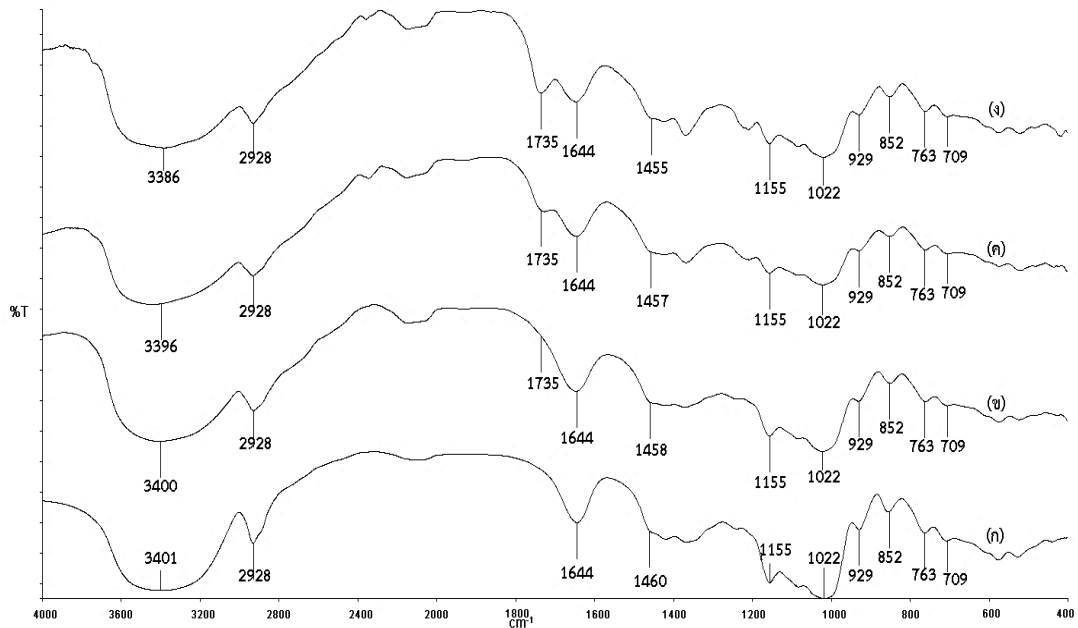
ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลต่ำที่สุด ส่วนองศาการเชื่อมโยงที่สูงที่สุด ได้แก่ สูตร 4% CS และองศาการเชื่อมโยงที่ต่ำที่สุด ได้แก่ สูตร 20% OS-1% CS โดยปัจจัยในเรื่องลำดับของดัดแปร และปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ส่งผลที่ชัดเจนต่อผลการทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิลและองศาการเชื่อมโยง

4.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

ทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) โดยเลขคลื่นและลักษณะการสั่นต่างๆ ของแป้งดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปร แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200 – 3600	O-H stretching
2800 – 3000	Alkane C-H stretching
1730 – 1750	Carboxyl and Carbonyl C=O stretching
1640-1645	Hydrogen bonding
1600 – 1630	Bounded water
1420 – 1485	O-H bending
1100 – 1300	C-O-C stretching
1100 – 1200	C-O-H bending
900 – 940	C-H out-of-plane bending
800 – 860	C-H out-of-plane bending
737 – 770	C-H out-of-plane bending



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่ต่างกักัน (ก) NS (ข) 5% OS (ค) 10% OS และ (ง) 20% OS

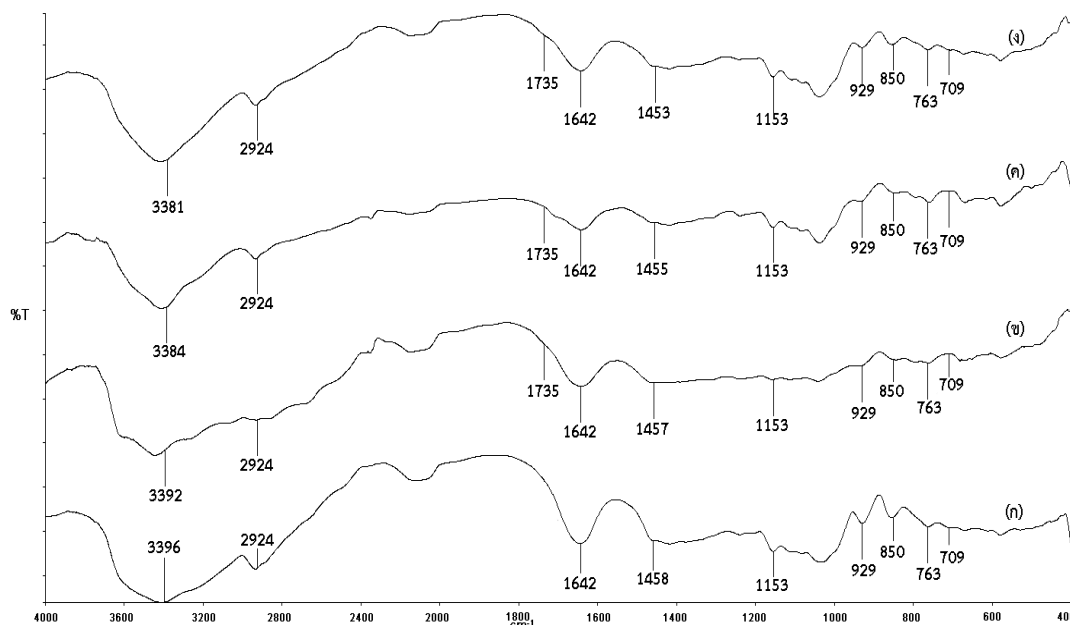
ตารางที่ 4.11 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งออกซิไดส์ต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm ⁻¹)			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹	709 cm ⁻¹	1735 cm ⁻¹ / 709 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹ / 709 cm ⁻¹
NS	-	29.95±0.25 ^a	23.58±0.77 ^a	-	1.27±0.03 ^a
5% OS	20.47±0.74 ^a	20.66±0.45 ^a	22.935±0.62 ^a	0.89±0.01 ^a	0.90±0.04 ^b
10% OS	29.57±0.17 ^b	27.32±0.81 ^a	25.28±0.56 ^a	1.17±0.02 ^b	1.09±0.01 ^c
20% OS	34.92±0.32 ^c	25.63±2.40 ^a	26.00±7.34 ^a	1.78±0.04 ^c	1.14±0.01 ^c

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm⁻¹ และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p < 0.05)

จากรูปที่ 4.4 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.1-ก.4 แสดงสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่ต่างกักัน พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมทุกสูตรมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากเป็นลักษณะจากโครงสร้างหลักของแป้ง โดยสเปกตรัมที่พบ ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่น 3200-3600 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H

stretching จากแป้ง พีคช่วงความยาวคลื่น $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-H stretching ของ CH_2 จากแป้ง พีคที่ $1600-1630\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H bending จากโมเลกุลน้ำในแป้ง พีคที่ความยาวคลื่น $1455-1460\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแป้ง พีคช่วง $1100-1300\text{ cm}^{-1}$ และ $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching และ C-O-H bending ของแป้งตามลำดับ ส่วนพีคที่ $800-940\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-H bending และพีค 763 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-H rocking [4, 7]



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF

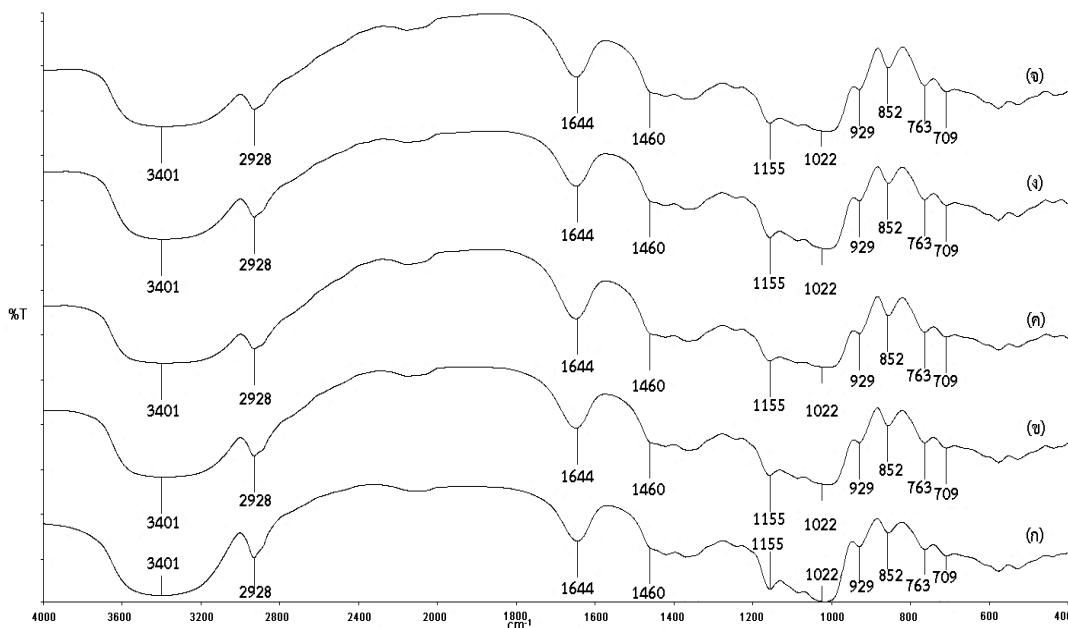
อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร ได้แก่ 5% OSF, 10% OSF และ 20% OSF มีอินฟราเรดสเปกตรัมลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยพบช่วงความยาวคลื่น $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พบพีคช่วงความยาวคลื่น $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-H stretching ของ CH_2 จากแป้ง ส่วนลักษณะการสั่นของ O-H bending จากโมเลกุลน้ำในแป้ง พบที่พีคช่วง $1600-1630\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแป้ง พบพีคที่ความยาวคลื่น $1453-1458\text{ cm}^{-1}$ พีคช่วง $1100-1300\text{ cm}^{-1}$ และ $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching และ C-O-H bending ของแป้งตามลำดับ ส่วนพีคที่ $800-940\text{ cm}^{-1}$ และพีค 763 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-H bending และ C-H rocking ตามลำดับ [4, 7]

ตารางที่ 4.12 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งออกซิไดส์ต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm ⁻¹)			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm ⁻¹	1642 cm ⁻¹	709 cm ⁻¹	1735 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹	1642 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹
NSF	-	55.28±0.99 ^a	49.86±0.00 ^a	-	1.11±0.02 ^a
5% OSF	41.60±1.97 ^a	42.98±4.19 ^{bc}	45.60±3.08 ^a	0.91±0.02 ^a	0.94±0.03 ^b
10% OSF	46.94±1.34 ^{ab}	45.57±0.28 ^b	45.47±0.57 ^a	1.03±0.02 ^b	1.00±0.01 ^{bc}
20% OSF	39.17±0.76 ^c	36.58±0.18 ^c	34.52±0.08 ^b	1.13±0.02 ^c	1.06±0.01 ^{ac}

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm⁻¹ และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p < 0.05)

นอกจากนี้ยังพบอินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ที่ความยาวคลื่น 1735 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร ในรูปที่ 4.4 (ข)-(ง) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.2-ก.4 และฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร ในรูปที่ 4.5 (ข)-(ง) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.16-ก.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งเป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลได้ จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่ามีสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงขึ้น ทั้งแป้งออกซิไดส์และฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ โดยสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm⁻¹ ของแป้งออกซิไดส์ (ตารางที่ 4.11) มีค่า ดังนี้ 0.89±0.01, 1.17±0.02 และ 1.78±0.04 ในแป้งสูตร 5% OS, 10% OS และ 20% OS ตามลำดับ ขณะที่สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm⁻¹ ของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ (ตารางที่ 4.12) ได้แก่ 5% OSF, 10% OSF และ 20% OSF มีสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าว ดังนี้ 0.91±0.02 1.03±0.02 และ 1.13±0.02 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมในช่วงการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending ของแป้ง มีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลของแป้งออกซิไดส์กับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งเป็นพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น [57-58]



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป่งที่ไม่ได้ตัดแปรรและตัดแปรรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NS (ข) 1% CS (ค) 2% CS, (ง) 3% CS และ (จ) 4% CS

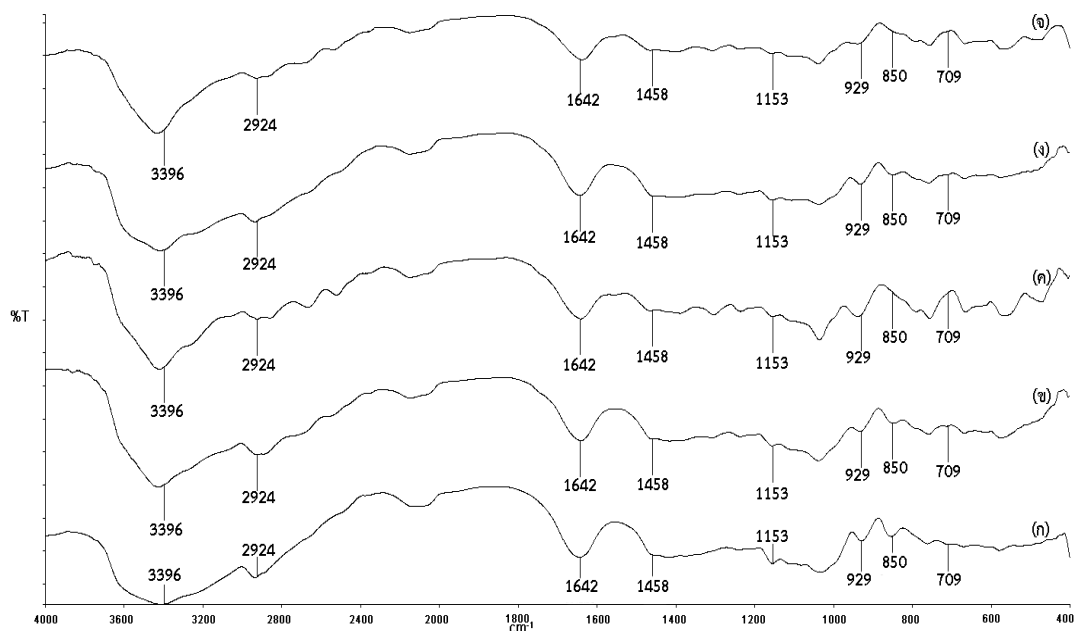
ตารางที่ 4.13 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป่งที่ไม่ได้ตัดแปรรและแป่งครอสลิงค์ต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm ⁻¹)		สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*
	1644 cm ⁻¹	709 cm ⁻¹	
NS	29.95±0.25 ^a	23.58±0.77 ^a	1.27±0.03 ^a
1% CS	28.09±0.71 ^a	24.05±0.71 ^{ab}	1.17±0.00 ^b
2% CS	27.58±0.71 ^a	25.05±1.28 ^a	1.10±0.03 ^{bc}
3% CS	24.42±0.80 ^b	22.59±1.20 ^{ab}	1.08±0.02 ^c
4% CS	12.86±1.13 ^c	20.73±0.21 ^b	0.64±0.02 ^d

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm⁻¹ และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p < 0.05)

อินฟราเรดสเปกตรัมของแป่งที่ตัดแปรรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.6 (ข)-(ง) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.5-ก.8 พบว่าแป่งครอสลิงค์ทุกสูตรแสดงลักษณะสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันกับแป่งที่ไม่ได้ตัดแปรร เช่นเดียวกันกับฟิล์มจากแป่งที่ตัดแปรรโดยการ

เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกันทุกสูตร จากรูปที่ 4.7 (ข)-(ง) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.19-ก.22 พบสเปกตรัมหลักคล้ายคลึงกันกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีแป้งเป็นโครงสร้างหลักที่คล้ายกัน โดยจากตารางที่ 4.13 พีคที่ 1644 cm^{-1} ในส่วนของแป้ง และจากตารางที่ 4.14 พีคที่ 1642 cm^{-1} ในส่วนของฟิล์ม แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง โดยในแป้งครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรพบสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 และ 1642 cm^{-1} ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรตามลำดับ เนื่องจากการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนและมีการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเชื่อมโยง จากการลดลงของสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 และ 1642 cm^{-1} นี้สามารถบ่งบอกได้ว่าการเชื่อมโยงเกิดขึ้นทั้งในแป้งครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร [7, 59] นอกจากนี้พบแนวโน้มการลดลงของสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคดังกล่าวตามปริมาณสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับองค์การเชื่อมโยง แสดงดังที่ 4.3 นอกจากนี้ในแป้งครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ไม่พบอินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ เนื่องจากไม่มีหมู่ฟังก์ชันใหม่เกิดขึ้นหลังจากดัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

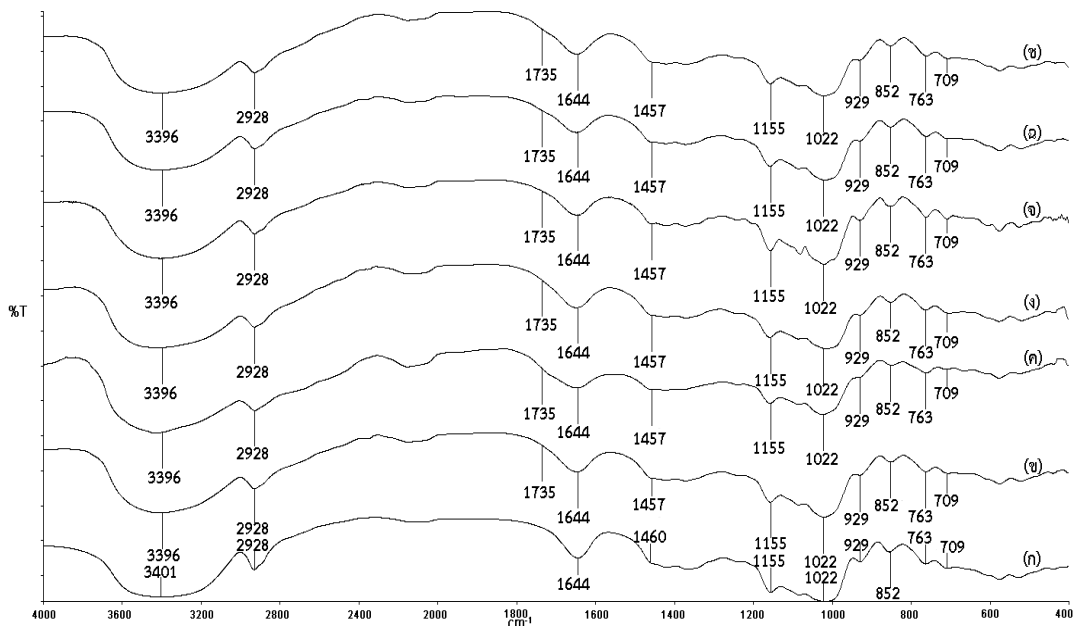


รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF, (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF

ตารางที่ 4.14 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ดัดแปรและแบงก์ครอสลิงค์ต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})		สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*
	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	1642 cm^{-1} / 709 cm^{-1}
NSF	55.28±0.99 ^a	49.86±0.00 ^a	1.11±0.02 ^a
1% CSF	41.34±0.20 ^b	42.29±0.28 ^{ab}	0.98±0.00 ^b
2% CSF	35.25±2.55 ^{bc}	37.98±3.27 ^b	0.93±0.01 ^{bc}
3% CSF	36.07±1.28 ^{bc}	40.62±1.43 ^{ab}	0.89±0.00 ^c
4% CSF	31.30±3.27 ^c	45.43±3.95 ^{ab}	0.69±0.01 ^d

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

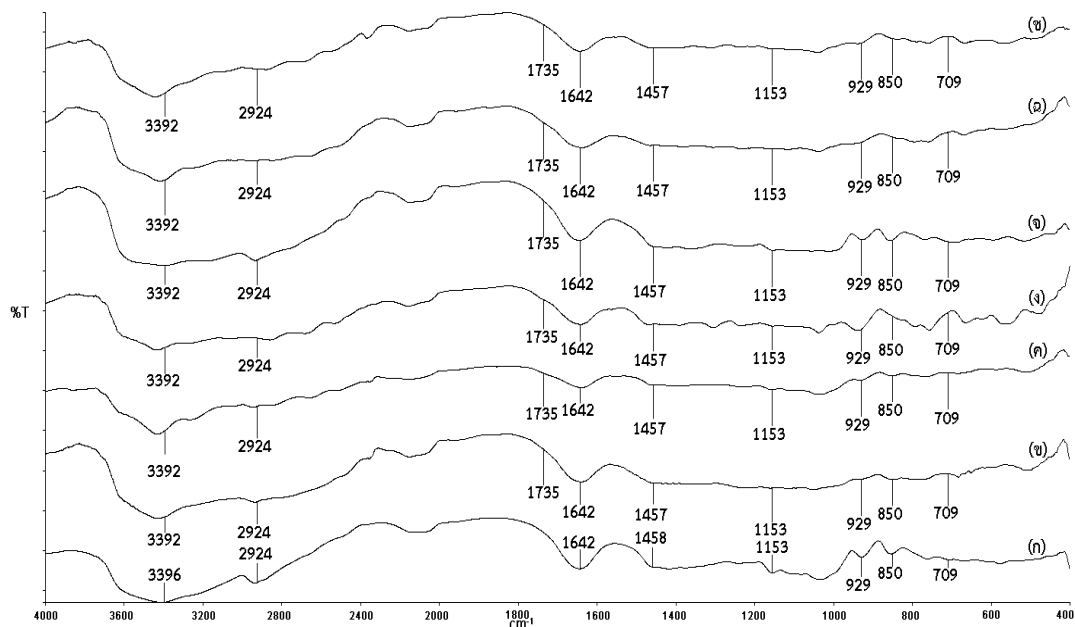


รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของแบงก์ที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NS (ข) 10% OS-1% CS (ค) 10% OS-4% CS (ง) 20% OS-1% CS (จ) 1% CS-10% OS (ฉ) 1% CS-20% OS และ (ช) 4% CS-10% OS

ตารางที่ 4.15 พื้นที่ใต้กราฟของพีดและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีดในแบ่งที่ไม่ได้ตัดแปรและแบ่งตัดแปรสองชั้นตอนสูตรต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีด (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีด*	
	1735 cm^{-1}	1644 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1644 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	29.95 ± 0.25^a	23.58 ± 0.77^a	-	1.27 ± 0.03^a
10% OS-1% CS	27.57 ± 0.39^a	24.77 ± 0.29^a	23.48 ± 1.17^a	1.16 ± 0.01^a	1.05 ± 0.01^{bcd}
10% OS-4% CS	28.33 ± 0.20^a	24.44 ± 0.38^a	24.57 ± 1.12^a	1.15 ± 0.05^a	1.00 ± 0.02^{cd}
20% OS-1% CS	32.67 ± 0.22^a	27.25 ± 0.86^a	23.64 ± 1.38^a	1.38 ± 0.00^b	1.15 ± 0.04^b
1% CS-10% OS	29.22 ± 1.07^a	25.43 ± 1.62^a	26.04 ± 1.12^a	1.12 ± 0.01^a	0.98 ± 0.03^{de}
1% CS-20% OS	31.84 ± 6.94^a	26.55 ± 5.92^a	24.50 ± 1.33^a	1.30 ± 0.03^b	1.09 ± 0.02^{bc}
4% CS-10% OS	27.26 ± 0.32^a	26.78 ± 0.22^a	28.48 ± 0.97^a	0.96 ± 0.01^c	0.94 ± 0.00^e

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีด = พื้นที่ใต้กราฟของพีดที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีด 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแบ่งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF

ตารางที่ 4.16 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตรต่างๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1642 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	55.28 ± 0.99^a	49.86 ± 0.00^a	-	1.11 ± 0.02^a
10% OS-1% CSF	44.14 ± 0.11^a	44.41 ± 0.08^b	45.00 ± 0.03^b	0.98 ± 0.00^a	0.99 ± 0.00^{bc}
10% OS-4% CSF	42.77 ± 0.07^a	42.84 ± 0.75^b	45.80 ± 0.04^{ab}	0.93 ± 0.00^{ab}	0.94 ± 0.02^{bd}
20% OS-1% CSF	36.57 ± 0.74^{bc}	35.19 ± 0.25^c	33.18 ± 0.04^c	1.10 ± 0.02^c	1.06 ± 0.01^e
1% CS-10% OSF	39.90 ± 0.55^{ab}	40.12 ± 0.15^b	45.23 ± 0.01^b	0.88 ± 0.01^b	0.89 ± 0.00^d
1% CS-20% OSF	40.97 ± 2.64^{ab}	40.24 ± 3.14^b	39.33 ± 2.86^d	1.04 ± 0.01^c	1.02 ± 0.00^{ce}
4% CS-10% OSF	33.78 ± 1.08^c	31.62 ± 0.60^c	42.75 ± 0.45^{bd}	0.79 ± 0.03^d	0.74 ± 0.02^f

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากรูปที่ 4.8 (ข)-(ค) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.9-ก.14 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ พบอินฟราเรดสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซิไดส์ และแป้งครอสลิงค์ ซึ่งได้ผลในการทำงานเดียวกันกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน จากรูปที่ 4.9 (ข)-(ค) และภาคผนวก ก รูปที่ ก.23-ก.28 จากโครงสร้างหลักที่เป็นแป้งเช่นเดียวกันทำให้พบอินฟราเรดสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซิไดส์ และแป้งครอสลิงค์ โดยพบอินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ที่ความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งดัดแปรสองชั้นตอนและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรที่เกิดขึ้นผ่านการออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.9 (ข)-(ค) โดยสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีคที่เป็นการสั่นแบบ C=O stretching จากตารางที่ 4.15 เมื่อพิจารณาลำดับของการดัดแปรในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน พบว่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ของแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูงกว่าแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตรอย่างชัดเจนในสูตร 10% OS-4% CS ซึ่งได้ผลในการทำงานเดียวกันกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนจากตารางที่ 4.16 ที่พบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูงกว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์อย่างชัดเจนในสูตร 10% OS-1% CSF และ 10% OS-4% CSF เนื่องจากทั้งแป้งและฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ในชั้นตอนแรกของการเกิดออกซิเดชันมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่

สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า จึงพบปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่มีแนวโน้มสูงกว่าแป้ง และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์

ตารางที่ 4.17 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm ⁻¹)			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹	709 cm ⁻¹	1735 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹
NS	-	29.95±0.25 ^a	23.58±0.77 ^a	-	1.27±0.03 ^a
10% OS-1% CS	27.57±0.39 ^a	24.77±0.29 ^b	23.48±1.17 ^a	1.16±0.01 ^a	1.05±0.01 ^b
10% OS-4% CS	28.33±0.20 ^a	24.44±0.38 ^b	24.57±1.12 ^a	1.15±0.05 ^a	1.00±0.02 ^b

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm⁻¹ และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p < 0.05)

ตารางที่ 4.18 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและ แป้งตัดแปรสองขั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm ⁻¹)			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹	709 cm ⁻¹	1735 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹	1644 cm ⁻¹ /709 cm ⁻¹
NS	-	29.95±0.25 ^a	23.58±0.77 ^a	-	1.27±0.03 ^a
1% CS-10% OS	29.22±1.07 ^a	25.43±1.62 ^b	26.04±1.12 ^{ab}	1.12±0.01 ^a	0.98±0.03 ^b
4% CS- 10% OS	27.26±0.32 ^a	26.78±0.22 ^{ab}	28.48±0.97 ^b	0.96±0.01 ^b	0.94±0.00 ^b

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm⁻¹ และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p < 0.05)

ตารางที่ 4.19 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1642 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	55.28 ± 0.99^a	49.86 ± 0.00^a	-	1.11 ± 0.02^a
10% OS-1% CSF	44.14 ± 0.11^a	44.41 ± 0.08^b	45.00 ± 0.03^b	0.98 ± 0.00^a	0.99 ± 0.00^b
10% OS-4% CSF	42.77 ± 0.07^a	42.84 ± 0.75^b	45.80 ± 0.04^c	0.93 ± 0.00^a	0.94 ± 0.02^b

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.20 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1642 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	55.28 ± 0.99^a	49.86 ± 0.00^a	-	1.11 ± 0.02^a
1% CS-10% OSF	39.90 ± 0.55^a	40.12 ± 0.15^b	45.23 ± 0.01^b	0.88 ± 0.01^a	0.89 ± 0.00^b
4% CS-10% OSF	33.78 ± 1.08^b	31.62 ± 0.60^c	42.75 ± 0.45^c	0.79 ± 0.03^b	0.74 ± 0.02^c

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.17-4.18 เมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน โดยมีสารออกซิไดส์ในปริมาณที่คงที่ พบสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงอย่างกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ต่ำกว่า ได้แก่ สูตร 1% CS-10% OS มีสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ที่สูงกว่าสูตรที่มีปริมาณกลูตาร์ลดีไฮด์ที่สูง ได้แก่ สูตร 4% CS-10% OS อย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.18) เนื่องจากสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่ต่ำกว่ามีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลได้น้อยกว่าสูตรที่

มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่สูง ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลที่เหลือเพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อในการตัดแปรชั้นที่สองจึงเหลือมากกว่า ส่งผลให้พื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ที่มากกว่าสูตร 4% CS-10% OS ซึ่งได้ผลในการทำงานเดียวกันกับฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนเมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.19-4.20) โดยที่สูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่ต่ำ ได้แก่ สูตร 1% CS-10% OSF พบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ที่สูงกว่าเช่นเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่สูงอย่างสูตร 4% CS-10% OSF (ตารางที่ 4.20)

ตารางที่ 4.21 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1644 cm^{-1}	709 cm^{-1}	1735 cm^{-1} / 709 cm^{-1}	1644 cm^{-1} / 709 cm^{-1}
NS	-	29.95 ± 0.25^a	23.58 ± 0.77^a	-	1.27 ± 0.03^a
10% OS-1% CS	27.57 ± 0.39^a	24.77 ± 0.29^b	23.48 ± 1.17^a	1.16 ± 0.01^a	1.05 ± 0.01^b
20% OS-1% CS	32.67 ± 0.22^b	27.25 ± 0.86^c	23.64 ± 1.38^a	1.38 ± 0.00^b	1.15 ± 0.04^{ab}

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.22 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งตัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1644 cm^{-1}	709 cm^{-1}	1735 cm^{-1} / 709 cm^{-1}	1644 cm^{-1} / 709 cm^{-1}
NS	-	29.95 ± 0.25^a	23.58 ± 0.77^a	-	1.27 ± 0.03^a
1% CS-10% OS	29.22 ± 1.07^a	25.43 ± 1.62^a	26.04 ± 1.12^a	1.12 ± 0.01^a	0.98 ± 0.03^b
1% CS-20% OS	31.84 ± 6.94^a	26.55 ± 5.92^a	24.50 ± 1.33^a	1.30 ± 0.03^b	1.09 ± 0.02^b

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.23 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่ต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1642 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	55.28 ± 0.99^a	49.86 ± 0.00^a	-	1.11 ± 0.02^a
10% OS-1% CSF	44.14 ± 0.11^a	44.41 ± 0.08^b	45.00 ± 0.03^b	0.98 ± 0.00^a	0.99 ± 0.00^b
20% OS-1% CSF	36.57 ± 0.74^b	35.19 ± 0.25^c	33.18 ± 0.04^c	1.10 ± 0.02^b	1.06 ± 0.01^c

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.24 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีคในฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่ต่างกัน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีค (cm^{-1})			สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค*	
	1735 cm^{-1}	1642 cm^{-1}	709 cm^{-1}	$1735 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$	$1642 \text{ cm}^{-1} / 709 \text{ cm}^{-1}$
NS	-	55.28 ± 0.99^a	49.86 ± 0.00^a	-	1.11 ± 0.02^a
1% CS-10% OSF	39.90 ± 0.55^a	40.12 ± 0.15^b	45.23 ± 0.01^{ab}	0.88 ± 0.01^a	0.89 ± 0.00^b
1% CS-20% OSF	40.97 ± 2.64^a	40.24 ± 3.14^b	39.33 ± 2.86^b	1.04 ± 0.01^b	1.02 ± 0.00^c

*หมายเหตุ : สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค = พื้นที่ใต้กราฟของพีคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพีค 709 cm^{-1} และค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบแป้งดัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่ต่างกัน แต่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน จากตารางที่ 4.21-4.22 พบสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์อย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งในแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ เนื่องจากปริมาณสารออกซิไดส์ที่มากกว่าสามารถเกิดการออกซิเดชันเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระให้เป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลได้

มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลจากตารางที่ 4.8-4.9 ที่มีค่าสูงกว่าในสูตรที่มีสารออกซิไดส์ปริมาณมาก ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกันกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในตารางที่ 4.23-4.24

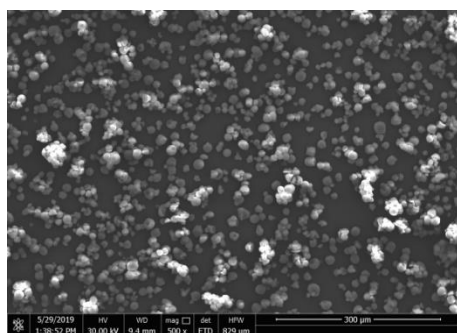
จากตารางที่ 4.15 สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 cm^{-1} ของแป้งดัดแปรสองชั้นตอน และจากตารางที่ 4.16 สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1642 cm^{-1} ของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง โดยพบสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 cm^{-1} และ 1642 cm^{-1} ของแป้งดัดแปรสองชั้นตอนและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนต่ำกว่าสูตรแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรตามลำดับ เนื่องจากมีการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนและมีการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการเชื่อมโยง จากผลนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าแป้งเกิดการเชื่อมโยงขึ้น [7, 59] นอกจากนี้พบการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของสเปกตรัมในช่วงการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending ทั้งแป้งดัดแปรสองชั้นตอนและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ซึ่งเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลของแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยการออกซิเดชันกับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งเป็นพันธะไฮโดรเจนใหม่เกิดขึ้น [57-58]

จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันสามารถสรุปได้ว่า ในแป้งและฟิล์มจากแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบอินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ที่ความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} ซึ่งมาจากการสั่นของ C=O stretching จากหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล และพบการเคลื่อนของเลขคลื่นที่ลดลงของการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending โดยสูตร 20% OS และ 20% OSF มีสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} ที่สูงที่สุด และที่ต่ำที่สุดได้แก่ สูตร 5% OS และ 4% CS-10% OSF ขณะที่การเชื่อมโยงไม่พบสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยจากสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 cm^{-1} พบสูตร 4% CS ต่ำที่สุด และสูตรที่สูงที่สุด ได้แก่ NS เช่นเดียวกับสูตรของฟิล์มที่สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1642 cm^{-1} พบสูตร 4% CSF ต่ำที่สุด และสูตรที่สูงที่สุด ได้แก่ NSF ซึ่งพีคดังกล่าวแสดงถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง และการลดลงของสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1644 cm^{-1} และ 1642 cm^{-1} อาจบ่งบอกแตกออกของพันธะไฮโดรเจนและมีการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเชื่อมโยง [7, 59] โดยปัจจัยในเรื่องปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ส่งผลที่ชัดเจนที่สุดต่อสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีค 1735 cm^{-1} จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันทั้งเม็ดแป้งและฟิล์ม

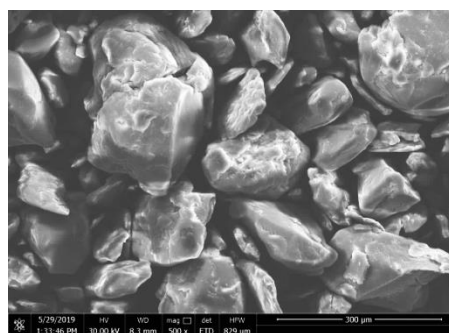
4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

4.4.1 สัณฐานวิทยาของเม็ดแป้ง

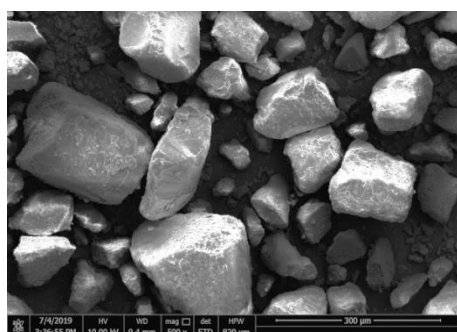
ศึกษาสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งตัดแปรต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10-4.12



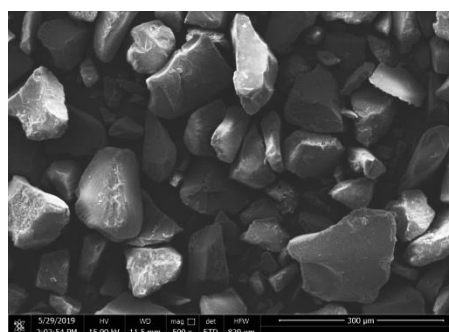
(ก) NS, 500X



(ข) 5% OS, 500X



(ค) 10% OS, 500X



(ง) 20% OS, 500X

รูปที่ 4.10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 5% OS (ค) 10% OS และ (ง) 20% OS

จากรูปที่ 4.10 (ก) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร พบว่าเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีขนาดเล็ก และมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนบ้าง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งที่ออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปที่ 4.10 (ข) 5% OS (ค) 10% OS และ (ง) 20% OS พบว่าแป้งออกซิไดส์ทุกสูตรมีลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการออกซิเดชันอย่างเห็นได้ชัดเจน เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น ลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมและไม่เป็นเม็ดกลม ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Zhang S.D. และคณะ พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งข้าวโพดที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดเม็ดแป้งใหญ่ขึ้นจากการเกิดเจลาทีไนเซชัน โดยการเกิดเจลาทีไนเซชันในขั้นตอนการสังเคราะห์นั้นมีส่วนช่วยให้สารออกซิไดส์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอะไมโลเพคตินใน

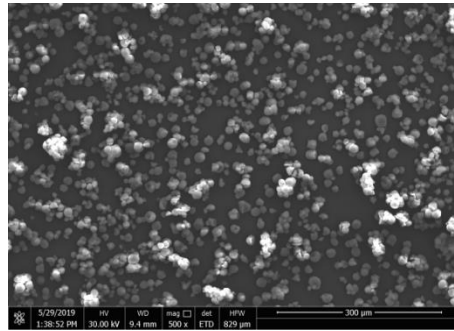
โมเลกุลแข็งได้ง่ายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ทำให้เกิดเจลลาทีโนเซชัน [4, 50] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งออกซิไดส์ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรด้วยเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยพบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร ได้แก่ (ข) 1% CS (ค) 2% CS (ง) 3% CS และ (จ) 4% CS ยังคงมีลักษณะเป็นเม็ดกลมคล้ายคลึงกับแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร และบางส่วนมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นระหว่างสายโซ่ของแป้ง [60] ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Sukhija S. และคณะ ที่พบการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งที่ผ่านการเชื่อมโยงโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมโยง [56] โดยการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนนี้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น

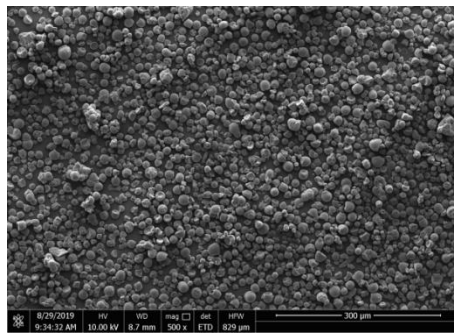
จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ พบว่าแป้งตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตรที่แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข)-(ช) มีลักษณะสัณฐานวิทยาแตกต่างจากเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร (รูปที่ 4.12 (ก)) อย่างชัดเจน พบว่าเม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น ลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมคล้ายกันกับลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งออกซิไดส์ ไม่เป็นเม็ดกลมเช่นเดียวกับแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร ซึ่งขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่ขึ้นเกิดเนื่องจากการเกิดเจลลาทีโนเซชันในขั้นตอนการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [4] นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดแป้งตัดแปรสองขั้นตอนที่ตัดแปรขั้นตอนแรกโดยการเชื่อมโยง ได้แก่ (จ) 1% CS-10% OS (ฉ) 1% CS-20% และ (ช) 4% CS-10% OS มีขนาดของเม็ดแป้งเล็กกว่าสูตรแป้งตัดแปรสองขั้นตอนที่ตัดแปรขั้นตอนแรกโดยการออกซิเดชัน เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการตัดแปรนั้นส่งผลต่อการบวมตัวและขยายขนาดของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อนำไปตัดแปรขั้นที่สองด้วยการออกซิเดชันที่มีการทำให้เกิดเจลลาทีโนเซชันจึงเกิดได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับผลของปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่น้อยกว่าในสูตรแป้งตัดแปรสองขั้นตอนที่ตัดแปรขั้นตอนแรกโดยการเชื่อมโยง แสดงดังตารางที่ 4.5 อีกทั้งยังพบว่าสูตร 4% CS-10% OS มีการขยายขนาดของเม็ดแป้งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตร เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงที่มากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับองค์การเชื่อมโยงที่แสดงดังตารางที่ 4.5 ที่มากกว่าสูตรแป้งตัดแปรสองขั้นตอนสูตรอื่นๆ

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน แต่ปริมาณสารออกซิไดส์ที่เท่ากัน (จากรูป 4.12) ได้แก่ สูตร (ข) 10% OS-1% CS เปรียบเทียบกับ (ค) 10% OS-4% CS และ (จ) 1% CS-10% OS เปรียบเทียบกับ (ช) 4% CS-10% OS พบขนาดเม็ดแป้งที่เล็กกว่าในสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงสูง ได้แก่ สูตร 10% OS-4% CS และ 4% CS-10% OS เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงมากภายในเม็ดแป้ง การบวมตัวหรือการขยายขนาดของเม็ดแป้งจึงเป็นไปได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน แต่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน ได้แก่ สูตร (ข)

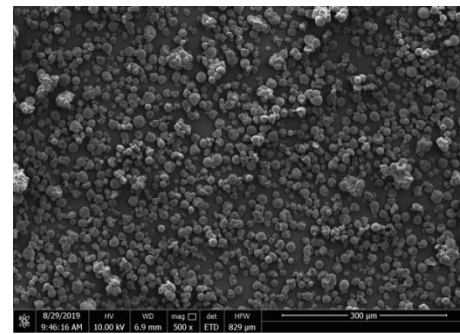
10% OS-1% CS เปรียบเทียบกับ (ง) 20% OS-1% CS และ (จ) 1% CS-10% OS เปรียบเทียบกับ (ฉ) 1% CS-20% OS พบว่าสัณฐานวิทยาไม่มีความแตกต่างกันชัดเจน



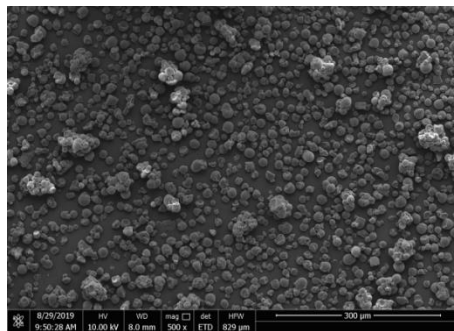
(ก) NS, 500X



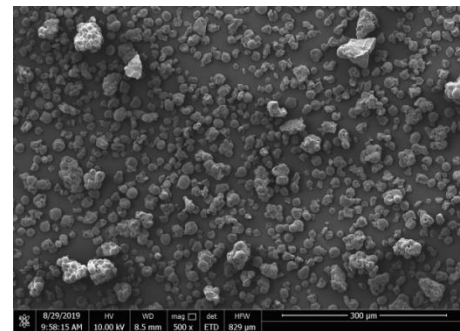
(ข) 1% CS, 500X



(ค) 2% CS, 500X

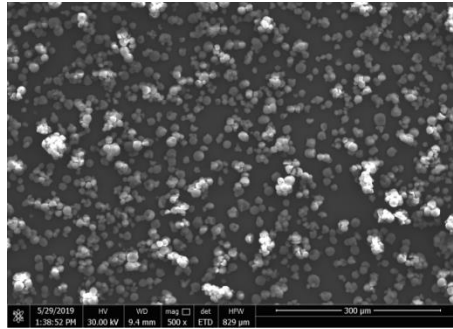


(ง) 3% CS, 500X

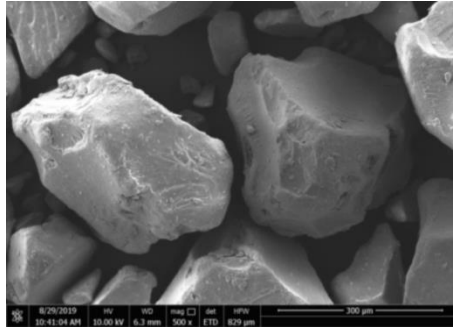


(จ) 4% CS, 500X

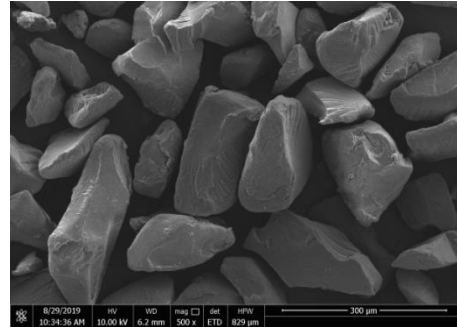
รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่ต่างกััน โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 1% CS (ค) 2% CS, (ง) 3% CS และ (จ) 4% CS



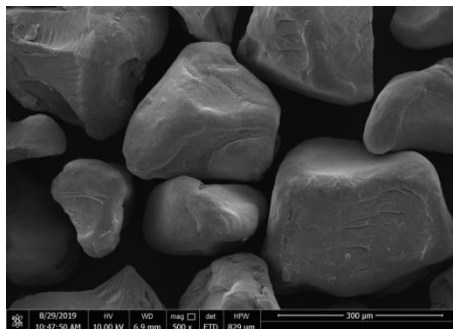
(ก) NS, 500X



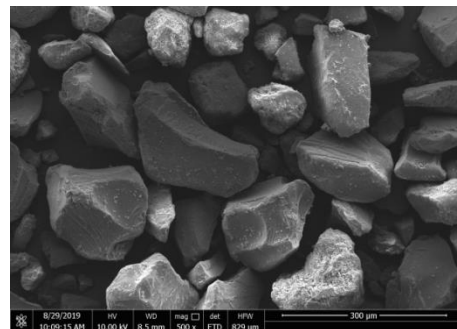
(ข) 10% OS-1% CS, 500X



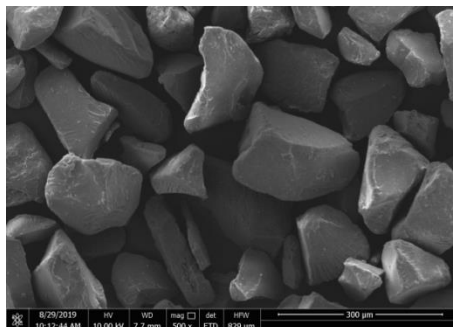
(ค) 10% OS-4% CS, 500X



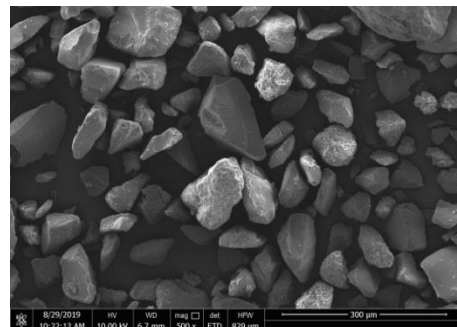
(ง) 20% OS-1% CS, 500X



(จ) 1% CS-10% OS, 500X



(ฉ) 1% CS-20% OS, 500X



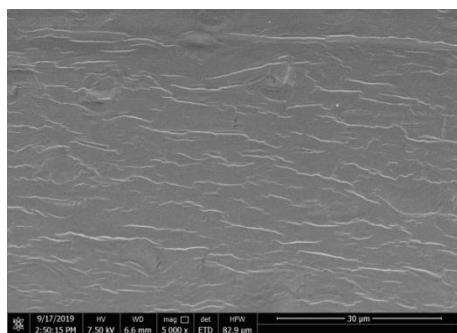
(ช) 4% CS-10% OS, 500X

รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยใช้กำลังขยายภาพ 500 เท่า (ก) NS (ข) 10% OS-1% CS (ค) 10% OS-4% CS (ง) 20% OS-1% CS (จ) 1% CS-10% OS (ฉ) 1% CS-20% OS และ (ช) 4% CS-10% OS

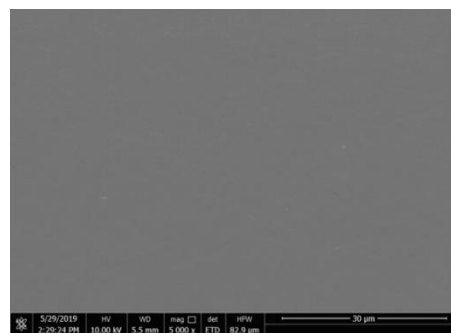
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งทุกสูตร สามารถสรุปได้ว่าแป้งทุกสูตรที่ผ่านการออกซิเดชันเม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นก้อนเหลี่ยม ไม่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ขณะที่การเชื่อมโยงส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการบวมตัวและขยายขนาดได้มากขึ้น โดยสูตรที่ 4% CS พบเม็ดแป้งรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนมากที่สุด โดยในแป้งตัดแปรสองชั้นตอน พบว่าปัจจัยในเรื่องลำดับของการตัดแปร และปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในแป้งตัดแปรสองชั้นตอนนั้นส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งอย่างชัดเจน ซึ่งแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ พบขนาดเม็ดแป้งที่เล็กกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ เนื่องจากเม็ดแป้งที่เกิดการเชื่อมโยงส่งผลให้เกิดการบวมตัวในขั้นตอนการออกซิเดชันได้มากยิ่งขึ้น และในสูตร 4% CS-10% OS พบขนาดของเม็ดแป้งที่เล็กที่สุดในแป้งตัดแปรสองชั้นตอน

4.4.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้ง

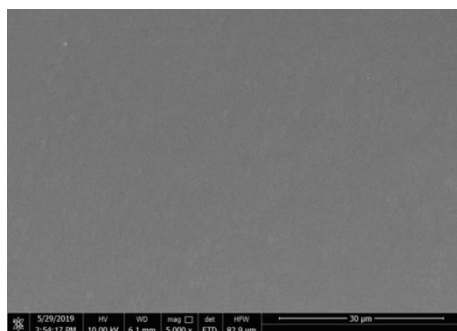
ศึกษาสัณฐานวิทยาในลักษณะภาคตัดขวาง (Cross-section) ของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งตัดแปรต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



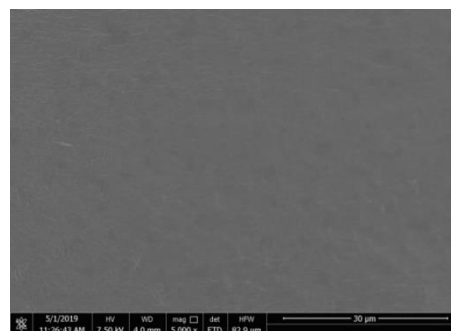
(ก) NSF, 5000X



(ข) 5% OSF, 5000X

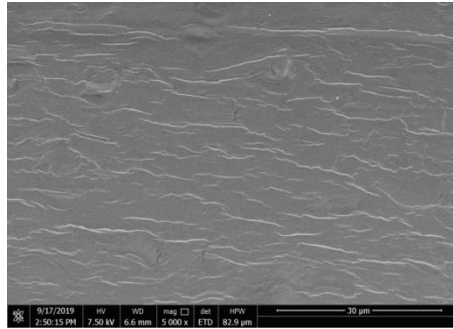


(ค) 10% OSF, 5000X

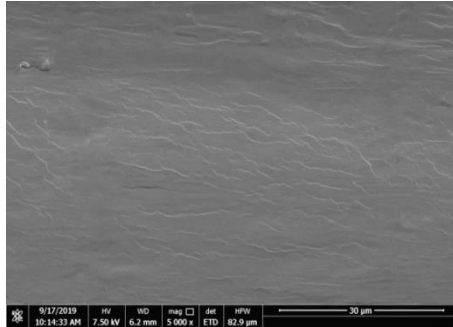


(ง) 20% OSF, 5000X

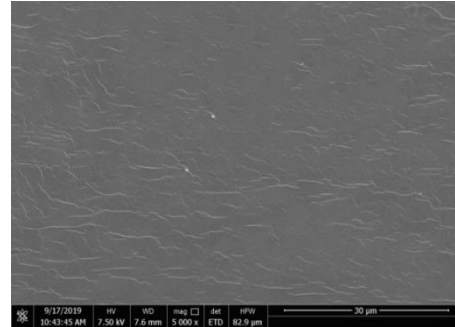
รูปที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF



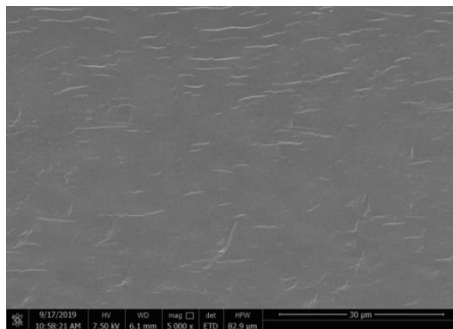
(ก) NSF, 5000X



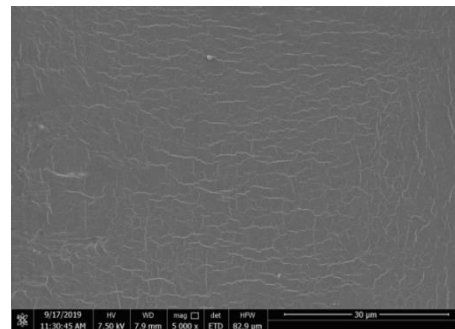
(ข) 1% CSF, 5000X



(ค) 2% CSF, 5000X

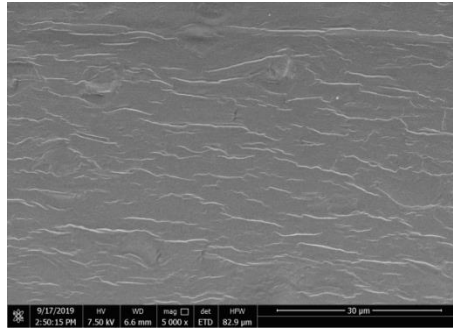


(ง) 3% CSF, 5000X

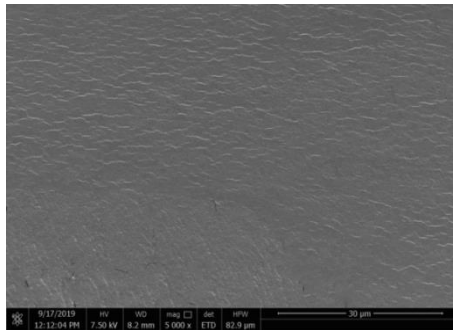


(จ) 4% CSF, 5000X

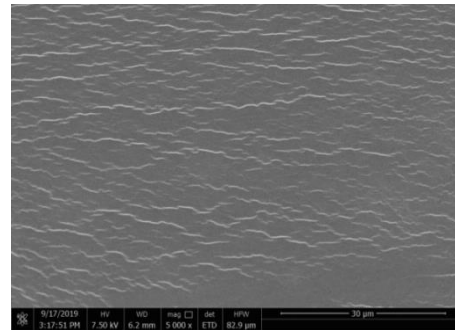
รูปที่ 4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF



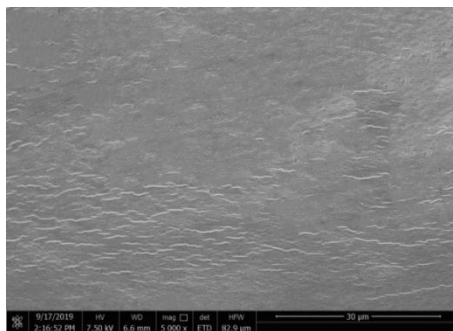
(ก) NS, 500X



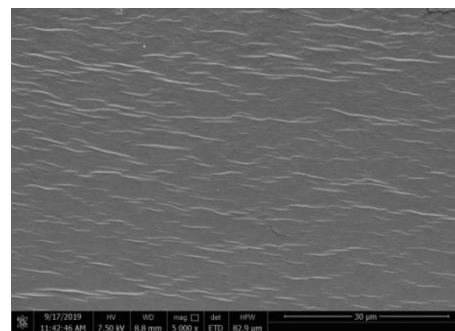
(ข) 10% OS-1% CSF, 5000X



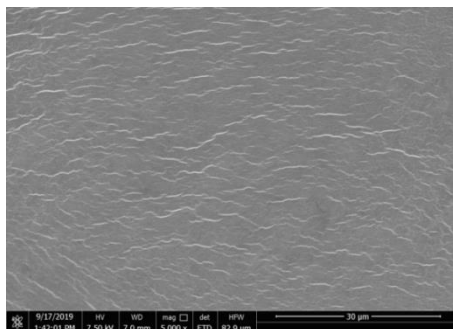
(ค) 10% OS-4% CSF, 5000X



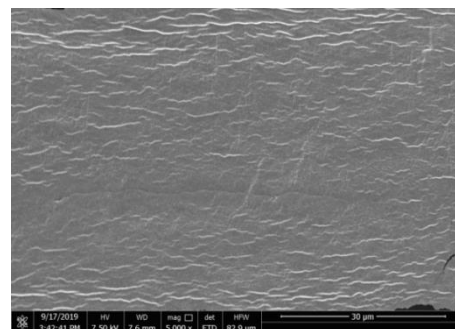
(ง) 20% OS-1% CSF, 5000X



(จ) 1% CS-10% OS, 5000X



(ฉ) 1% CS-20% OSF, 5000X



(ช) 4% CS-10% OSF, 5000X

รูปที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งที่ดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยใช้กำลังขยายภาพ 5000 เท่า (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF

จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร พบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็นวิฎภาคต่อเนื่อง แต่มีพื้นผิวของภาคตัดขวางที่ขรุขระ แสดงถึงการหลอมของเม็ดแป้งบางส่วนที่ไม่สมบูรณ์ในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์ม ส่วนฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร ในรูปที่ 4.13 (ข)-(ง) ได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF พบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็นวิฎภาคต่อเนื่อง และมีพื้นผิวของภาคตัดขวางที่เรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร เนื่องจากในขั้นตอนการออกซิเดชันเม็ดแป้งมีการบวมตัวและเสียรูป ซึ่งเห็นได้จากสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งออกซิไดส์ที่แสดงดังรูปที่ 4.10 (ข)-(ง) อีกทั้งยังเกิดการตัดสายโซ่ของแป้งให้สั้นลงระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเหล่านี้ส่งผลให้ในขั้นตอนการขึ้นรูปที่มีพลาสติกไซเซอร์ น้ำ และมีการให้อุณหภูมินั้นเกิดการแทรกของโมเลกุลน้ำและพลาสติกไซเซอร์เข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ง่ายขึ้นและมีการแตกออกของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้น [61] ส่งผลให้ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ที่ได้มีความเรียบขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanetrungroj Y. และ Prachayawarakorn J. ที่พบว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีความเรียบของพื้นผิวมากกว่าสูตรฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร เนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลายและมีการตัดสายโซ่ของแป้งเมื่อผ่านปฏิกิริยาการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [9] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณสารออกซิไดส์ที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ ไม่พบความแตกต่างของลักษณะสัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.14 (ข)-(จ) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรมีลักษณะเป็นวิฎภาคต่อเนื่อง ไม่พบรอยแตกและรูพรุนของฟิล์ม มีพื้นผิวของภาคตัดขวางขรุขระ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร พบว่าในฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร อาจเพราะในขั้นตอนการเชื่อมโยงสามารถเกิดได้ทั้งพันธะเชื่อมโยงและการไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นแข่งขันกัน ซึ่งการเกิดไฮโดรไลซิสร่วมด้วยนั้น เกิดได้จากการปรับ pH ให้เท่ากับ 4 ด้วยกรดซิตริก [45] ทำให้ความยาวสายโซ่ของแป้งบางส่วนนั้นสั้นลงเมื่อในขั้นตอนขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกไซเซอร์และน้ำในระบบสามารถแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของแป้งได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงทำให้เห็นพื้นที่ผิวของภาคตัดขวางที่ขรุขระน้อยกว่า นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงพบว่าฟิล์มมีพื้นผิวของภาคตัดขวางที่ขรุขระเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Sukhija S. และคณะ ที่พบพื้นที่ผิวของภาคตัดขวางของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง อาจเป็นเพราะการเชื่อมโยงที่เกิดเพิ่มขึ้นภายในเม็ดแป้งไปเสริมความแข็งแรงของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งหลอมได้ยากขึ้นและพลาสติกไซเซอร์แทรกตัวในตำแหน่งที่แป้งถูกเชื่อมโยงได้ยากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งแตกออกยากขึ้นตามมา ฟิล์มจึงขรุขระเพิ่มขึ้นขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง [61] ซึ่งสอดคล้องกับองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลูตาร์ลดีไฮด์ ในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.15 (ข)-(ช) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรและแป้งที่ตัดแปรรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ พบว่าฟิล์มจากแป้งตัดแปรรสองขั้นตอนทุกสูตรมีลักษณะเป็นวิฎภาคต่อเนื่อง มีพื้นผิวของภาคตัดขวางขรุขระ

เช่นเดียวกัน โดยพบว่าฟิล์มจากแป้งที่มีการดัดแปรขั้นแรกโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ ได้แก่ (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF และ (ง) 20% OS-1% CSF มีความเรียบมากกว่าฟิล์มจากแป้งที่ดัดแปรขั้นตอนแรกโดยการเชื่อมโยง เนื่องจากในการออกซิเดชัน เม็ดแป้งมีการบวมตัวและเสียรูป ซึ่งเห็นได้จากสัญญาณวิทยาของเม็ดแป้งดัดแปรสองขั้นตอนที่ดัดแปรขั้นตอนแรกโดยการออกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข) (ค) และ (ง) อีกทั้งยังเกิดการตัดสายโซ่ของแป้งให้สั้นลง ทำให้โมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์สามารถแทรกสายโซ่ของแป้งได้ดียิ่งขึ้น [61] โดยสูตร 20% OS-1% CSF (รูปที่ 4.15 (ง)) มีความเรียบมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตร เนื่องจากมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่สื่อถึงองศาการออกซิเดชันที่สูงที่สุดในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน แสดงดังตารางที่ 4.4

ส่วนสูตร 1% CS-10% OSF 1% CS-20% OSF และ 4% CS-10% OSF จากรูปที่ 4.15 (จ) (ฉ) และ (ช) ตามลำดับ พบว่ามีความขรุขระที่มากกว่า เนื่องจากการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นไปเสริมความแข็งแรงของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งหลอมได้ยากขึ้นและพลาสติกไซเซออร์แทรกตัวได้ยากขึ้นที่ตำแหน่งที่มีการเชื่อมโยง ส่งผลให้เห็นเป็นความขรุขระบนชิ้นงานฟิล์ม เมื่อพิจารณาในสูตรแป้งดัดแปรสองขั้นตอนที่ปริมาณสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน แต่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่เท่ากัน (รูปที่ 4.15) ได้แก่ สูตร (ข) 10% OS-1% CSF เปรียบเทียบกับ (ค) 10% OS-4% CSF และ (จ) 1% CS-10% OSF เปรียบเทียบกับ (ช) 4% CS-10% OSF ไม่พบความแตกต่างของลักษณะสัญญาณวิทยา ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบในสูตรที่มีปริมาณสารออกซิไดส์เพิ่มขึ้น แต่มีสารเชื่อมโยงในปริมาณที่คงที่ (รูปที่ 4.15) ได้แก่ สูตร (ข) 10% OS-1% CSF เปรียบเทียบกับ (ง) 20% OS-1% CSF และ (จ) 1% CS-10% OSF เปรียบเทียบกับ (ฉ) 1% CS-20% OSF ไม่พบความแตกต่างของลักษณะสัญญาณวิทยา เช่นกันในการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน

จากรูปที่ 4.13-4.15 สามารถสรุปได้ว่าสูตรฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร (รูปที่ 4.13 (ข)-(ง)) ได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF มีลักษณะภาคตัดขวางที่เรียบที่สุด เนื่องจากการตัดสายโซ่จากการออกซิเดชัน การบวมตัวและเสียรูปของเม็ดแป้งล้วนส่งผลให้พลาสติกไซเซออร์แทรกตัวเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ง่ายและมีการแตกออก จึงทำให้ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีความเรียบมากที่สุด ส่วนฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ทุกสูตรมีความขรุขระที่มากที่สุด (รูปที่ 4.15 (จ) (ฉ) และ (ช)) โดยฟิล์มทุกสูตรมีลักษณะสัญญาณวิทยาที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่จะกล่าวถัดไปในหัวข้อ 4.10 นอกจากนี้ปัจจัยในเรื่องลำดับของการดัดแปรในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นต่อนั้นส่งผลต่อสัญญาณวิทยาของฟิล์มอย่างชัดเจนมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน

4.5 การทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Averaged molecular weight)

การวัดความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity) ใช้บ่งบอกน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่าง โดยทำการคำนวณหาความหนืดจากสมการของ Mark-Houwink (ตัวอย่างการคำนวณ แสดงดัง ภาคผนวก ข) ซึ่งค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.25-4.30

ตารางที่ 4.25 ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งออกซิไดส์ สูตรต่างๆ

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
NS	92.5 \pm 16.2	20.5 \pm 4.7
5% OS	21.8 \pm 0.8 ^a	3.1 \pm 0.1 ^a
10% OS	19.56 \pm 0.3 ^b	2.7 \pm 0.1 ^b
20% OS	15.66 \pm 1.1 ^c	2.0 \pm 0.2 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

*ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างภายในกลุ่มแป้งออกซิไดส์ โดยสูตร NS ไม่นำมาคิดความแตกต่าง

จากตารางที่ 4.25 แสดงความหนืดภายใน และน้ำหนักโมเลกุลของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งออกซิไดส์สูตรต่างๆ ได้แก่ 5% OS 10% OS และ 20% OS พบว่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร มีค่าต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นสามารถเกิดการตัดสายโซ่ของแป้ง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่แป้งและความหนืดลดลง [44] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Usman A.H. ในการเตรียมแป้งออกซิไดส์โดยใช้โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (Sodium periodate) เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ส่งผลให้ความหนืดภายใน และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งออกซิไดส์ลดลง [62]

ในทางตรงกันข้ามจากความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งครอสลิงค์สูตรต่างๆ จากตารางที่ 4.26 พบว่าในสูตรแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร ได้แก่ 1% CS 2% CS 3% CS และ 4% CS มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากผลของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ทำให้อายุของแป้งเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ แสดงดังรูปที่ 4.2 จึงส่งผลให้มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงอย่างกลูตาไรลดีไฮด์

ตารางที่ 4.26 ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบ่งที่ไม่ได้ตัดแปรและแบ่งครอสลิงค์สูตรต่างๆ

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
NS	92.5 \pm 16.2	20.5 \pm 4.7
1% CS	348.2 \pm 4.5 ^a	117.2 \pm 2.0 ^a
2% CS	402.4 \pm 8.6 ^b	141.8 \pm 4.0 ^b
3% CS	467.0 \pm 2.1 ^c	172.5 \pm 1.0 ^c
4% CS	585.0 \pm 4.3 ^d	232.2 \pm 2.2 ^d

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

*ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างภายในกลุ่มแบ่งครอสลิงค์ โดยสูตร NS ไม่นำมาคิดความแตกต่าง

ตารางที่ 4.27 ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแบ่งที่ไม่ได้ตัดแปรและแบ่งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์สูตรต่างๆ

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
NS	92.5 \pm 16.2	20.5 \pm 4.7
10% OS-1% CS	59.3 \pm 0.0 ^a	11.4 \pm 0.0 ^a
10% OS-4% CS	62.2 \pm 0.9 ^b	12.1 \pm 0.2 ^b
20% OS-1% CS	45.8 \pm 1.6 ^c	8.1 \pm 0.4 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

*ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างภายในกลุ่มแบ่งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-ครอสลิงค์ โดยสูตร NS ไม่นำมาคิดความแตกต่าง

นอกจากนี้ในแบ่งตัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรจากตารางที่ 4.27-4.28 พบว่ามีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ต่ำกว่าแบ่งครอสลิงค์ แต่สูงกว่าแบ่งออกซิไดส์ (ตารางที่ 4.26 และ 4.25 ตามลำดับ) เนื่องจากมีผลของการตัดสายโซ่ระหว่างการเกิดออกซิเดชัน และผลของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นร่วมกัน โดยเมื่อพิจารณาลำดับในการตัดแปรในแบ่งตัดแปรสองชั้นตอน พบว่าสูตรของแบ่งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ จากตารางที่ 4.28 ได้แก่ 1% CS-10% OS 1% CS-20% OS และ 4% CS-10% OS มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่สูงกว่าสูตรแบ่งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ จากตารางที่ 4.27 เนื่องจากมีองค์การเชื่อมโยงที่สูงกว่าในแบ่งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ จากตารางที่ 4.5 ทำให้เกิด

การเชื่อมโยงของสายโซ่แป้งเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติได้มากกว่า โดยทำการเปรียบเทียบที่ สารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่ปริมาณเท่ากัน

ตารางที่ 4.28 ความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตรต่างๆ

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
NS	92.5 \pm 16.2	20.5 \pm 4.7
1% CS-10% OS	66.9 \pm 0.4 ^a	13.4 \pm 0.1 ^a
1% CS-20% OS	53.2 \pm 0.7 ^b	9.9 \pm 0.2 ^b
4% CS-10% OS	92.9 \pm 1.0 ^c	20.6 \pm 0.3 ^c

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

*ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างภายในในกลุ่มแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ โดยสูตร NS ไม่นำมาคิดความแตกต่าง

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
10% OS-1% CS	59.3 \pm 0.0 ^a	11.4 \pm 0.0 ^a
10% OS-4% CS	62.2 \pm 0.9 ^b	12.1 \pm 0.2 ^b
1% CS-10% OS	66.9 \pm 0.4 ^c	13.4 \pm 0.1 ^c
4% CS-10% OS	92.9 \pm 1.0 ^d	20.6 \pm 0.3 ^d

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.29 เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน แต่ปริมาณสารออกซิไดส์เท่ากันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่สูง ได้แก่ สูตร 10% OS-4% CS และ 4% CS-10% OS ให้ค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของแป้งที่สูงกว่า ซึ่งเป็นไปตามความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สามารถดูได้จากองศาการเชื่อมโยงตามตารางที่ 4.6-4.7 โดยผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้งในแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบความหนืดภายในและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

สูตร	ความหนืดภายใน (mL/g)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^4$) (g/mol)
10% OS-1% CS	59.3 \pm 0.0 ^a	11.4 \pm 0.0 ^a
20% OS-1% CS	45.8 \pm 1.6 ^c	8.1 \pm 0.4 ^c
1% CS-10% OS	66.9 \pm 0.4 ^d	13.4 \pm 0.1 ^d
1% CS-20% OS	53.2 \pm 0.7 ^e	9.9 \pm 0.2 ^e

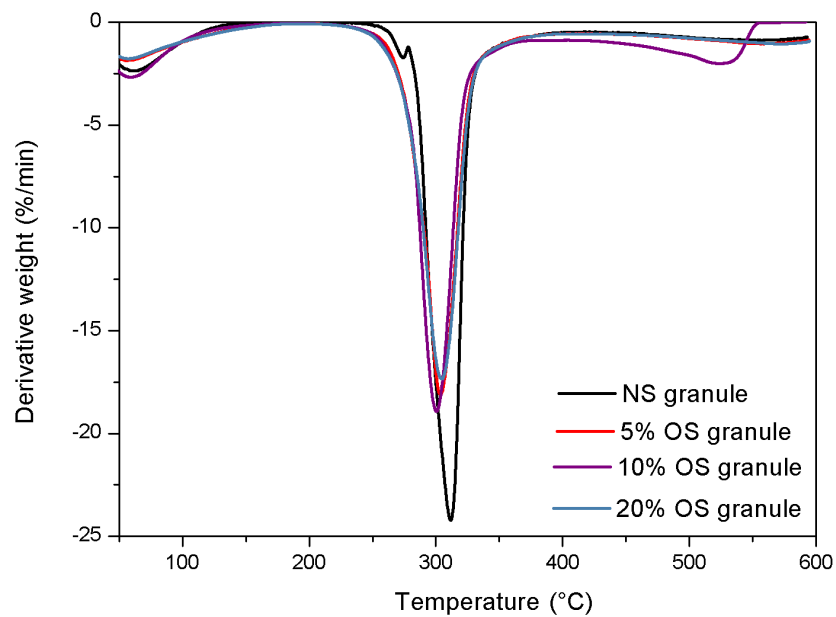
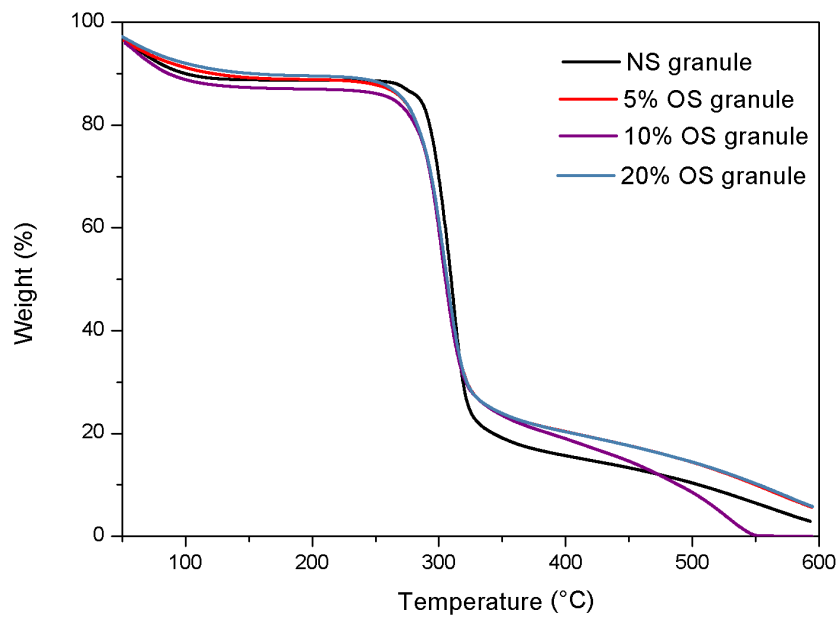
*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ในอีกกรณีนี้เมื่อพิจารณาปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน แต่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน จากตารางที่ 4.30 พบว่าปริมาณของสารออกซิไดส์ที่สูงกว่า มีโอกาสเกิดการตัดสายโซ่และทำให้ได้ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า [62] ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ทั้งในแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ และแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ได้แก่ สูตร 20% OS-1% CS และ 1% CS-20% OS ตามลำดับ

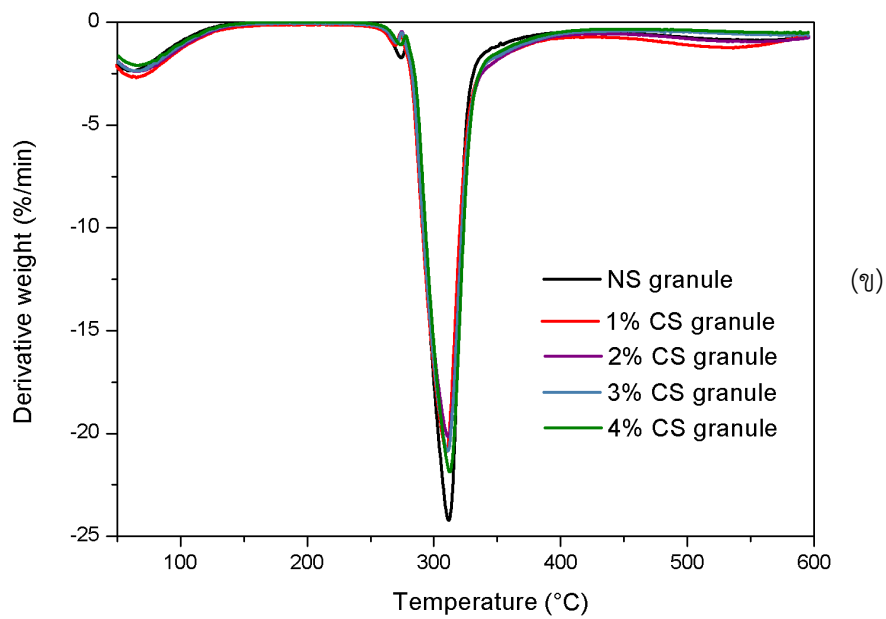
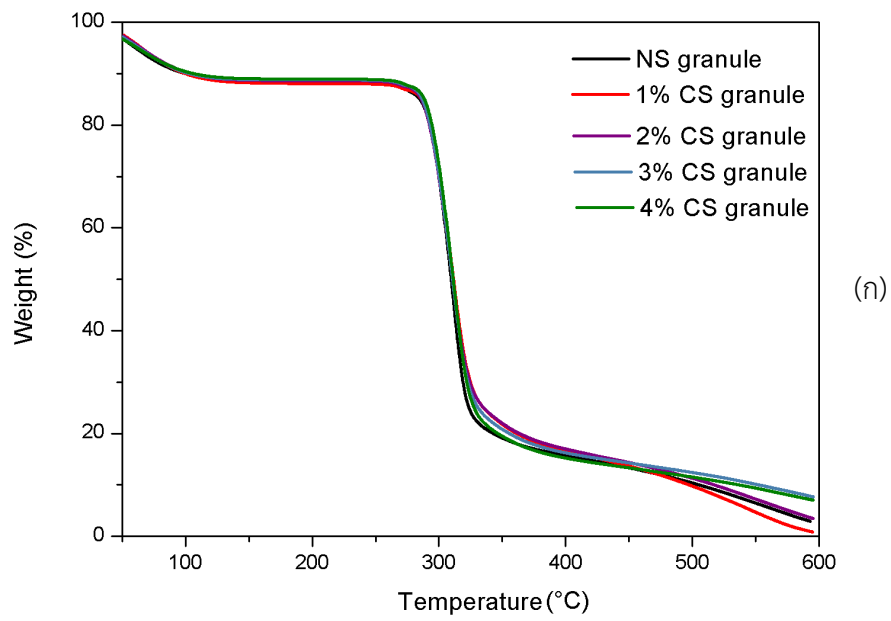
จากการทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจากการวัดความหนืดภายใน พบว่าการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ส่งผลให้ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลลดลง ขณะที่การเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงส่งผลให้ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นทั้งในแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน นอกจากนี้น้ำหนักโมเลกุลของแป้งดัดแปรสองชั้นตอนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่างแป้งออกซิไดส์และแป้งโครอสลิงค์ เมื่อเปรียบเทียบสูตรแป้งทุกสูตร พบว่าสูตร 4% CS มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงที่สุด ส่วนสูตร 20% OS มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำที่สุด นอกจากนี้ปัจจัยของแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในเรื่องลำดับของการดัดแปร ปริมาณของสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ล้วนส่งผลต่อการทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลอย่างชัดเจน

4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

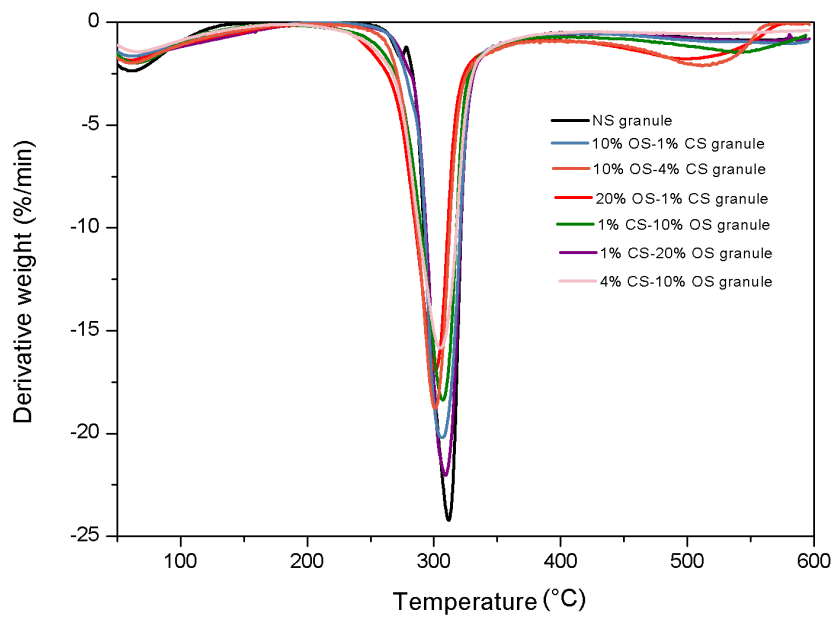
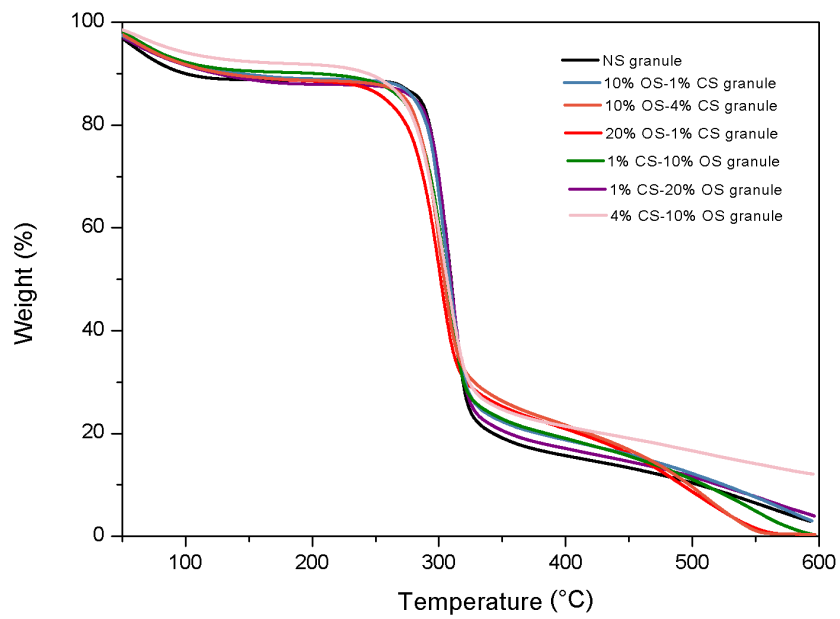
ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มและเม็ดแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรในสูตรต่างๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) โดยอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16-4.21 ตารางที่ 4.31-4.38 และภาคผนวก ค



รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG



รูปที่ 4.17 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG

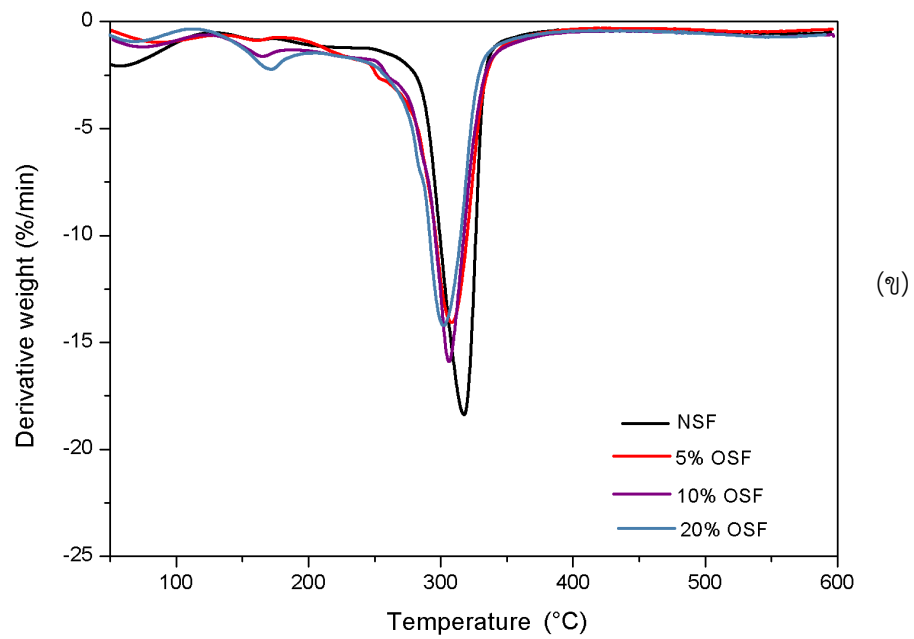
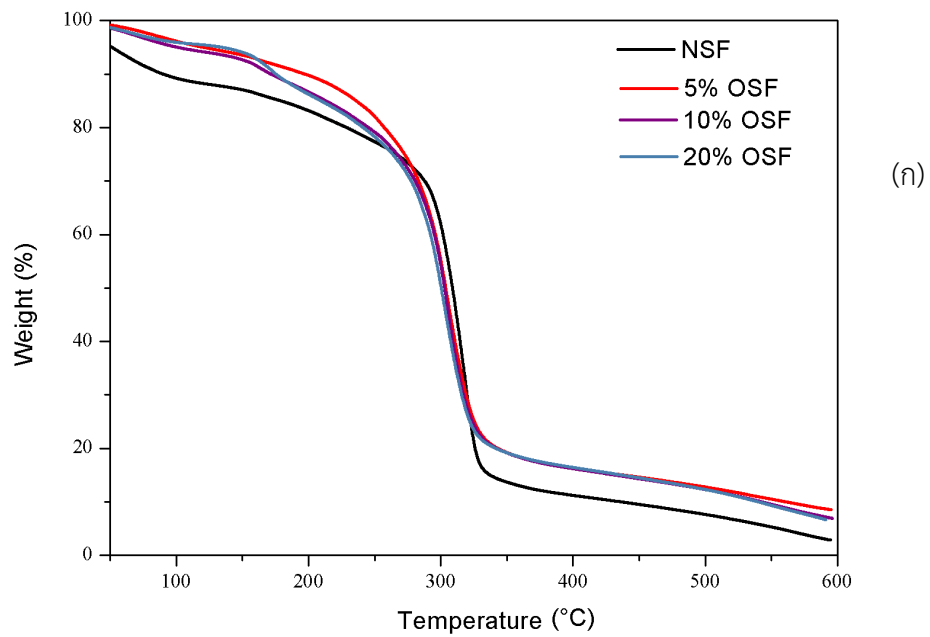


รูปที่ 4.18 เทอร์โมแกรมของเม็ดแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) TG และ (ข) DTG

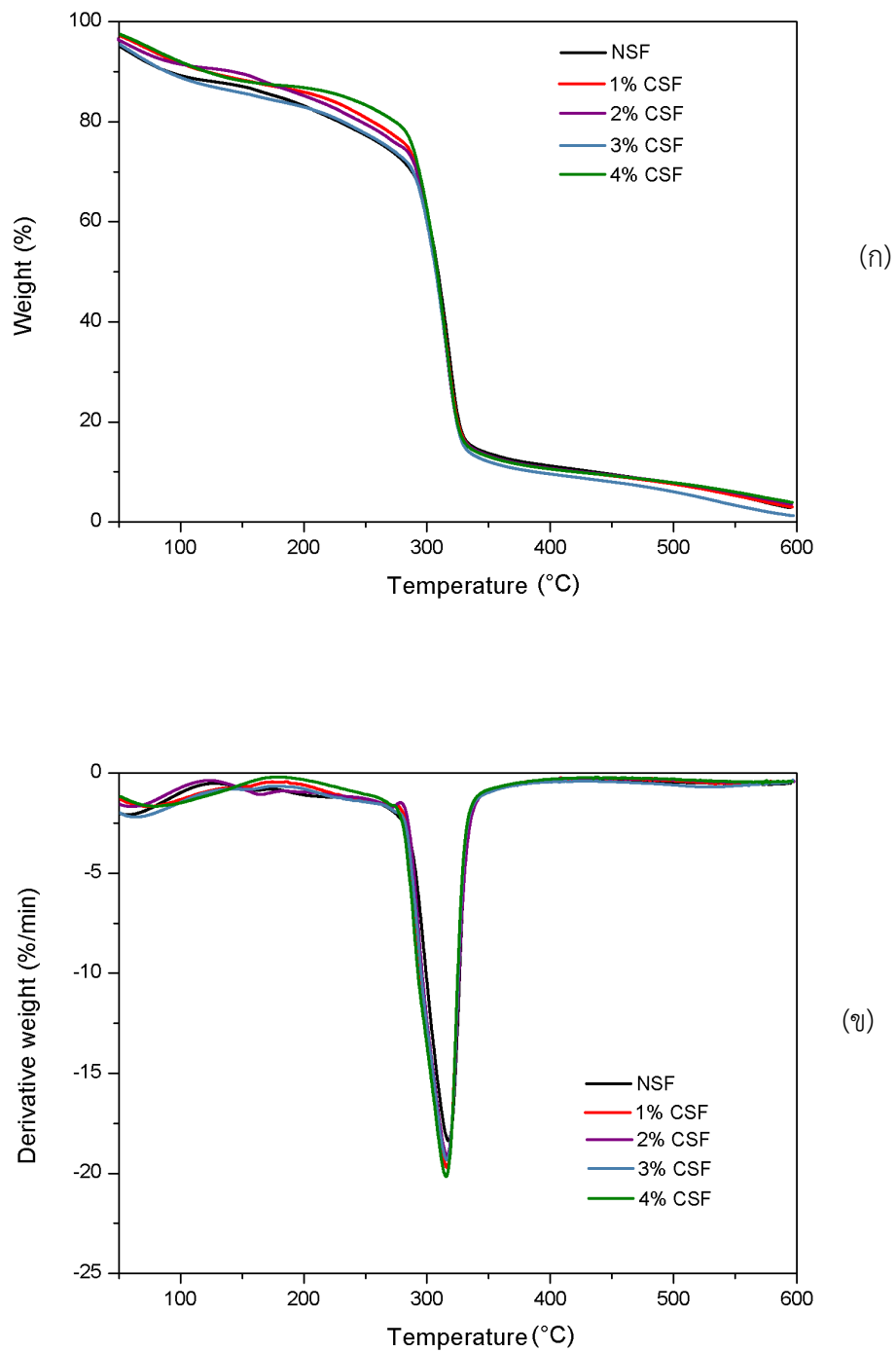
ตารางที่ 4.31 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) (แป้ง)
NS	311.1
5% OS	303.1
10% OS	306.6
20% OS	304.3
1% CS	311.4
2% CS	310.3
3% CS	310.6
4% CS	311.7
10% OS-1% CS	306.0
10% OS-4% CS	301.2
20% OS-1% CS	301.8
1% CS-10% OS	307.4
1% CS-20% OS	308.3
4% CS-10% OS	304.6

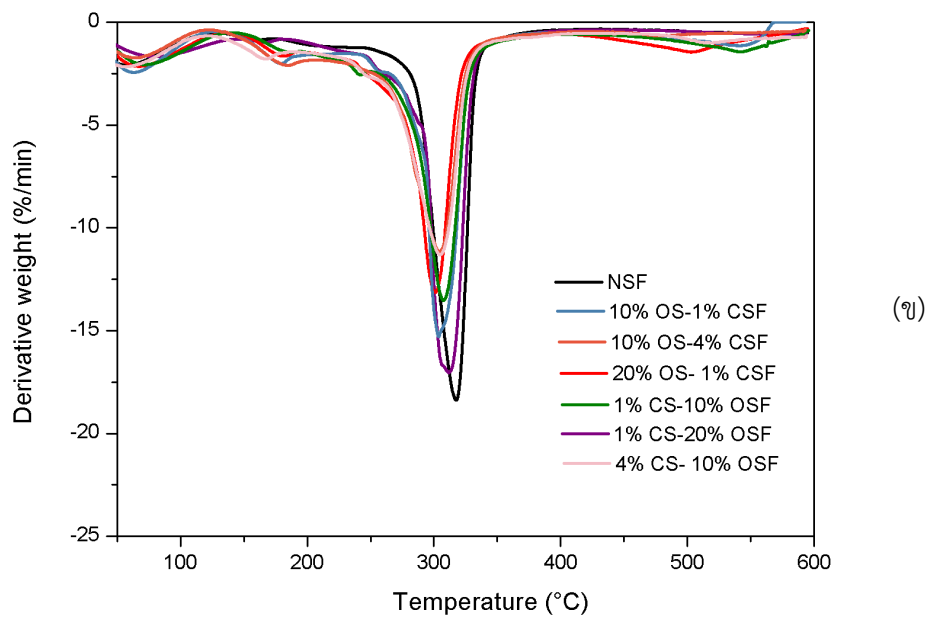
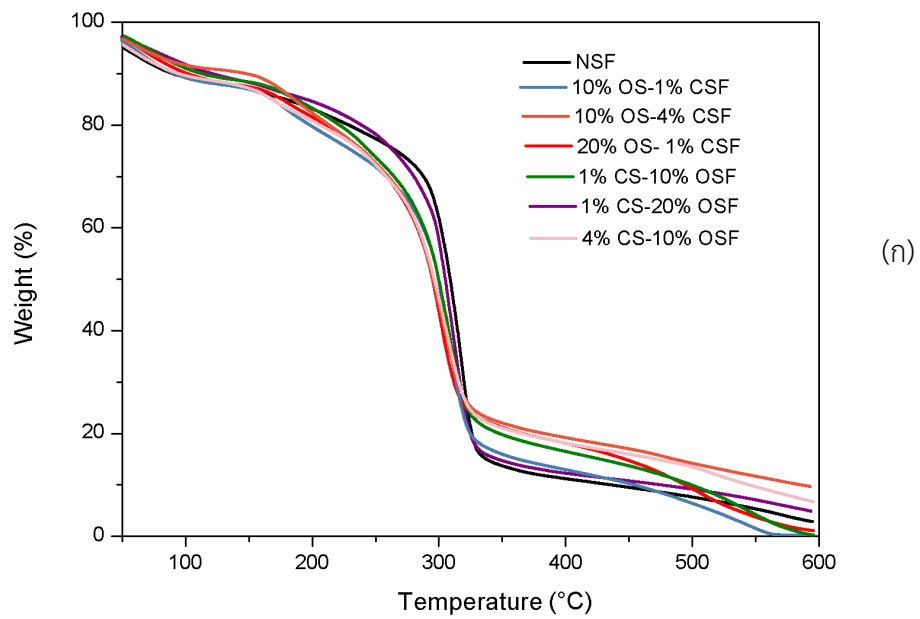
รูปที่ 4.16-4.18 ตารางที่ 4.31 และภาคผนวก ค รูปที่ ค.1-ค.14 แสดงข้อมูลจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ โดยในเทอร์โมแกรมทั้ง TG และ DTG ของแป้งทุกสูตรแสดงให้เห็นช่วงการสลายตัวของแป้ง พบว่าช่วงการสลายตัวหลักของแป้งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 250-320 องศาเซลเซียส [63] และจากรูปที่ 4.19-4.21 และภาคผนวก ค รูปที่ ค.15-ค.28 แสดงเทอร์โมแกรมทั้ง TG และ DTG จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ และตารางที่ 4.32 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสูตรต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มสูตร NSF มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวแบ่งออกได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์ม ซึ่งพบในช่วงอุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวหลักของแป้งพบที่อุณหภูมิ 280-350 องศาเซลเซียส [9] ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งดัดแปรทุกสูตรพบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นมาในช่วงที่ 2 พบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 240-280 องศาเซลเซียส จากการที่แป้งเกิดการขาดของสายโซ่ โดยเกิดขึ้นผ่านการออกซิเดชันและการเชื่อมโยง [64-65]



รูปที่ 4.19 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG



รูปที่ 4.20 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) TG และ (ข) DTG



รูปที่ 4.21 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน และเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) TG และ (ข) DTG

ตารางที่ 4.32 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งที่เกิดไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)
NSF	163.1	-	317.6
5% OSF	159.5	254.4	307.5
10% OSF	164.0	262.2	305.2
20% OSF	172.5	285.3	303.2
1% CSF	155.8	270.0	315.4
2% CSF	164.9	250.5	315.4
3% CSF	154.1	274.5	314.8
4% CSF	151.2	270.0	314.8
10% OS-1% CSF	180.4	258.6	304.9
10% OS-4% CSF	184.8	250.0	304.9
20% OS-1% CSF	181.8	246.2	300.9
1% CS-10% OSF	185.6	240.7	306.6
1% CS-20% OSF	168.8	257.5	311.4
4% CS-10% OSF	163.7	249.6	306.0

ในสูตรแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร (รูปที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.31) ได้แก่ 5% OS 10% OS และ 20% OS และฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร (รูปที่ 4.19 และ ตารางที่ 4.32) ได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF พบการลดลงของอุณหภูมิในการสลายตัวหลักของแป้งเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ตามลำดับ เนื่องจากในปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันนั้นสามารถเกิดการตัดสายโซ่ของแป้งได้ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่แป้งนั้นลดต่ำลง [44] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดภายใน และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ลดต่ำลง ตามที่แสดงในตารางที่ 4.25 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณสารออกซิไดส์ พบอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ลดลงตามปริมาณของสารออกซิไดส์ที่เพิ่มขึ้นในสูตรฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ ซึ่งเป็นผลจากการขาดของสายโซ่แป้งขณะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ค่าความหนืดภายใน และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.25 จึงส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang S.D และคณะ ที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์อย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเทอร์โมพลาสติก-สตาร์ชจากแป้งข้าวโพด ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวลดต่ำลง [4] ในขณะที่สูตรของแป้งออกซิไดส์

พบว่า การลดลงของอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งนี้ไม่สัมพันธ์กับปริมาณของสารออกซิไดส์ที่เพิ่มขึ้น

จากสูตรแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร ได้แก่ 1% CS 2% CS 3% CS และ 4% CS จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.31 ไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร อาจเกิดเนื่องจากการเกิดไฮโดรไลซิสร่วมด้วยในการปฏิกิริยาเชื่อมโยง จากการปรับ pH ให้เท่ากับ 4 ด้วยกรดซิตริก [45] จึงอาจส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร จากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.32 ได้แก่ 1% CSF 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF มีอุณหภูมิการสลายตัวหลักของแป้งต่ำกว่าสูตร NSF แต่สูงกว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรอื่นๆ เนื่องจากผลของพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นร่วมกับผลของการเกิดไฮโดรไลซิส ที่ทำให้มีอุณหภูมิดังกล่าวสูงกว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรอื่นๆ แต่ยังคงต่ำกว่า NSF ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทั้งในแป้งครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์

ตารางที่ 4.33 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของแป้งดัดแปรสองชั้นตอนระหว่างแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) (แป้ง)
10% OS-1% CS	306.0
10% OS-4% CS	301.2
20% OS-1% CS	301.8
1% CS-10% OS	307.4
1% CS-20% OS	308.3
4% CS-10% OS	304.6

ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งดัดแปรสองชั้นตอน จากรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.33 และฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน จากรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.34 พบว่าแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ มีอุณหภูมิในการสลายตัวหลักของแป้งสูงกว่าแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่เท่ากัน เนื่องจากสูตรที่มีการดัดแปรโดยการเชื่อมโยงในชั้นตอนแรก สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงภายในเม็ดแป้งได้สูงกว่า เห็นได้จากองศาการเชื่อมโยงจากตารางที่ 4.5 ซึ่งพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นช่วยเสริมความแข็งแรงให้เม็ดแป้ง [66]

ตารางที่ 4.34 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์และฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งที่เกิดไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)
10% OS-1% CSF	180.4	258.6	304.9
10% OS-4% CSF	184.8	250.0	304.9
20% OS-1% CSF	181.8	246.2	300.9
1% CS-10% OSF	185.6	240.7	306.6
1% CS-20% OSF	168.8	257.5	311.4
4% CS-10% OSF	163.7	249.6	306.0

ตารางที่ 4.35 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของแป้งตัดแปรสองชั้นตอนทั้งแป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์และแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) (แป้ง)
10% OS-1% CS	306.0
10% OS-4% CS	301.2
1% CS-10% OS	307.4
4% CS-10% OS	304.6

เมื่อพิจารณาแป้งตัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน แต่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่เท่ากัน จากตารางที่ 4.35 พบอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งสูงกว่าในสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า ขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอน จากตารางที่ 4.36 ไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิการสลายตัวหลักของแป้ง

ตารางที่ 4.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนทั้งฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งที่เกิดไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)
10% OS-1% CSF	180.4	258.6	304.9
10% OS-4% CSF	184.8	250.0	304.9
1% CS-10% OSF	185.6	240.7	306.6
4% CS-10% OSF	163.7	249.6	306.0

ตารางที่ 4.37 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของแป้งตัดแปรสองชั้นตอนทั้งแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์และแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) (แป้ง)
10% OS-1% CS	306.0
20% OS-1% CS	301.8
1% CS-10% OS	307.4
1% CS-20% OS	308.3

ตารางที่ 4.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนทั้งฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

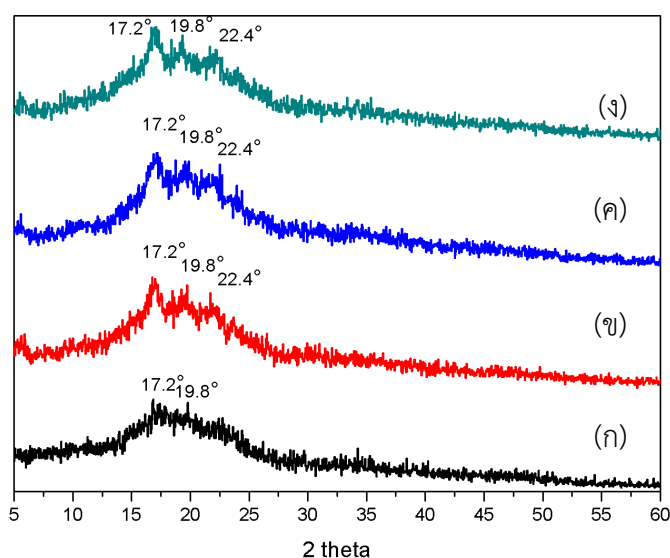
ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งที่เกิดไฮโดรไลซิส)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)
10% OS-1% CSF	180.4	258.6	304.9
20% OS-1% CSF	181.8	246.2	300.9
1% CS-10% OSF	185.6	240.7	306.6
1% CS-20% OSF	168.8	257.5	311.4

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณสารเชื่อมโยงคงที่ในแง่ตัดแปรสองขั้นตอน (จากตารางที่ 4.37) และฟิล์มจากแง่ตัดแปรสองขั้นตอน (จากตารางที่ 4.38) พบอุณหภูมิการสลายตัวของแง่ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ในแง่ออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ได้แก่ สูตร 20% OS-1% CS (ตารางที่ 4.37) และฟิล์มจากแง่ออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ได้แก่ สูตร 20% OS-1% CSF (ตารางที่ 4.38) เนื่องจากการตัดสายโซ่ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้สายโซ่แง่สั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดต่ำลง [44] แต่ในทางกลับกันเมื่อปริมาณสารออกซิไดส์เพิ่มขึ้นในแง่ครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ได้แก่ สูตร 1% CS-20% OS ไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิการสลายตัวของแง่อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร 1% CS-10% OS ขณะที่ฟิล์มจากแง่ครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ได้แก่ สูตร 1% CS-20% OSF พบอุณหภูมิการสลายตัวของแง่ที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ โดยที่สูตร 1% CS-20% OSF มีอุณหภูมิการสลายตัวของแง่ที่สูงกว่า ทั้งที่ควรต่ำกว่าด้วยเหตุผลในการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ยิ่งเพิ่มโอกาสในการตัดสายโซ่ที่มากขึ้น แต่ในสูตร 1% CS-20% OSF ไม่เป็นเช่นนั้น คาดว่าเป็นเพราะหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล (ตารางที่ 4.9) ที่เกิดขึ้นในสูตร 1% CS-20% OS ที่มีแนวโน้มสูงกว่าสูตร 1% CS-10% OS โดยหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ทำให้โครงสร้างแง่สั้นเสถียรมากขึ้น ต้องให้พลังงานที่มากขึ้นในการทำให้แง่เสียสภาพ [42] อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการสลายตัวของแง่ในสูตรแง่ตัดแปรสองขั้นตอนและฟิล์มจากแง่ตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตรยังคงต่ำกว่าแง่ที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแง่ที่ไม่ได้ตัดแปร คาดว่าเป็นผลมาจากการตัดสายโซ่ในขั้นตอนการออกซิเดชันและการเกิดไฮโดรไลซิสขึ้นระหว่างการเชื่อมโยง

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเม็ดแง่และฟิล์มจากแง่สูตรต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าในสูตรแง่ที่ผ่านการออกซิเดชันทุกสูตร มีอุณหภูมิการสลายตัวของแง่ต่ำกว่าสูตรแง่ที่ไม่ได้ตัดแปร ขณะที่แง่ครอสลิงค์ไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิการสลายตัวของแง่เมื่อเปรียบเทียบกับแง่ที่ไม่ได้ตัดแปร แต่ในฟิล์มจากแง่ตัดแปรทุกสูตรนั้นมีอุณหภูมิดังกล่าวที่ต่ำกว่าสูตร NSF โดยปัจจัยของแง่ตัดแปรสองขั้นตอนในเรื่องลำดับของการตัดแปร และปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ส่งผลที่ชัดเจนต่อการศึกษาศักยภาพความร้อนของทั้งเม็ดแง่และฟิล์ม

4.7 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มจากแง่ตัดแปรต่างๆ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มุมต่างๆ กัน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยดิฟแฟร็กโทแกรมแสดงดังรูปที่ 4.22-4.24 และภาคผนวก ข ขณะที่เปอร์เซ็นต์ความเปของฟิล์มจากแง่ตัดแปรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.39



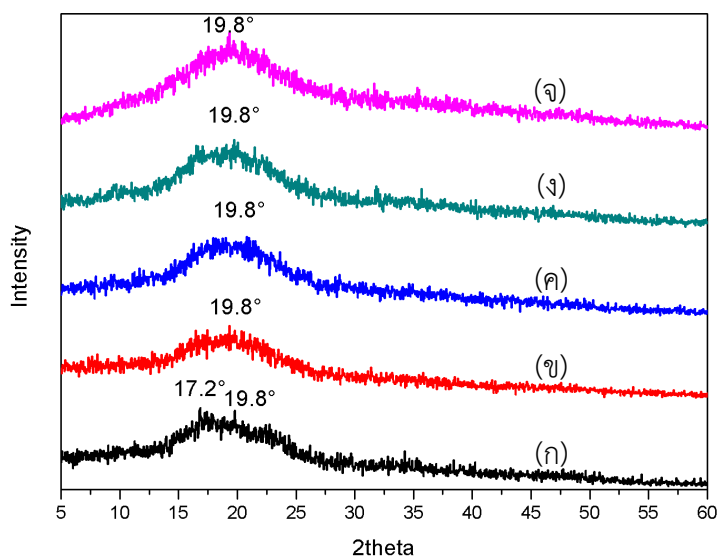
รูปที่ 4.22 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและที่ดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 5% OSF (ค) 10% OSF และ (ง) 20% OSF

ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.22-4.24 และภาคผนวก ง และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.39 พบว่าดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ในรูปที่ 4.22 (ก) และภาคผนวก ง รูปที่ ง.1 พบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ B ที่มาจากแป้งจากพืชหัว [58] และพบลักษณะผลึกแบบ V_H ที่การเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.8° โดยผลึกแบบ V_H มาจากสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับกลีเซอรอล [67] ซึ่งจากการขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งด้วยเทคนิคเทหล่อ โดยการผสมกับกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และผ่านกระบวนการเจลาทีไนเซชันด้วยความร้อนและน้ำ ในขั้นตอนนี้ทำให้ลักษณะผลึกแบบ B ของแป้งมันสำปะหลังได้ถูกทำลายและเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบใหม่ ซึ่งจากดิฟแฟร็กโทแกรมของสูตร NSF เป็นการรวมกันระหว่างผลึกแบบ B และ V_H [68-70] แต่ในดิฟแฟร็กโทแกรมของสูตร NSF ที่เห็นการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° ชัดเจน เนื่องจากการหลอมไม่สมบูรณ์ของเม็ดแป้งในระหว่างการขึ้นรูปฟิล์ม เห็นได้จากผลการศึกษาศัณฐานวิทยาในหัวข้อ 4.4.2 แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) จึงสอดคล้องกันกับลักษณะโครงสร้างผลึกเดิมที่เป็นแบบ B ที่หลงเหลืออยู่และเห็นพีคชัดเจนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2°

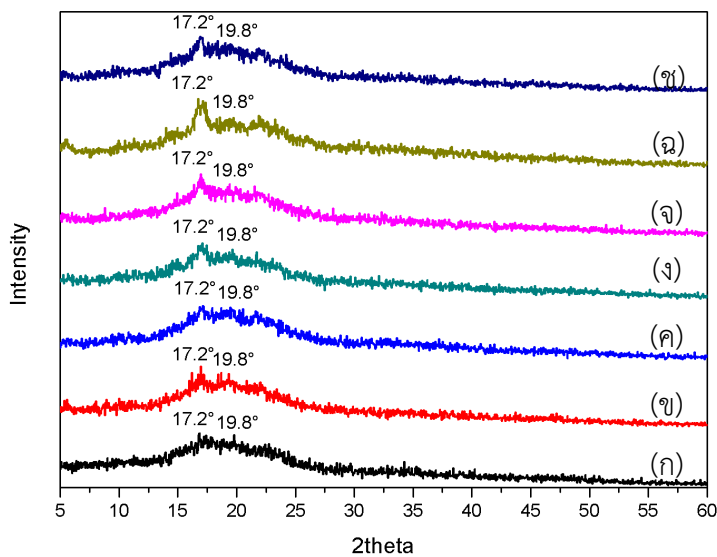
นอกจากนี้ในรูปที่ 4.22 (ข)-(ง) ภาคผนวก ง รูปที่ ง.2-ง.4 และตารางที่ 4.39 แสดงดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ที่มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกต่างกัน ได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF ตามลำดับ และปริมาณผลึก โดยพบการเลี้ยวเบนที่

ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° 19.8° และ 22.4° ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างผลึกแบบ B กับผลึกแบบ V_H เมื่อพิจารณาความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° 19.8° และ 22.4° พบว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตรมีความเข้มของพีคเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.39 ที่พบการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเล็กน้อย โดยสูตร NSF มีปริมาณผลึก 51.84 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สูตร 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF พบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ดังนี้ 52.14 53.05 และ 54.16 ตามลำดับ อาจเป็นเพราะการสลายตัวของอะไมโลสและมีการจัดเรียงตัวใหม่ ส่งผลให้มีโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น [7] จึงทำให้ความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° , 19.8° และ 22.4° และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการเพิ่มปริมาณของสารออกซิไดส์สามารถเพิ่มการสลายตัวของอะไมโลสและการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zamudio-Floes P.B. และคณะ ที่ความเข้มของพีคเพิ่มสูงขึ้นที่ตำแหน่ง 17° , 20° และ 23° เมื่อเพิ่มระดับในการออกซิเดชันของแป้ง [58]

จากรูปที่ 4.23 (ข)-(จ) และภาคผนวก ง รูปที่ ง.5-ง.8 แสดงดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ดัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรพบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.8° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ V_H เนื่องจากลักษณะผลึกแบบ B ของแป้งมันสำปะหลังได้ถูกทำลายและเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบใหม่จากการผ่านกระบวนการเจลาทีไนเซชันด้วยความร้อนและน้ำ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ [68-70] และจากตารางที่ 4.39 พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร เนื่องจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงนั้นเกิดเพียงบริเวณส่วนอสัญฐานของเม็ดแป้งเท่านั้น ไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงในส่วนที่เป็นผลึกของเม็ดแป้ง จึงอาจไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแป้งครอสลิงค์ [71] อีกทั้งไม่พบความแตกต่างของความเข้มพีคและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.23 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรูปและตัดแปรรูปโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) NSF (ข) 1% CSF (ค) 2% CSF, (ง) 3% CSF และ (จ) 4% CSF



รูปที่ 4.24 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรูปและตัดแปรรูปสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) NSF (ข) 10% OS-1% CSF (ค) 10% OS-4% CSF (ง) 20% OS-1% CSF (จ) 1% CS-10% OSF (ฉ) 1% CS-20% OSF และ (ช) 4% CS-10% OSF

ตารางที่ 4.39 ปริมาณผลึกของฟิล์มจากแป้งดัดแปรต่างๆ

สูตร	ปริมาณผลึก (%)
NSF	51.84
5% OSF	52.14
10% OSF	53.05
20% OSF	54.16
1% CSF	51.54
2% CSF	51.39
3% CSF	51.82
4% CSF	51.72
10% OS-1% CSF	52.51
10% OS-4% CSF	52.26
20% OS-1% CSF	52.10
1% CS-10% OSF	52.75
1% CS-20% OSF	52.20
4% CS-10% OSF	53.15

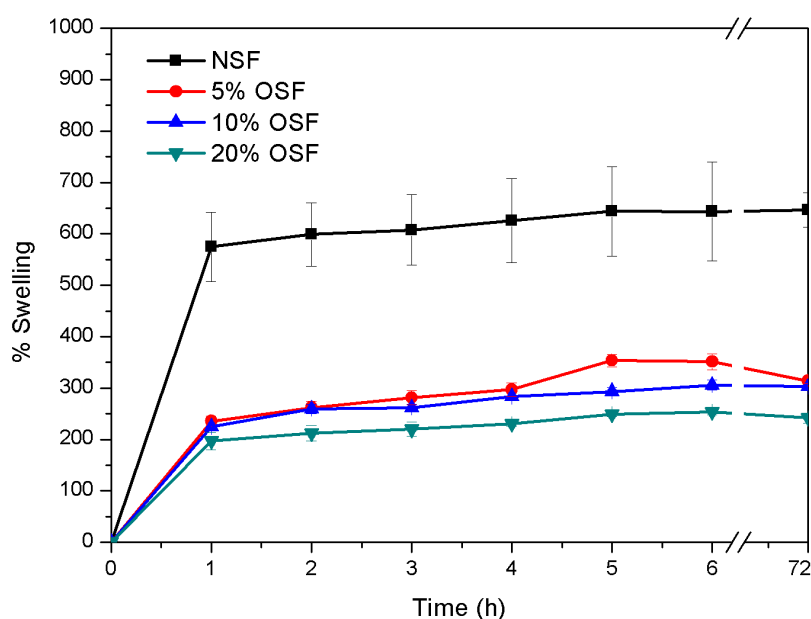
จากดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.24 (ข)-(ค) และภาคผนวก ง รูปที่ ง.9-ง.14 พบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.2° และ 19.8° ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตร ซึ่งดิฟแฟรกโทแกรมที่พบเป็นการรวมกันระหว่างผลึกแบบ B กับผลึกแบบ V_H นอกจากนี้พบว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม (จากตารางที่ 4.39) เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรฟิล์มจากแป้งที่ไม่ดัดแปร เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันอาจเกิดการสลายตัวของอะไมโลสและมีการจัดเรียงตัวใหม่ ส่งผลให้มีโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น [7] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ไม่พบความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกในฟิล์มทุกสูตร พบว่าสูตรฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และแป้งครอสลิงค์ มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ขณะที่ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ พบแนวโน้มเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ขณะที่ฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรฟิล์มจากแป้งที่ไม่ดัดแปร ซึ่งปัจจัยของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในเรื่องลำดับของการดัดแปร ปริมาณของ

สารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อการความเป็นผลึกของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน นอกจากนี้ที่สูตร 20% OSF พบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงสุด

4.8 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

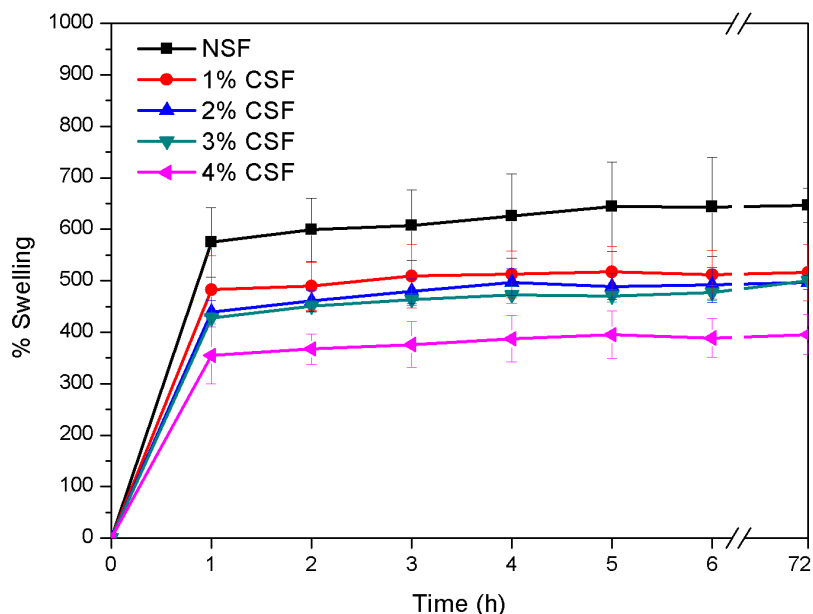
ทดสอบการบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสูตรต่างๆ โดยทำการแช่ชิ้นงานฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลาต่างๆ จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มมาชั่งน้ำหนักและคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัวตามสมการที่ 3.7 โดยผลการทดสอบการบวมตัวแสดงดังรูปที่ 4.25-4.32 และภาคผนวก จ



รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งที่ดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.25 และภาคผนวก จ แสดงการบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่ต่างกัน พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีการบวมตัวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมง จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลง อย่างไรก็ตามสูตรฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ อันได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF พบการบวมตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มสูตร NSF เนื่องจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระและการแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอนิลจากการผ่านการออกซิเดชันนั้นทำให้ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีความชอบน้ำที่ลดลง มีสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobicity) เพิ่มมากขึ้น [4] ส่งผลให้ฟิล์มกักเก็บน้ำได้ลดลง จึงทำให้เกิดการบวมตัวได้ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้พบการบวมตัวของ

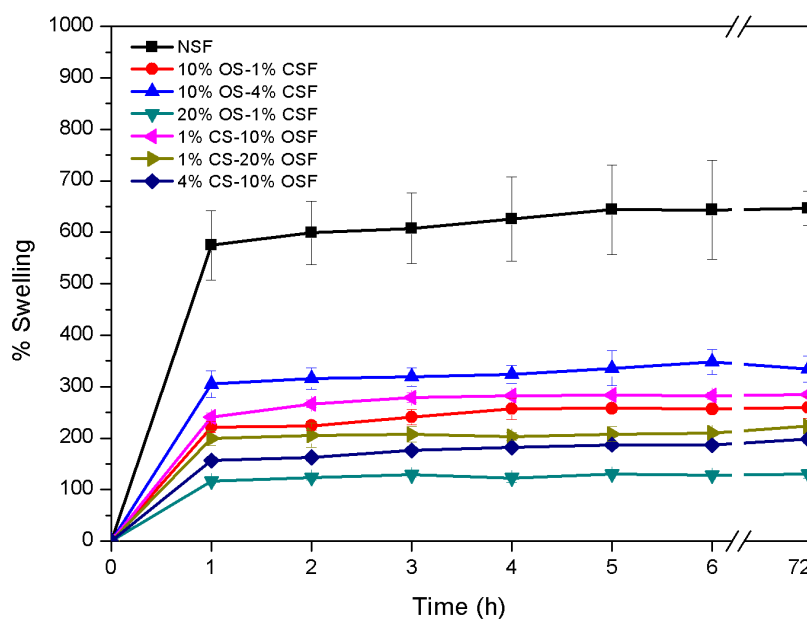
ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ลดต่ำลงตามปริมาณของสารออกซิไดส์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับปริมาณของหมู่คาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยฟิล์มสูตร 20% OSF พบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน

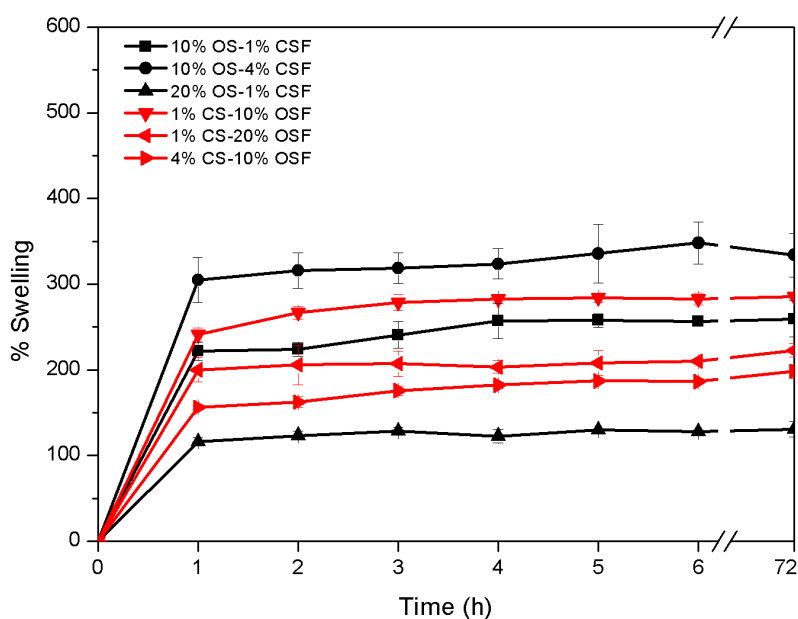
ผลจากการทดสอบการบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.26 และภาคผนวก จ พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรมีการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบ โดยเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลงเช่นเดียวกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร ได้แก่ 1% CSF 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในสูตรที่มีการเชื่อมโยงและพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้งเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูตาร์ลดีไฮด์ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้น ซึ่งโครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นนี้สามารถขัดขวางโมเลกุลของน้ำที่แทรกเข้ามาในโครงสร้างของแป้งได้ จึงทำให้ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์กักเก็บน้ำได้ลดลง และมีการบวมตัวที่ต่ำ โดยเปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลงตามปริมาณสารเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับการบวมตัวจากมากไปน้อย ดังนี้ 1% CSF > 2% CSF > 3% CSF > 4% CSF ซึ่งสอดคล้องกับผลขององศาการเชื่อมโยง แสดงดังตารางที่ 4.3 ที่เมื่อมีองศาการเชื่อมโยงสูง ส่งผลให้

เปอร์เซ็นต์การบวมตัวมีค่าต่ำ และผลที่ได้ยังมีความคล้ายคลึงกันกับงานวิจัยของ อัจจิมา สุทธิชูจิต ที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง การบวมตัวมีแนวโน้มลดต่ำลง [49]



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 และภาคผนวก จ แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ พบว่าฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ และเปอร์เซ็นต์การบวมตัวแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 1 หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลง นอกจากนี้พบว่า การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตรต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลจากการผ่านการตัดแปรโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยง อีกทั้งยังเกิดหมู่คาร์บอนิลที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกขึ้นแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลอิสระจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการเชื่อมโยงของแป้งจนเป็นโครงสร้างตาข่ายในปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงส่งผลให้ฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร

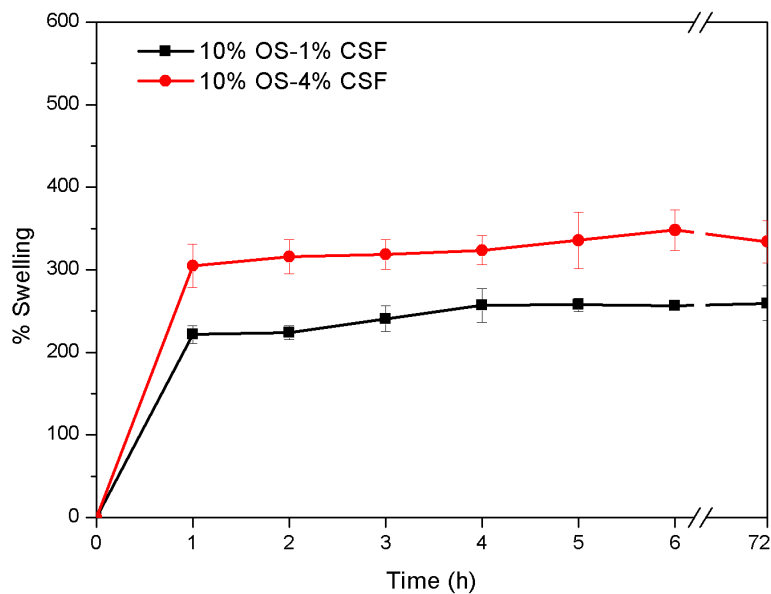


รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนระหว่างฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ (เส้นกราฟสีดำ) และ ฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (เส้นกราฟสีแดง)

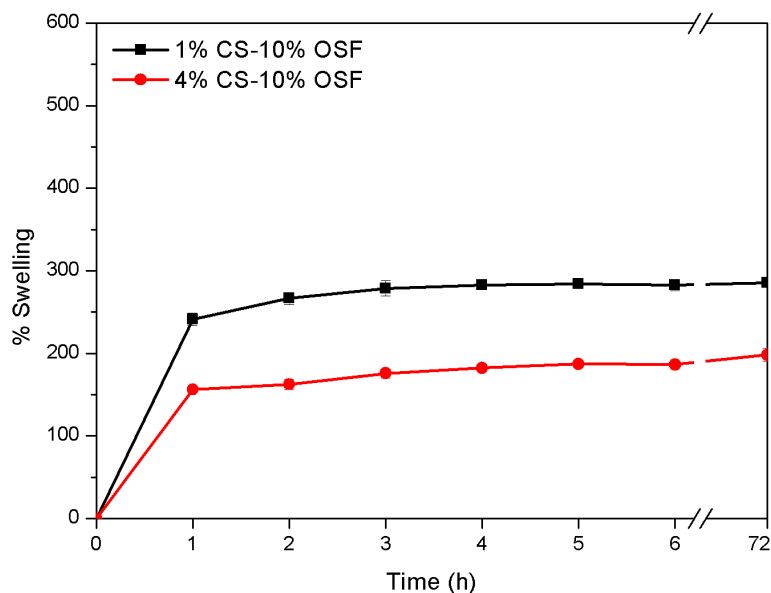
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลำดับในการตัดแปรของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนจากรูปที่ 4.28 พบว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ในสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF มีการบวมตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ในสูตร 1% CS-10% OSF และ 1% CS-20% OSF ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน อาจเนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นสูงจากการออกซิเดชันที่ส่งผลที่มากกว่า ทำให้ฟิล์มมีสมบัติไฮโดรโฟบิก และไม่ชอบน้ำสูงขึ้น จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ แต่เมื่อพิจารณาลำดับในการตัดแปรในฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ในสูตร 4% CS-10% OSF เมื่อเปรียบเทียบกับ 10% OS-4% CSF ที่เป็นฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ พบสูตร 4% CS-10% OSF นั้นมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่า อาจเกิดเนื่องจากความหนาแน่นจากการเชื่อมโยงมากที่สุดในสูตร 4% CS-10% OSF เห็นได้จากองศาการเชื่อมโยงจากตารางที่ 4.5 ดังนั้นผลจากการเชื่อมโยงมีผลต่อการทดสอบการบวมตัวของฟิล์มมากกว่าการออกซิเดชันในสูตร 4% CS-10% OSF

จากรูปที่ 4.29-4.30 เมื่อพิจารณาสูตรของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน พบว่าสูตร 10% OS-1% CSF มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่าสูตร 10% OS-4% CSF (จากตารางที่ 4.29) และสูตร 4% CS-10% OSF มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำกว่าสูตร 1% CS-10% OSF (จากตารางที่ 4.30) ซึ่งสูตร 10% OS-1% CSF ไม่ได้เป็นตามแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสารเชื่อมโยงที่ทำให้ฟิล์มมีความชอบน้ำลดลง กักเก็บน้ำได้ลดลง ส่งผลต่อการบวมต่ำ อาจเป็นเพราะผลจากหมู่คาร์บอนิลที่ส่งร่วมด้วยในสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobicity) ที่มากขึ้น [4] แต่

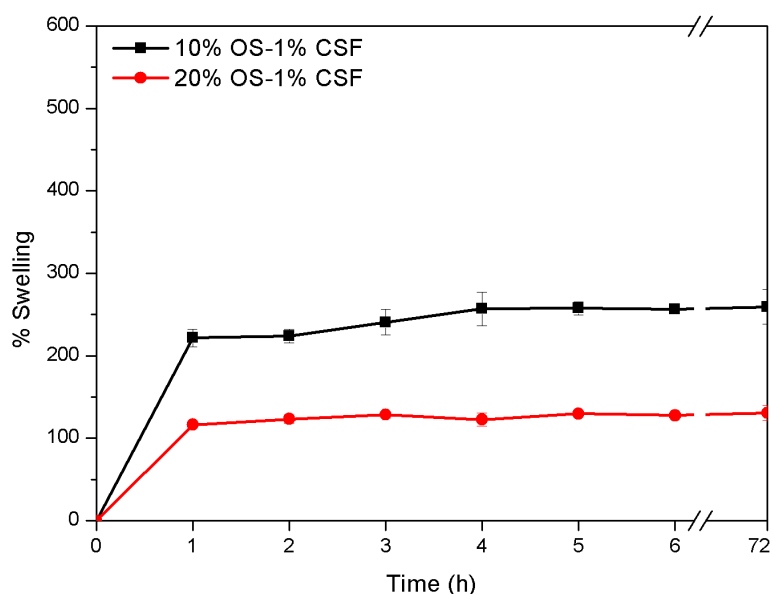
ขณะที่สูตร 4% CS-10% OSF เป็นไปตามผลของการเชื่อมโยงที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าองศาการเชื่อมโยง (ตารางที่ 4.5) ที่มีค่าสูงสุดในสูตร 4% CS-10% OSF



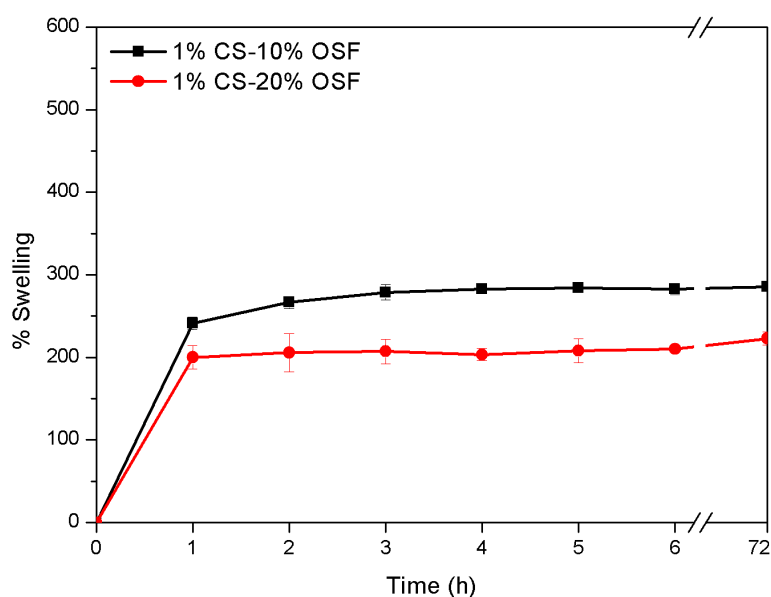
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-โครสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนออกซิไดส์-โครสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนโครสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

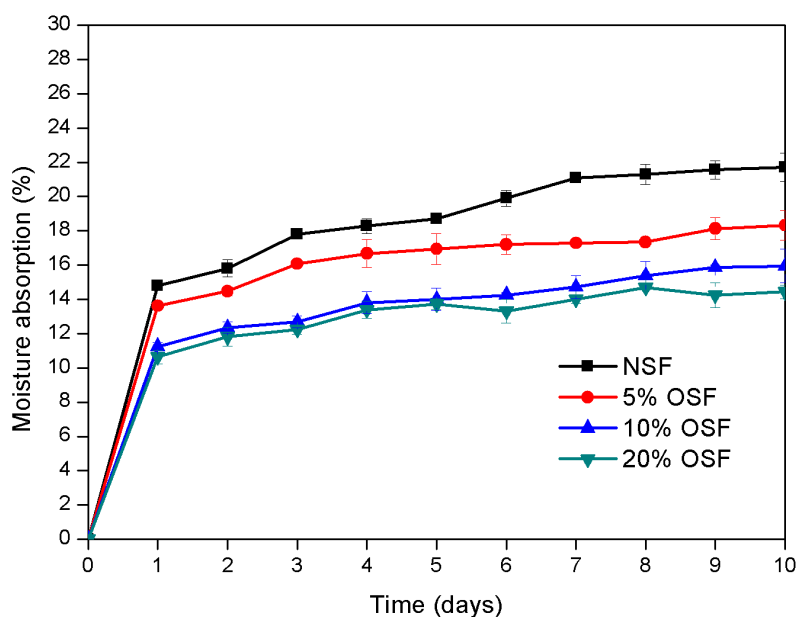
ขณะที่พิจารณาปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน โดยเปรียบเทียบกับสูตรที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่คงที่จากรูปที่ 4.31-4.32 พบว่าการเพิ่มปริมาณ สารออกซิไดส์ ส่งผลให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมที่ลดต่ำลง ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกันทั้งฟิล์มจาก

แป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ ในสูตร 20% OS-1% CSF (รูปที่ 4.31) และฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ในสูตร 1% CS-20% OSF (รูปที่ 4.32) ซึ่งในสูตรดังกล่าวมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลสูงกว่า ทำให้ฟิล์มมีสมบัติไฮโดรโฟบิกสูง [4] ซึ่งในสองสูตรนี้ผลของปริมาณหมู่คาร์บอนิลจากการออกซิเดชันเป็นส่วนที่ส่งผลมากกว่าการเชื่อมโยง ทำให้ฟิล์มเกิดการบวมตัวได้ต่ำกว่า นอกจากนี้ลำดับการบวมตัวสามารถเรียงจากมากไปน้อย ดังนี้ 10% OS-4% CSF > 1% CS-10% OSF > 10% OS-1% CSF > 1% CS-20% OSF > 4% CS-10% OSF > 20% OS-1% CSF โดยสูตรที่พบการบวมที่ต่ำที่สุดคือ 20% OS-1% CSF เนื่องจากในสูตรนี้มีปริมาณของหมู่คาร์บอนิลที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนทุกสูตร แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งทำให้ฟิล์มในสูตรนี้มีความชอบน้ำที่ต่ำ มีสมบัติไฮโดรโฟบิกสูง [4] โดยผลจากทั้งการเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์และออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ล้วนส่งผลกับเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มทั้งสิ้น

จากผลการทดสอบการบวมตัวเมื่อพิจารณาจากฟิล์มทุกสูตร พบว่าสูตรที่บวมตัวมากที่สุด ได้แก่ NSF และสูตรที่มีการบวมตัวน้อยที่สุด ได้แก่ 20% OS-1% CSF เนื่องจากผลของปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่สูงและยังมีผลจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ฟิล์มจึงมีสมบัติไฮโดรโฟบิกที่สูง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ต่ำ ผลการทดสอบการบวมตัวจึงมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ในการพิจารณาปัจจัยของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนในเรื่องลำดับของการดัดแปร ปริมาณของสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน พบว่าปัจจัยในเรื่องปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันส่งผลที่ชัดเจนต่อการทดสอบการบวมตัวทั้งในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ และฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ขณะที่ลำดับในการดัดแปรนั้น พบว่าการออกซิเดชันในขั้นแรกส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ต่ำในสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF

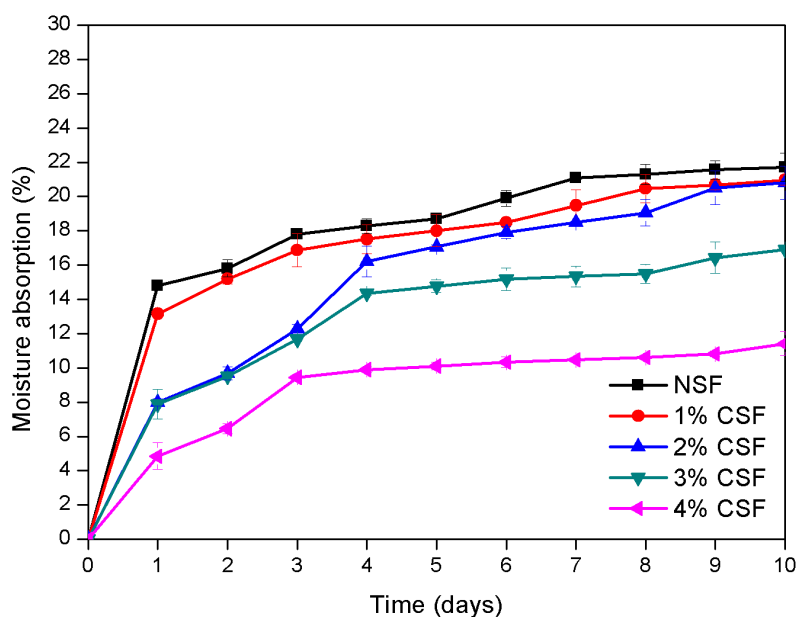
4.9 การดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

ทดสอบการดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสูตรต่างๆ โดยทำการวางชิ้นงานฟิล์มในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น ด้วยความชื้นสัมพัทธ์ $99 \pm 1\%$ และชั่งน้ำหนักชิ้นงานฟิล์มทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นได้จากสมการที่ 3.8 โดยผลการทดสอบดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.33-4.40 และภาคผนวก ฉ



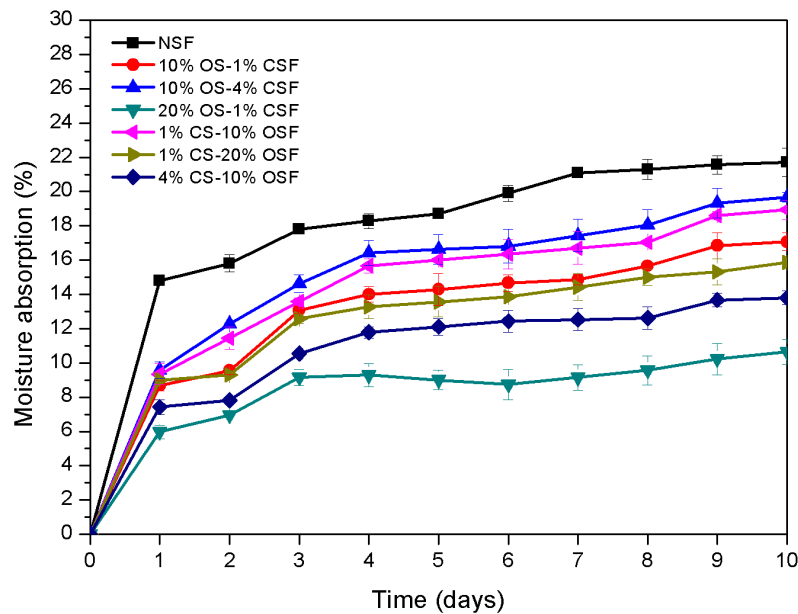
รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.33 และภาคผนวก ฉ แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบในชิ้นงานฟิล์มทุกสูตร โดยการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ช้าลงและเริ่มคงที่ เนื่องจากชิ้นงานเกิดการอิมตัวของความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไปภายในฟิล์มจึงทำให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลงและคงที่ในที่สุด นอกจากนี้พบว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากการออกซิเดชันเกิดการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งให้เป็นหมู่คาร์บอนิลที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีความชอบน้ำที่ลดลง [4] ส่งผลให้ฟิล์มดูดซับความชื้นได้ลดลงตามมา โดยแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์อย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกันกับปริมาณของหมู่คาร์บอนิล ในตารางที่ 4.2 ที่ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมาก ทำให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้นและความชอบน้ำลดลงตามไปด้วย โดยสูตร 20% OSF มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน

เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1% CSF 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF แสดงดังรูปที่ 4.34 และภาคผนวก ฉ พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก และเพิ่มขึ้นช้าลงจนเริ่มคงที่หลังจากนั้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์มีค่าต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความชอบน้ำ จากการเกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ทำให้ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์มีความชอบน้ำที่ลดลงและดูดซับความชื้นได้ลดลงตามมา โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ อัจจิมา สุทธิชูจิต ที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลง [49] โดยสามารถเรียงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ 1% CSF > 2% CSF > 3% CSF > 4% CSF ตามลำดับ

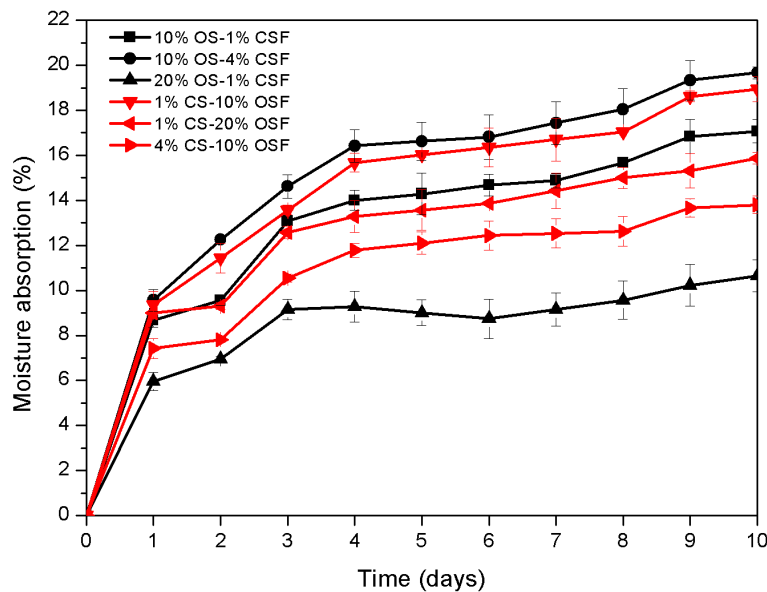


รูปที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ

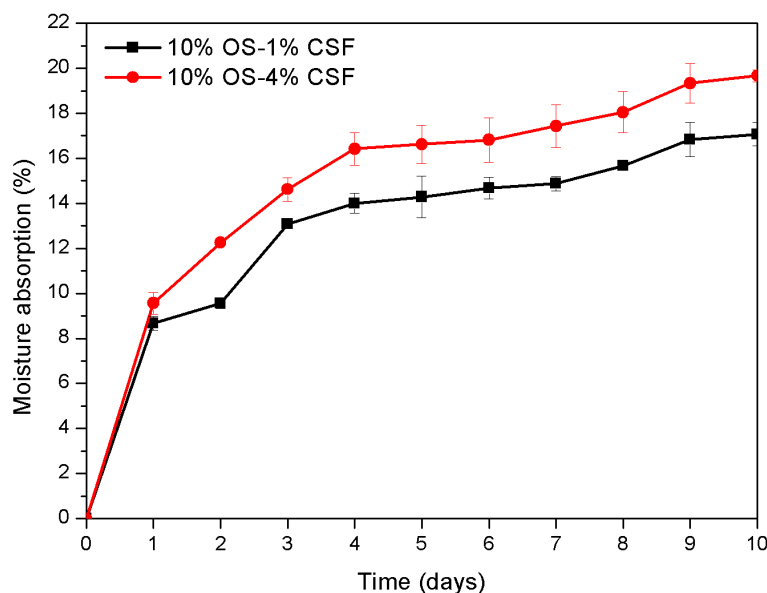
เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นช้าลงและคงที่เช่นเดียวกับฟิล์มแป้งสูตรอื่นๆ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบมีแนวโน้มการดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น และในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าฟิล์มสูตร NSF เนื่องจากการดัดแปรสองชั้นตอนโดยการผ่านทั้งการออกซิเดชันและการเชื่อมโยง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระภายในแป้งที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilicity) ที่มีความชอบน้ำนั้นลดลง ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความชอบน้ำลดลง และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลำดับในการดัดแปรของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนจากรูปที่ 4.36 พบการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ในสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน อาจเพราะปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิก ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าในสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF มีผลต่อการทดสอบการดูดซับความชื้นที่มากกว่า จึงให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำในสูตรดังกล่าว ขณะที่สูตร 4% CS-10% OSF ที่เป็นฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ พบว่าผลจากการเชื่อมโยงส่งผลต่อการทดสอบการดูดซับความชื้นที่มากกว่าการออกซิเดชัน เนื่องจากสูตร 4% CS-10% OSF มีองค์การเชื่อมโยงที่สูงที่สุดในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน (จากตารางที่ 4.5) ดังนั้นมีความชอบน้ำต่ำ จึงพบเปอร์เซ็นต์การ

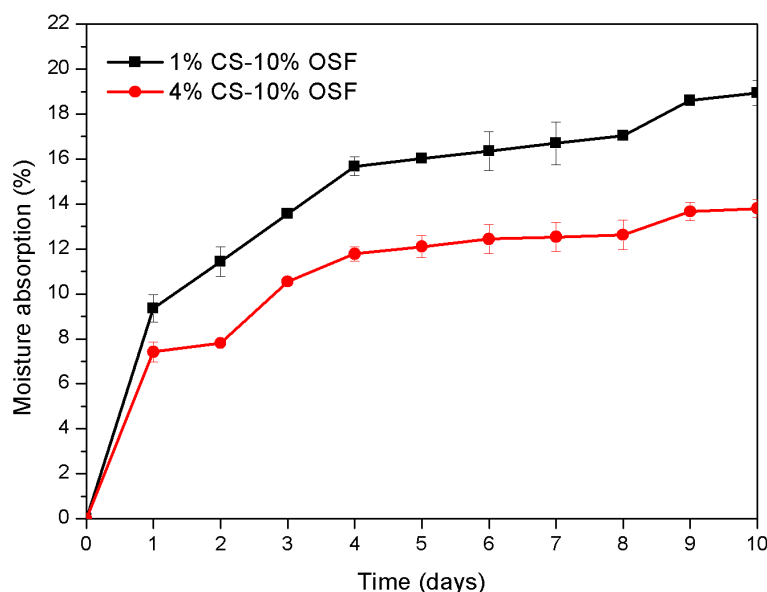
ดูดซับความชื้นของสูตร 4% CS-10% OSF ต่ำกว่าสูตร 10% OS-4% CSF ที่เป็นฟิล์มจาก แป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างสูตร 10% OS-4% CSF และ 4% CS-10% OSF พบว่าผลจากการเชื่อมโยงใน สูตร 4% CS-10% OSF มีผลมากกว่าการออกซิเดชัน



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอนระหว่าง ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (เส้นกราฟสีดำ) และ ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (เส้นกราฟสีแดง)



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองขั้นตอน ออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

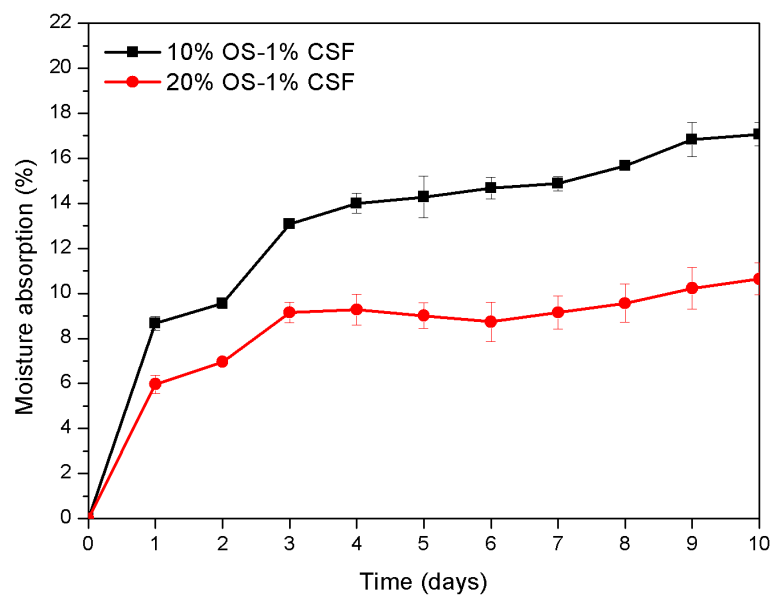


รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่ต่างกัน

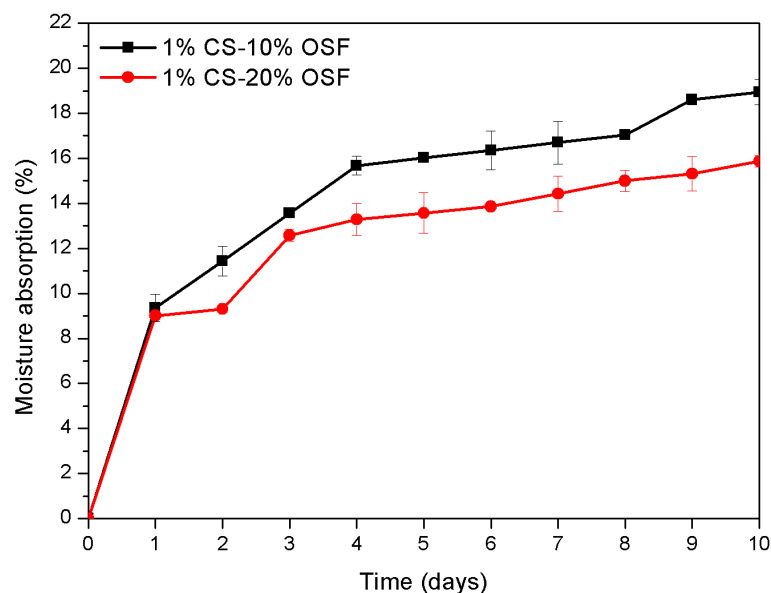
เมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่ต่างกัน โดยที่มีปริมาณสารออกซิไดส์คงที่ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าสูตร 10% OS-1% CSF จากรูปที่ 4.37 และ 4% CS-10% OSF จากรูปที่ 4.38 มีการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่า เหตุผลในสูตร 4% CS-10% OSF ที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่าสูตร 1% CS-10% OSF เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่สูงกว่า โอกาสที่เกิดการเชื่อมโยงจึงมีได้มากกว่า ฟิล์มมีสมบัติไฮโดรโฟบิกมากขึ้น มีความชอบน้ำและดูดซับความชื้นได้ลดลง ขณะที่สูตร 10% OS-1% CSF ไม่เป็นไปตามปริมาณสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะผลจากหมู่คาร์บอนิลในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น ส่งผลที่มากกว่าในสูตร 10% OS-1% CSF

จากรูปที่ 4.39-4.40 ในกรณีที่เปรียบเทียบปริมาณสารออกซิไดส์ที่ต่างกัน โดยมีปริมาณสารเชื่อมโยงที่คงที่ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในสูตรที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่สูงกว่า ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่า ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกันทั้งในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ (รูปที่ 4.39) และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ (รูปที่ 4.40) เนื่องจากปริมาณที่สูงของหมู่คาร์บอนิลที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิก [4] ในสูตร 20% OS-1% CSF และ 1% CS-20% OSF จึงทำให้ฟิล์มสูตรนี้มีความชอบน้ำน้อย โดยสามารถเรียงความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ 10% OS-4% CSF > 1% CS-10% OSF > 10% OS-1% CSF > 1% CS-20% OSF > 4% CS-10% OSF > 20% OS-1% CSF ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุด พบในสูตร 20% OS-1% CSF เนื่องจากสูตรนี้พบปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้ง

ดัดแปรสองชั้นตอนสูตรอื่นๆ (ตารางที่ 4.4) อีกทั้งยังมีผลจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเชื่อมโยง ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติไฮโดรโฟบิกมากกว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในสูตรอื่นๆ



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ออกซิไดส์-โครอสลิงค์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน โครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์มสูตร NSF มีการดูดซับความชื้นที่มากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มากกว่าสูตรอื่น และสูตรที่มีการดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุด ได้แก่ 20% OS-1% CSF เนื่องจากการมีหมู่ที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิก ได้แก่ หมู่คาร์บอนิลในปริมาณที่สูง และพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น จึงทำให้ฟิล์มนั้นมีความชอบน้ำที่ต่ำ เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นจึงมีค่าต่ำที่สุด โดยแนวโน้มของผลการดูดซับความชื้นนั้นคล้ายคลึงกับการบวมตัว นอกจากนี้ปัจจัยที่พิจารณาในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในเรื่องปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการทดสอบการดูดซับความชื้นที่ชัดเจนทั้งในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ และฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์ ขณะที่ลำดับในการดัดแปรนั้น พบว่าการออกซิเดชันในชั้นแรกส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำในสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF

4.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสูตรต่างๆ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882-02 ซึ่งมีการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลจากค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.41-4.43 และภาคผนวก ข

รูปที่ 4.41 (ก)-(ค) และภาคผนวก ข แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5% OSF 10% OSF และ 20% OSF จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มในสูตร NSF มีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสต่ำที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมากที่สุดในทางกลับกันฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ พบค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสที่เพิ่มสูงขึ้น แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ลดลง เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งขึ้นได้ ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งแน่นหนามากขึ้น โดยปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้มีโอกาสที่เกิดพันธะไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้นและส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ที่ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดลดลง [57-58] อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ (ตารางที่ 4.39) จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในหัวข้อ 4.7 และลักษณะภาคตัดขวางที่มีความเรียบ และเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ไม่พบรอยแตก จากสัญญาณวิทยาในหัวข้อที่ 4.4.2 แสดงดังรูปที่ 4.13 (ข)-(ง) ของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ทุกสูตร ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรง และความแข็งแรงดึงสูงขึ้น แต่ความสามารถในการดึงยืดนั้นลดลง นอกจากนี้ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้ยัง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปรารณา คำใส [72] งานวิจัยของ ศศิกร ภูมิแก้ว [73] และงานวิจัยของ Zavareze E.R. และคณะ [74] ที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ล้วนส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.42 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1% CSF 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดลดต่ำลง แต่ในสูตร 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF ไม่พบความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ในขณะที่ฟิล์มสูตร NSF มีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสที่ต่ำ แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ทุกสูตร เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอิสระภายในแป้งกับสารเชื่อมโยงอย่างกลูตารัลดีไฮด์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยง (รูปที่ 4.2) ทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนี้ โดยยังมีปริมาณสารเชื่อมโยงมาก ยิ่งทำให้เกิดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่มากตามไปด้วย ซึ่งเห็นได้จากองศาการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางไม่มีรอยแตก และเป็นวัฏภาคเดียวกันของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ (4.14 (ข)-(จ)) ส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่แป้ง จึงทำให้ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์มีการดึงยืดที่ลดลง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่จึงมีค่าต่ำ

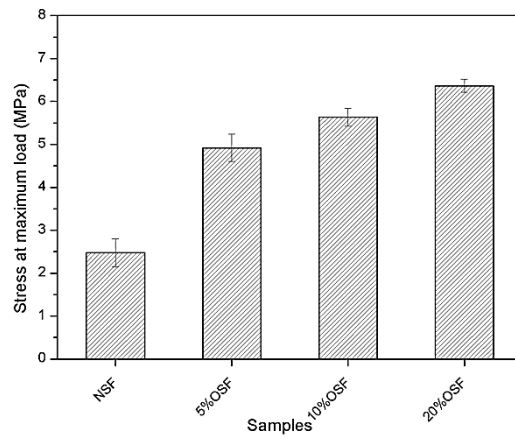
จากรูปที่ 4.43 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ ได้แก่ 10% OS-1% CSF, 10% OS-4% CSF, 20% OS-1% CSF, 1% CS-10% OSF, 1% CS-20% OSF และ 4% CS-10% OSF พบว่าฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรในสูตร NSF แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ต่ำกว่า เนื่องจากผลของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งกับหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งแน่นหนามากขึ้น [57-58] และผลจากปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่เกิดพันธะเชื่อมโยงเกิดขึ้น อีกทั้งลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มจากสัณฐานวิทยาในหัวข้อ 4.4.2 รูปที่ 4.15 (ข)-(ข) ที่มีลักษณะเป็นวัฏภาคเดียวกัน ส่งผลให้ฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนนั้นมีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NSF

เมื่อพิจารณาลำดับในการตัดแปรของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอน พบว่าฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ทุกสูตร ได้แก่ 1% CS-10% OSF 1% CS-20% OSF และ 4% CS-10% OSF มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงกว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์ในสูตร

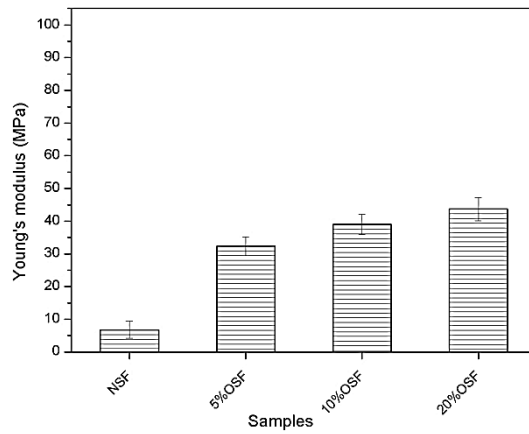
1% CS-10% OSF และ 4% CS-10% OSF นั้นมีค่าสูงกว่าฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครอสลิงค์ในสูตร 10% OS-1% CSF และ 10% OS-4% CSF ตามลำดับ คาดว่าผลจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นร่วมกับการตัดสายโซ่จากการออกซิเดชันมีผลร่วมกัน จึงส่งผลให้ฟิล์มจากแป้งโครอสลิงค์-ออกซิไดส์สูตร 1% CS-10% OSF และ 4% CS-10% OSF มีความแข็งแรง และการดึงยืดที่มากกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน แต่มีปริมาณสารออกซิไดส์คงที่ พบว่าผลจากสมบัติเชิงกลในค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง แต่ในการสูตรที่ปริมาณสารเชื่อมโยงที่สูงกว่า ได้แก่ สูตร 10% OS-4% CSF และ 4% CS-10% OSF ให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่า และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารออกซิไดส์ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน โดยมีปริมาณสารเชื่อมโยงคงที่ พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสนั้นลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ในสูตร 20% OS-1% CSF และ 1% CS-20% OSF คาดว่าการตัดสายโซ่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาเชื่อมโยง ส่งผลให้สายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลนั้นลดต่ำลง (จากตารางที่ 4.30) จึงส่งผลให้มีความเค้นและมอดูลัสที่ต่ำ ขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด พบสูตร 20% OS-1% CSF ใกล้เคียงกับ 10% OS-1% CSF แต่ในสูตร 1% CS-20% OSF มีการดึงยืดที่ต่ำกว่า 1% CS-10% OSF

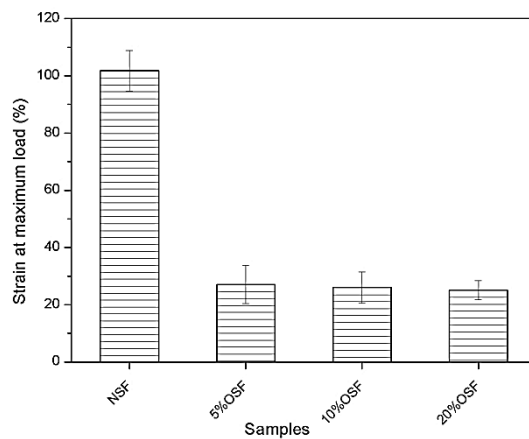
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มทุกสูตร พบค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสสูงที่สุดในสูตร 4% CSF และต่ำที่สุดในสูตร NSF ขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด พบว่าฟิล์มสูตร NSF มีการยืดออกได้มากที่สุด ส่วนสูตร 2% CSF 3% CSF และ 4% CSF มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ต่ำที่สุด โดยทั้งสามสูตรนี้พบค่าที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่สูตร 4% CS-10% OSF และ 1% CS-10% OSF เป็นฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอนที่พบค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสสูงที่สุด อีกทั้งยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปรขั้นตอนเดียวทุกสูตร นอกจากนี้ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองขั้นตอน พบว่าปัจจัยในเรื่องลำดับในการดัดแปรและปริมาณของสารออกซิไดส์ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ชัดเจน



(ก)

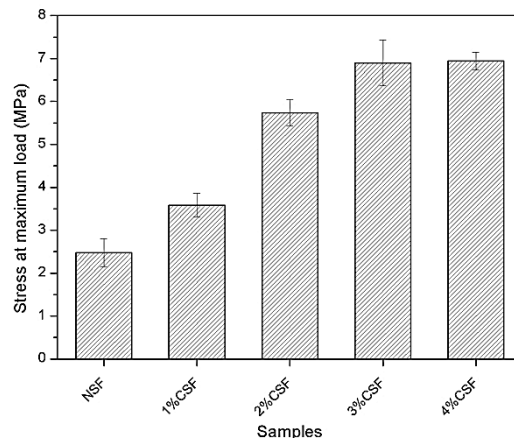


(ข)

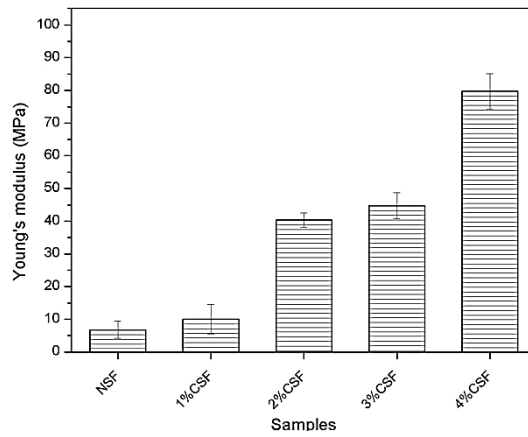


(ค)

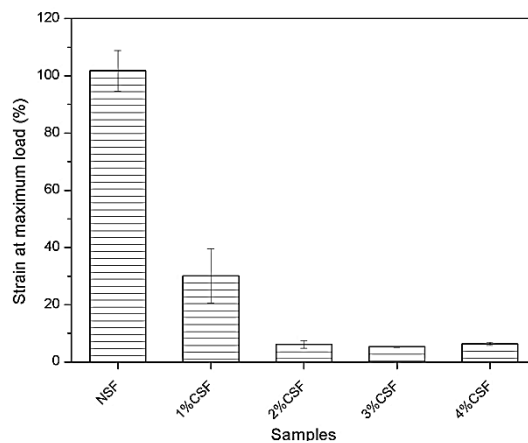
รูปที่ 4.41 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรและตัดแปรรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด



(ก)

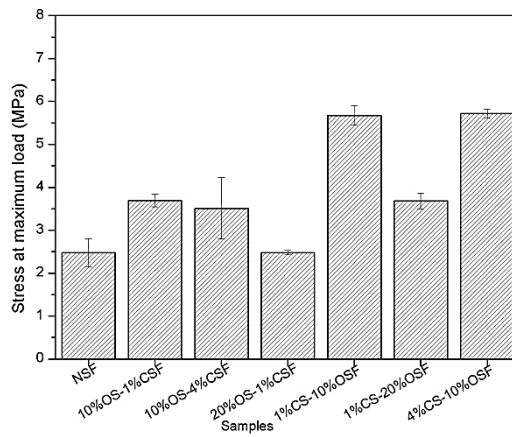


(ข)

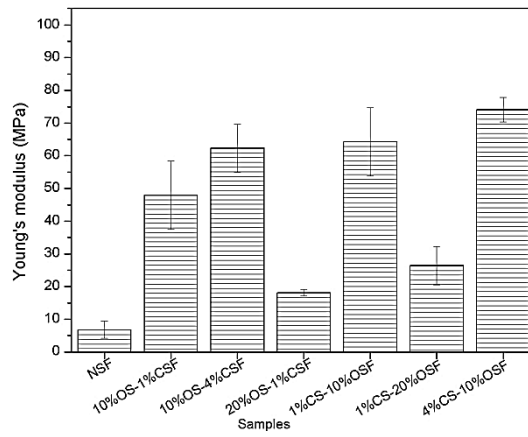


(ค)

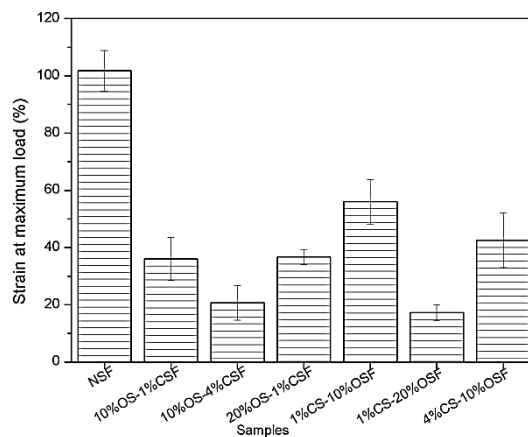
รูปที่ 4.42 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.43 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน โดยมีการควบคุมสภาวะของดิน โดยให้มีความชื้นอยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มหลังจากการฝังดินมาทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โดยผลแสดงดังรูปที่ 4.44-4.46 ตารางที่ 4.40 และภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.40 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรรและตัดแปรรสูตรต่างๆ ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน 16 วัน (%)		
	ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด
NSF	60.40±0.49 ^a	52.79±1.27 ^a	84.75±0.35 ^a
5% OSF	25.12±1.30 ^{bcd}	39.53±0.19 ^b	79.10±0.75 ^b
10% OSF	19.45±3.73 ^e	27.24±3.77 ^c	78.79±1.54 ^{bc}
20% OSF	18.87±2.68 ^e	22.76±0.14 ^{de}	78.39±0.12 ^{bcd}
1% CSF	45.37±0.87 ^f	35.45±2.68 ^f	43.80±0.08 ^e
2% CSF	28.17±0.62 ^{bg}	26.77±2.26 ^c	29.95±0.81 ^f
3% CSF	22.44±1.45 ^{cde}	27.40±0.31 ^c	28.17±2.36 ^f
4% CSF	20.97±2.86 ^{de}	24.53±1.88 ^{cd}	23.67±0.71 ^g
10% OS-1% CSF	42.58±2.17 ^f	24.71±0.30 ^{cd}	78.28±1.81b ^{cd}
10% OS-4% CSF	45.94±2.86 ^f	39.65±0.57 ^b	75.81±0.58 ^{dh}
20% OS-1% CSF	18.76±0.36 ^e	16.42±1.59 ^g	74.34±2.40 ^h
1% CS-10% OSF	45.01±3.69 ^f	36.67±1.70 ^{bf}	78.73±0.02 ^{bc}
1% CS-20% OSF	26.88±1.91 ^{bcg}	31.12±1.02 ^h	76.26±0.41 ^{cdh}
4% CS-10% OSF	30.04±1.16 ^g	19.82±0.42 ^{eg}	78.87±0.64 ^{bc}

*หมายเหตุ : ค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยตัวอักษรยกกำลังที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากรูปที่ 4.44-4.46 ตารางที่ 4.40 ภาคผนวก ข แสดงสมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแบงก์ที่ไม่ได้ตัดแปรรและตัดแปรรสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน พบว่าชิ้นงานฟิล์มทุกสูตรมีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และ

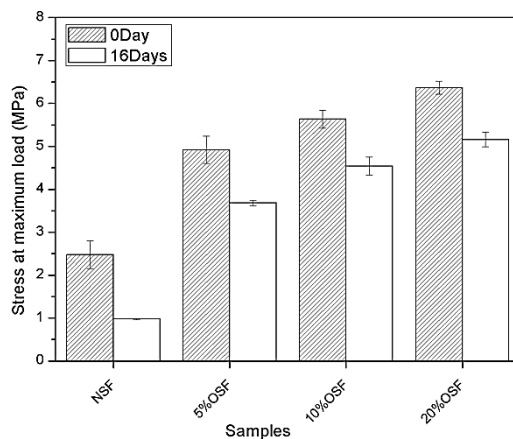
เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดลดต่ำลงหลังจากทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน เนื่องจากในโครงสร้างของแบงก์นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้มีสมบัติไฮโดรฟิลิก มีความชอบน้ำสูง เมื่อทำการฝังดินที่มีความชื้น ชื้นงานฟิล์มนี้จึงดูดซับน้ำเข้ามาจากนั้นสายโซ่แบงก์เกิดการไฮโดรไลซิส อีกทั้งจุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในดินยังสามารถย่อยสลายแบงก์ได้ [75] จึงทำให้สมบัติของฟิล์มหลังจากการฝังดินมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกล แสดงดังตารางที่ 4.40 เห็นได้ว่าชิ้นงานฟิล์มสูตร NSF มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมากกว่าฟิล์มทุกสูตร เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มากที่สุด จึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้นหรือน้ำได้ดีที่สุด สอดคล้องกับผลจากการดูดซับความชื้น ในหัวข้อ 4.9 จึงอาจทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสและขาดของสายโซ่แบงก์ได้มาก มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลหลังฝังดินต่ำลง

ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงในฟิล์มจากแบงก์ที่ดัดแปรชั้นตอนเดียว พบแนวโน้มที่ต่ำลงของเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดิน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มีความชอบน้ำนั้นลดลง สอดคล้องกันกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่คาร์บอนิลในแบงก์ออกซิไดส์ และองค์การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นในแบงก์ครอสลิงค์ แสดงดังตาราง 4.2-4.3 ตามลำดับ ทำให้ฟิล์มมีสมบัติไฮโดรโฟบิกเพิ่มมากขึ้น ดูดซับความชื้นลดลง ความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มเหล่านี้จึงลดลง

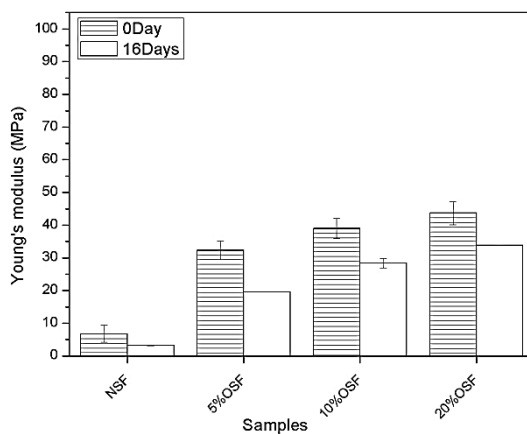
ในฟิล์มจากแบงก์ดัดแปรสองชั้นตอน เมื่อพิจารณาลำดับในการดัดแปร พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลในค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มการลดลงที่ต่ำกว่าในฟิล์มจากแบงก์ออกซิไดส์-ครอสลิงค์ ได้แก่ สูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF เนื่องจากมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่สูงกว่าฟิล์มจากแบงก์ครอสลิงค์-ออกซิไดส์ที่ปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน (ตารางที่ 4.4) ส่งผลให้ฟิล์มสูตร 10% OS-1% CSF และ 20% OS-1% CSF มีสมบัติไฮโดรโฟบิกและไม่ชอบน้ำสูง จึงมีแนวโน้มการดูดซับความชื้นและการย่อยสลายของฟิล์มได้ลดลง ขณะที่สูตร 4% CS-10% OSF (ฟิล์มจากแบงก์ครอสลิงค์-ออกซิไดส์) องค์การเชื่อมโยงที่สูงในสูตรนี้ส่งผลที่มากกว่าต่อการดูดซับความชื้น จึงทำให้สูตรนี้มีการลดลงของความเค้นและโมดูลัสที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแบงก์ออกซิไดส์-ครอสลิงค์ในสูตร 10% OS-4% CSF แสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการดูดซับความชื้น ในหัวข้อ 4.9

นอกจากนี้ปริมาณสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มจากแบงก์ดัดแปรสองชั้นตอน ไม่พบความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลที่ชัดเจนเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรที่มีปริมาณสารออกซิไดส์ที่เท่ากัน แต่ในการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ โดยพิจารณาจากฟิล์มดัดแปรสองชั้นตอนที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน พบว่าสารออกซิไดส์ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น แสดงดังรูปที่ 4.39-4.40

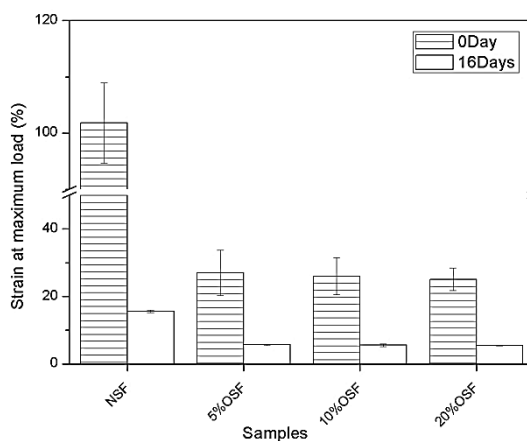
จากการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานฟิล์มสูตรต่างๆ โดยการฝังดิน เป็นเวลา 16 วัน พบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่าลดต่ำลงทุกสูตร โดยสูตร NSF พบเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมากที่สุด บ่งบอกถึงการย่อยสลายได้สูงที่สุด และสูตร 20% OS-1% CSF มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลน้อยที่สุดในค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และโมดูลัส บ่งบอกถึงการย่อยสลายได้ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามถึงแม้ฟิล์มจากแป้งตัดแปรทุกสูตรมีความสามารถในการย่อยสลายที่ต่ำลง แต่ยังสามารถย่อยสลายได้



(ก)

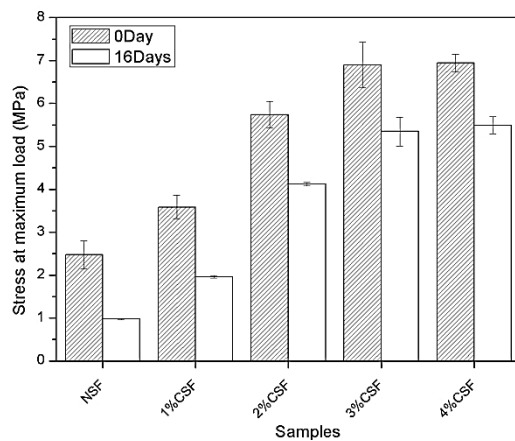


(ข)

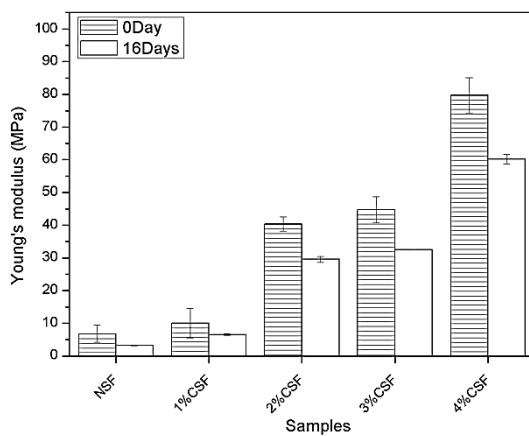


(ค)

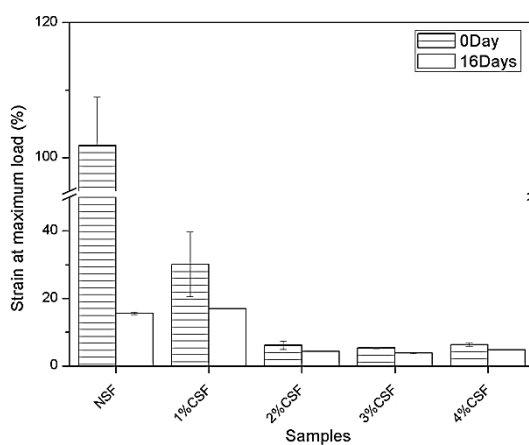
รูปที่ 4.44 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด



(ก)

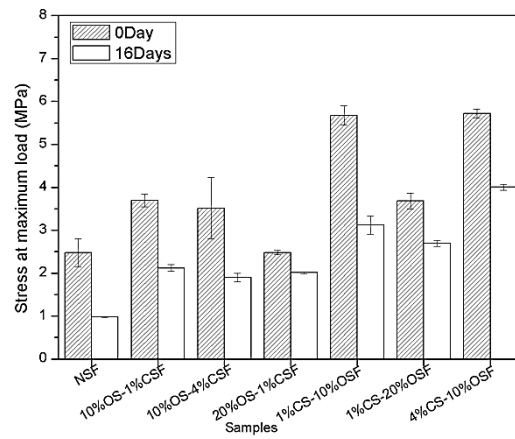


(ข)

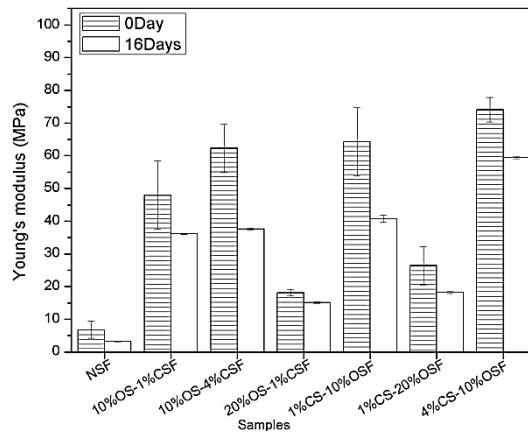


(ค)

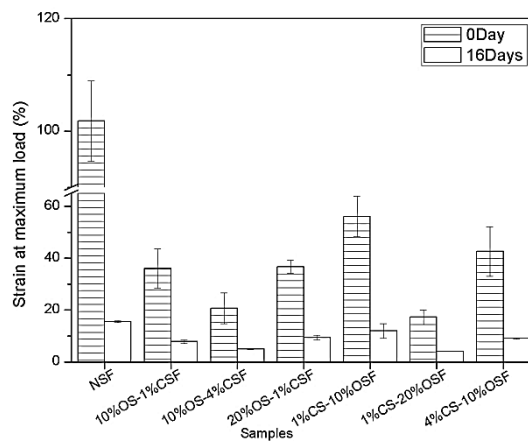
รูปที่ 4.45 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรและตัดแปรโดยการเชื่อมโยงด้วย กลูตาร์ลดีไฮด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับ แรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ(ค) เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.46 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงสูตรต่างๆ หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแป้งออกซิไดส์ แป้งครอสลิงค์ และแป้งดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง อีกทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนโดยการออกซิเดชันและการเชื่อมโยงจากแป้งมันสำปะหลัง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นจากการออกซิเดชัน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ทั้งในแป้งออกซิไดส์และแป้งดัดแปรสองชั้นตอน และปริมาณกลูตาไรลดีไฮด์ที่เพิ่มสูงขึ้นในแป้งครอสลิงค์ และแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ส่งผลให้องค์การเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้น โดยในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ปัจจัยเรื่องลำดับในการดัดแปร และปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ส่งผลที่ชัดเจนต่อปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล และองค์การเชื่อมโยง

5.1.2 จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) พบพีกใหม่ที่ 1735 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ในแป้งและฟิล์มจากแป้งที่ผ่านดัดแปรโดยการออกซิเดชันทุกสูตร ซึ่งยืนยันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยขณะที่สูตรแป้งที่ผ่านการเชื่อมโยงทุกสูตรไม่พบพีกใหม่ปรากฏ และพบการลดลงของสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีก 1644 (ของแป้ง) และ 1642 cm^{-1} (ของฟิล์ม) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการเชื่อมโยงเกิดขึ้น และพบการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของช่วงการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending ในแป้งและฟิล์มจากแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันทุกสูตร นอกจากนี้พบว่าปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในการดัดแปรแป้งสองชั้นตอน เป็นปัจจัยที่ส่งผลที่ชัดเจนที่สุดต่อสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีก 1735 cm^{-1} ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

5.1.3 สันฐานวิทยา

5.1.3.1 จากการศึกษาสันฐานวิทยาของเม็ดแป้ง พบว่า เม็ดแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันมีขนาดของเม็ดแป้งที่ใหญ่ขึ้น และการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ไม่พบความแตกต่างของสันฐานวิทยาของเม็ดแป้งทั้งในการดัดแปรชั้นตอนเดี่ยวและสองชั้นตอน เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง พบเม็ดแป้งรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนชัดเจน โดยในแป้งดัดแปรสองชั้นตอน ปัจจัยเรื่องลำดับในการดัดแปร และปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อสันฐานวิทยาของเม็ดแป้งที่ชัดเจน

5.1.3.2 จากการศึกษาสันฐานวิทยาของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีภาคตัดขวางของฟิล์มที่เรียบมากขึ้น แต่ไม่พบความแตกต่างเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์พบความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง แต่ทุกสูตรยังมีความ

ขรุขระน้อยกว่าสูตร NSF โดยที่ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าลำดับในการดัดแปรส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของฟิล์มชัดเจนมากกว่าปัจจัยอื่นๆ

5.1.4 จากการทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย พบว่า การเชื่อมโยงส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแป้งและความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity) เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การออกซิเดชันส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของแป้งและความหนืดภายในลดต่ำลง นอกจากนี้ในแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตร พบน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าแป้งออกซิไดส์แต่ต่ำกว่าแป้งครอสลิงค์ และพบว่าลำดับในการดัดแปรปริมาณของสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ล้วนส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของแป้งดัดแปรสองชั้นตอน

5.1.5 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า สูตรแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันทุกสูตร พบอุณหภูมิการสลายตัวหลักของแป้งต่ำกว่าสูตรแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ในขณะที่แป้งครอสลิงค์ในทุกปริมาณที่แตกต่างกันของสารเชื่อมโยงไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิการสลายตัวหลักของแป้งเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NS แต่ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรทุกสูตรมีอุณหภูมิการสลายตัวหลักของแป้งต่ำกว่าฟิล์มจากสูตร NSF นอกจากนี้ปัจจัยในการดัดแปรแป้งสองชั้นตอนในเรื่องลำดับ และปริมาณของสารออกซิไดส์มีผลที่ชัดเจนต่อสมบัติทางความร้อนของทั้งเม็ดแป้งและฟิล์ม

5.1.6 จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์ และฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนทุกสูตรมีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ความผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยการเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารออกซิไดส์ ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์ไม่พบความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NSF และปัจจัยของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในเรื่องลำดับของการดัดแปร ปริมาณของสารเชื่อมโยงและสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อการความเป็นผลึกของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน นอกจากนี้พบว่าสูตร 20% OSF พบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงที่สุด

5.1.7 จากการทดสอบการบวมตัว พบการบวมตัวของฟิล์มจากแป้งดัดแปรทุกสูตรต่ำกว่าสูตร NSF และพบว่าสูตร 20% OS-1% CSF มีการบวมตัวที่ต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และครอสลิงค์ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียวมีแนวโน้มการบวมตัวที่ต่ำลง โดยในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบว่าปัจจัยในเรื่องปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันส่งผลที่ชัดเจนต่อการทดสอบการบวมตัวทั้งในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-ครอสลิงค์ และฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์-ออกซิไดส์

5.1.8 จากการทดสอบดูดซับความชื้น พบผลที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดสอบการบวมตัว โดยฟิล์มดัดแปรทุกสูตรนั้นมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่า NSF และเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และครอสลิงค์ในฟิล์มจากแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียวมีแนวโน้มการดูดซับความชื้นที่ต่ำลง ซึ่งในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน พบเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำที่สุดในสูตร 20% OS-1% CSF นอกจากนี้ปัจจัยที่พิจารณาในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนในเรื่องปริมาณของสารออกซิไดส์

ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการทดสอบการดูดซับความชื้นที่ชัดเจนทั้งในฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์-โครสลิงค์ และฟิล์มจากแป้งโครสลิงค์-ออกซิไดส์

5.1.9 จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบฟิล์มจากแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียวที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และสารเชื่อมโยงส่งผลให้ฟิล์มมีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงขึ้น แต่พบเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่ลดลง และฟิล์มสูตร 4% CS-10% OSF และ 1% CS-10% OSF พบความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสที่สูง และมีความสามารถในการดึงยืดได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรในสูตรอื่น นอกจากนี้พบว่าปัจจัยในเรื่องลำดับในการดัดแปรและปริมาณของสารออกซิไดส์ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ชัดเจนในฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอน

5.1.10 จากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีสมบัติเชิงกล อันได้แก่ ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีค่าต่ำลง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถเกิดการย่อยสลายได้

5.1.11 ในการดัดแปรสองชั้นตอนสามารถปรับปรุงความชอบน้ำของฟิล์มแป้งได้และเพิ่มสมบัติเชิงกลในค่าของความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสที่สูงขึ้น และมีความสามารถในการดึงยืดได้มากขึ้นเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียว โดยผลจากปริมาณของสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันในแป้งดัดแปรสองชั้นตอนส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของฟิล์มมากที่สุด

5.1.12 จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มสูตร 4% CS-10% OSF เป็นสูตรที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสที่สูง และมีความสามารถในการดึงยืดได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตรอื่น อีกทั้งเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นและการบวมตัวที่มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ฟิล์มจากแป้งดัดแปรชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอนสูตรอื่นๆ และจากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินที่สามารถย่อยสลายได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่ทำเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังโดยการดัดแปรสองชั้นตอนด้วยการออกซิเดชันที่ปริมาณสารออกซิไดส์ที่แตกต่างกันและการเชื่อมโยงด้วยปริมาณสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ ดังนี้

5.2.1 ศึกษาการขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด (Compression molding) เพื่อลดปัญหาฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานและความหนาที่ไม่สม่ำเสมอจากวิธีการขึ้นรูปแบบเทหล่อ (Solution casting technique)

5.2.3 ศึกษาการดัดแปรแป้งด้วยความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment, HMT) เพื่อลดการตัดสายโซ่ของแป้งจากขั้นตอนการเชื่อมโยงแป้งที่มีกรดเป็นตัวเร่ง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของแป้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Pornsuksomboon, B.B. Holló, K.M. Szécsényi and K. Kaewtatip. “Properties of baked foams from citric acid modified cassava starch and native cassava blends”. *Carbohydrate polymers*. 136 (2016) 107-112.
- [2] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] Wurzburg, O.B. 1986. **Modified starches: properties and uses**. Florida : CRC Press.
- [4] Zhang, S.D. Zhang, Y.R. Wang, X.L. and Wang, Y.Z. 2009. “High carbonyl content oxidized starch prepared by hydrogen peroxide and its thermoplastic application” *Starch/Stärke*. 61 : 646–655.
- [5] Garavand, F. Rouhi, M. Razavi, S.H. Cacciotti, I. and Mohammadi, R. 2017. “Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 104 : 687-707.
- [6] Sun, F. Liu, J. Liu, X. Wang, Y. Li, K. Chang, J. and Yang, G. 2017. “Effect of the phytate and hydrogen peroxide chemical modifications on the physicochemical and functional properties of wheat starch.” *Food Research International*.
- [7] Sakshi, S. Sukhcharn, S. and Charanjit S. R. 2016. “Effect of oxidation, cross-linking and dual modification on physicochemical, crystallinity, morphological, pasting and thermal characteristics of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch.” *Food Hydrocolloids*. 55 : 56-64.
- [8] Xiao, H.X. Lin, Q.L. Liu, G.Q. and Yu, F.X. 2012. “A Comparative Study of the Characteristics of Cross-Linked, Oxidized and Dual-Modified Rice Starches.” *Molecules*. 17 : 10946-10957.
- [9] Tanetrungroj, Y. and Prachayawarakorn, J. 2018. “Effect of dual modification on properties of biodegradable crosslinked-oxidized starch and oxidized-crosslinked starch films.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 120 : 1240-1246.
- [10] Xiao, Z. Xie, Y. Militz, H. and Mai, C. 2010. “Effect of glutaraldehyde on water related properties of solid wood.” *Holzforschung*, 64(4) : 483-488.

- [11] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). 2550. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html. สืบค้นข้อมูลวันที่ 7 ธ.ค. 61.
- [12] Packaging industrial intelligence unit. 2550. **ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้**. [Online]. Available : https://packaging.oie.go.th/new/admin_control/file_technology/5430267189.pdf. สืบค้นข้อมูลวันที่ 7 ธ.ค. 61.
- [13] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2553. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [14] European bioplastics. 2017. **PLA in the waste stream**. [Online]. Available : <https://www.european-bioplastics.org/pla-in-the-waste-stream/>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 7 ธ.ค. 61.
- [15] Ashter, S.A. 2016. “9-Commercial applications of bioplastics.” *Plastics Design Library*. : 227-249.
- [16] พรอนงค์ อร่ามวิทย์. 2559. **ความมหัศจรรย์ของวัสดุ**. นนทบุรี : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [17] Tomasik, P. 2003. **Chemical and Functional Properties of Food Saccharides**. London : CRC Press.
- [18] Preiss, J. 1980. **The Biochemistry of Plants : Carbohydrates: Structure and Function**. 3. Cambridge : Academic press.
- [19] Bertolini, A.C. 2009. **Starches: Characterization, Properties, and Applications**. London : CRC Press.
- [20] ทศนัย อรรถพรพิทักษ์. 2546. “สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชทำวยายม่อม *Tacca leontopetaloides Ktze.*” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] Vaclavik, V.A. and Christian, E.W. 2008. **Essentials of Food Science**. New York : Springe science+Business media.
- [22] นรศิษฐ์ จันทรกุล. 2547. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [23] อนงค์ เจษฎาญาณเมธา. 2534. “แป้งมันสำปะหลังดัดแปร : การแทนที่และการเชื่อมขวาง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [24] สุนันทา ทองทา และธนาวิทย์ กุศลรัตนรักษ์. 2556. “การผลิตสตาร์ชซีเตรททนย่อยต่อเอนไซม์” โครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณพ.ศ. 2555-2556, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [25] Kumoro, A.C. Ratnawati, R. and Retnowati, D.S. 2015. “A simplified kinetics model of natural and iron complex catalysed hydrogen peroxide oxidation of starch.” *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 10(5) : 648–658.
- [26] มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. 2558. “**Polymer chemistry.**” กรุงเทพฯ : เอกสารอัดสำเนา.
- [27] BeMiller, J.N. and Whistler, R.L. 2009. **Starch: Chemistry and Technology.** Burlington : Academic press.
- [28] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2561. **การใช้และการแปรรูปแป้งมันสำปะหลัง.** [online]. Available : <http://www.thailandtapiocastarch.net/download/download-th-17.pdf>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 4 ธ.ค. 61.
- [29] Hoover, R. 2001. “Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review.” *Carbohydrate Polymers*. 45 : 253-267.
- [30] Moore, B. 2013. **Hydrogen Peroxide Health Benefits and Uses.** Newark : Speedy Publishing LLC.
- [31] Dias, A.R.G. Zavareze, E.R. Helbig, E. Moura, F.A. Vargas, C.G. and Ciacco, C.F. 2011. “Oxidation of fermented cassava starch using hydrogen peroxide.” *Carbohydrate Polymers*. 86 : 185–191.
- [32] Chem-supply. 2017. **Hydrogen peroxide.** [online]. Available : <https://www.chemsupply.com.au/documents/HL0011CH35.pdf>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 4 ธ.ค. 61.
- [33] กรมควบคุมมลพิษ. 2001. **Hydrogen peroxide.** [online]. Available : <http://www.ppi.co.th/pdf/H2O2.pdf>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 4 ธ.ค. 61.
- [34] Gönenc, İ. and Us, F. 2018. “Effect of glutaraldehyde crosslinking on degree of substitution, thermal, structural and physicochemical properties of corn starch.” *Starch/Stärke*. 1-33.

- [35] Bicchemical. 2559. **Glutaraldehyde.** [Online]. Available : <http://www.bicchemical.com/index.php?view=article&catid=1%3Anews&id=1>
1. สืบค้นข้อมูลวันที่ 10 พ.ย. 62.
- [36] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2559. **Glutaraldehyde.** [Online]. Available : <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=2332>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 10 พ.ย. 62.
- [37] Carmona-Garcia, R. Aguirre-Cruz, A. Yee-Madeira, H. and Bello-Pérez, L.A. 2009. “Dual Modification of Banana Starch: Partial Characterization.” *Starch/Stärke*. 61 : 656–664.
- [38] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2546. **เคมีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 23(2) : 141-142.
- [40] Gandini, A. and Lacerda, T.M. 2016. “Polymers From Renewable Resources.” *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 1–42.
- [41] Chemical Safety Data: Glycerol. 2018. **Glycerol.** [online]. Available : https://www.oneidaboces.org/cms/lib/NY01914080/Centricity/Domain/65/ChemicalSafetyData_Glycerol_All.pdf. สืบค้นข้อมูลวันที่ 4 ธ.ค. 61.
- [42] Liu, J. Wang, B. Lin, L. Zhang, J. Liu, W. Xie, J. and Ding, Y. 2014. “Functional, physicochemical properties and structure of cross-linked oxidized maize starch.” *Food Hydrocolloids*. 36 : 45-52.
- [43] B, Han. 2016. “Properties of oxidized starch prepared by hydrogen peroxide, chlorine dioxide and sodium hypochlorite.” *International Conference on Biomedical and Biological Engineering*. 447-451.
- [44] Sangseethong, K. Termvejsayanon, N. and Sriroth, K. 2010. “Characterization of physicochemical properties of hypochlorite- and peroxide-oxidized cassava starches.” *Carbohydrate Polymers*. 82 : 446–453.
- [45] Olsson, E. Menzel, C. Johansson, C. Andersson, R. Koch, K. and Järnström, L. 2013. “The effect of pH on hydrolysis, cross-linking and barrier properties of starch barriers containing citric acid.” *Carbohydrate Polymers*. 98 : 1505–1513.

- [46] Menzel, C. Olsson, E. Plivelic, T.S. Andersson, R. Johansson, C. Kuktaite, R. Järnström, L. and Koch, K. 2013. "Molecular structure of citric acid cross-linked starch films." *Carbohydrate Polymers*. 96 : 270–276.
- [47] Tolvanen, P. Sorokin, A. Maki-Arvela, P. Leveneur, S. Murzin, D.Y. and Salmi, T. 2011. "Batch and semibatch partial oxidation of starch by hydrogen peroxide in the presence of an iron tetrasulfophthalocyanine catalyst: the effect of ultrasound and the catalyst addition policy." *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50(2) : 749–757.
- [48] Yeh, J. Hou, Y. Cheng, L. Wang, Y.Z. Yang, L. and Wang, C. 2015. "Water proof and strength retention properties of thermoplastic starch based biocomposites modified with glutaraldehyde." *Carbohydrate Polymers*. 127 : 135-144.
- [49] อัจจิมา สุทธิชูจิต. 2560. "ผลของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [50] Wing, R.E. and Willett, J.L. 1997. "Water soluble oxidized starches by peroxide reactive extrusion." *Industrial Crops and Products*. 7 : 45-52.
- [51] Kuakpetoon, D. and Wang, Y.J. 2001. "Characterization of Different Starches Oxidized by Hypochlorite." *Starch/Stärke*. 53 : 211-218.
- [52] Soto, D. Urdaneta, J. and Pernia, K. 2014. "Characterization of native and modified starches by potentiometric titration." *Journal of Applied Chemistry*. 1-9.
- [53] Kaur, L. Singh, J. N. and Singh, N. "Effect of cross-linking on some properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) starches." *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86 : 1945 –1954.
- [54] Sherma, J. 2008. "Principles of Gel Permeation Chromatography". *Journal of AOAC International*. 91(4) : 113A-118A.
- [55] Detduangchan, N. Sridach, W. and Wittaya, T. 2014. "Enhancement of the Properties of Biodegradable Rice Starch Films by Using Chemical Crosslinking Agents." *International Food Research Journal*. 21(3) : 1225-1235.

- [56] Sukhija, S. Singh, S. and Riar, C.S. 2017. "Molecular Characteristics of Oxidized and Cross-linked Lotus (*Nelumbo Nucifera*) Rhizome Starch." *International Journal of Food Properties*. 20(1) : S1065-S1081.
- [57] Fonseca, L.M. Gonçalves, J.R. El Halal, S.L.M. Pinto, V.Z. Dias, A.R.G. Jacques, A.C. and Zavareze, E.R. 2015. "Oxidation of Potato Starch With Different Sodium Hypochlorite Concentrations and Its Effect on Biodegradable Films." *LWT - Food Science and Technology*. 60 : 714-720.
- [58] Zamudio-Flores, P.B. Vargas-Torres, A. Pérez-González, J. Bosquez-Molina, E. and Bello-Pérez, L.A. 2006. "Films Prepared with Oxidized Banana Starch: Mechanical and Barrier Properties." *Starch/Stärke*. 58(6) : 274-282.
- [59] Tanetrungroj, Y. 2019. "Properties of biodegradable dually modified cassava starch films from cross-linking and oxidation." Ph.D. Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [60] Sechi, N.S.M. and Marques, P.T. 2017. "Preparation and Physicochemical, Structural and Morphological Characterization of Phosphorylated Starch." *Materials Research*. 20(2) : 174-180.
- [61] Sukhija, S. Singh, S and Charanjit, S.R. 2018. "Development and characterization of biodegradable films from whey protein concentrate, psyllium husk and oxidized, crosslinked, dual-modified lotus rhizome starch composite." *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 99 : 3398-3409.
- [62] Usman, A.H. Salisu, A.A. Musa, H. Abba, H. and Kogo, A.A. 2013. "Preparation and Characterization of Dialdehyde Starch Urea (DASU) and, Its Sorption Potential for Co(ii), Pb(ii) and Zn(ii) Ions from Aqueous Solution." *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 5(5) : 153-158.
- [63] Wongsagonsup, R. Pujchakarn, T. Jitrakbumrung, S. Chaiwat, W. Fuongfuchat, A. Varavinit, S. and Suphantharika, M. 2014. "Effect of cross-linking on physicochemical properties of tapioca starch and its application in soup product." *Carbohydrate Polymers*. 101 : 656-665.
- [64] Zhang, Y.R. Wang, X.L. Zhao, G.-M. and Wang, Y.Z. 2012. "Preparation and properties of oxidized starch with high degree of oxidation." *Carbohydrate Polymers*. 87(4) : 2554-2562.

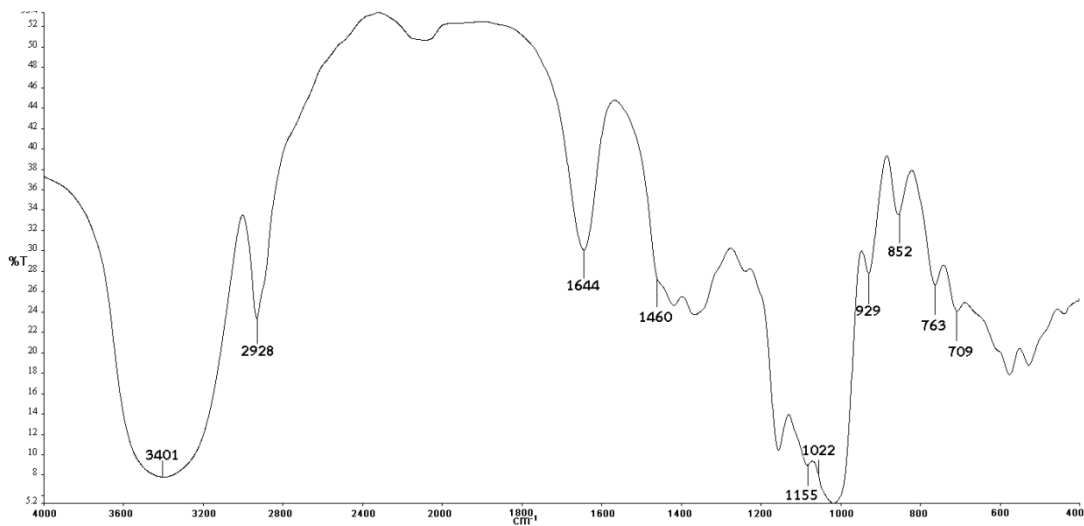
- [65] Ma, X. Chang, P.R. Yu, J. and Stumborg, M. 2009. "Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites." *Carbohydrate Polymers*. 75(1) : 1-8.
- [66] Wongsagonupa, R. Pujchakarn, T. Jitrakbumrung, S. Chaiwat, W. Fuongfuchat, A. Varavinit, S. Dangtipe, S. and Suphantharika, M. 2014. "Effect of Cross-Linking on Physicochemical Properties of Tapioca Starch and Its Application in Soup Product." *Carbohydrate Polymers*. 101 : 656-665.
- [67] Stephen, A.M. Phillips, G.O. and Williams, P.A. 2006. **Food Polysaccharides and Their Applications**. 2nd ed. New York: Taylor and Francis, CRC Press.
- [68] Colivet, J. and Carvalho, R.A. 2017. "Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically modified cassava starch films." *Industrial Crops and Products*. 95 : 599-607.
- [69] ยศธร ธเนสรุ่งโรจน์. 2557. "ผลของชนิดแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ." วิทยาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [70] Tapia, M.S. Perez, E. Rodriguez, P.E. Guzman, R. Collin, M.N.D. Tran, T. and Rolland-Sabate, A. 2012. "Some Properties of Starch and Starch Edible Films from Under-Utilized Roots and Tubers from the Venezuelan Amazons." *Journal of Cellular Plastics*. 48 : 526-544.
- [71] Koo, S.H. Lee, K.Y. and Lee, H.G. 2010. "Effect of Cross-linking on the Physicochemical and Physiological Properties of Corn Starch." *Food Hydrocolloids*. 24(6-7) : 619-625.
- [72] ปรรธนา คำใส. 2559. "ฟิล์มผสมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไดอัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลัง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [73] ศศิกร ภูมิแก้ว. 2562. "ผลของเทคนิคต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [74] Zavareze, E.R. Pinto, V.Z. Klein, B. El Halal, S.L.M. Elias, M.C. Prentice-Hernández, C. and Dias, A.R.G. 2012. "Development of oxidised and heat-moisture treated potato starch film." *Food Chemistry*. 132(1) : 344-350.

- [75] Obasi, H.C. Onuoha, F.N. Eze, I.O. Nwanonenyi, S.C. Arukalam I.O. and Uzoma, P.C. 2013. "Effect of Soil Burial on Properties of Polypropylene (PP)/Plasticized Potato Starch (PPS) Blends." *The International Journal of Engineering and Science*. 2 : 14–18.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

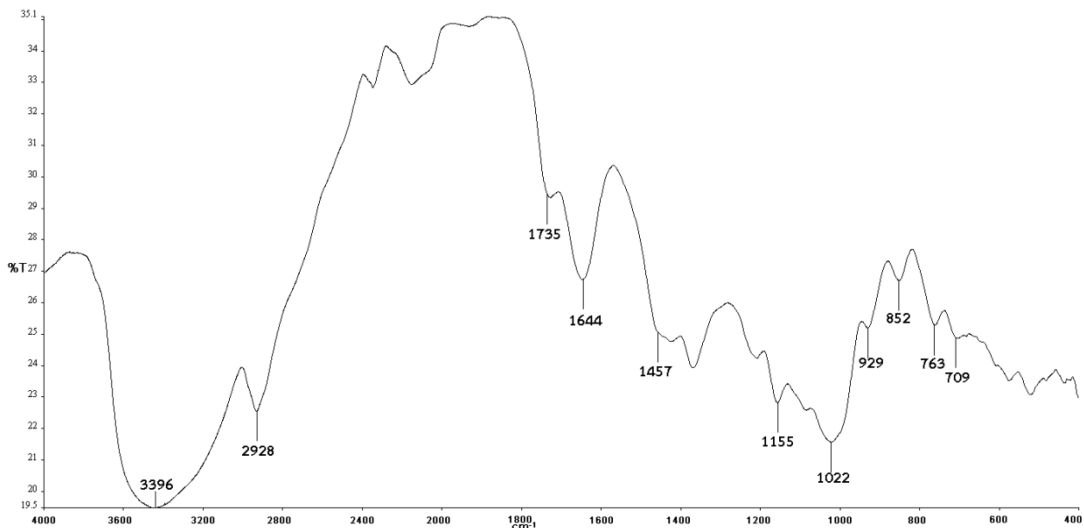
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)



รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรรูป



รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 5% OS



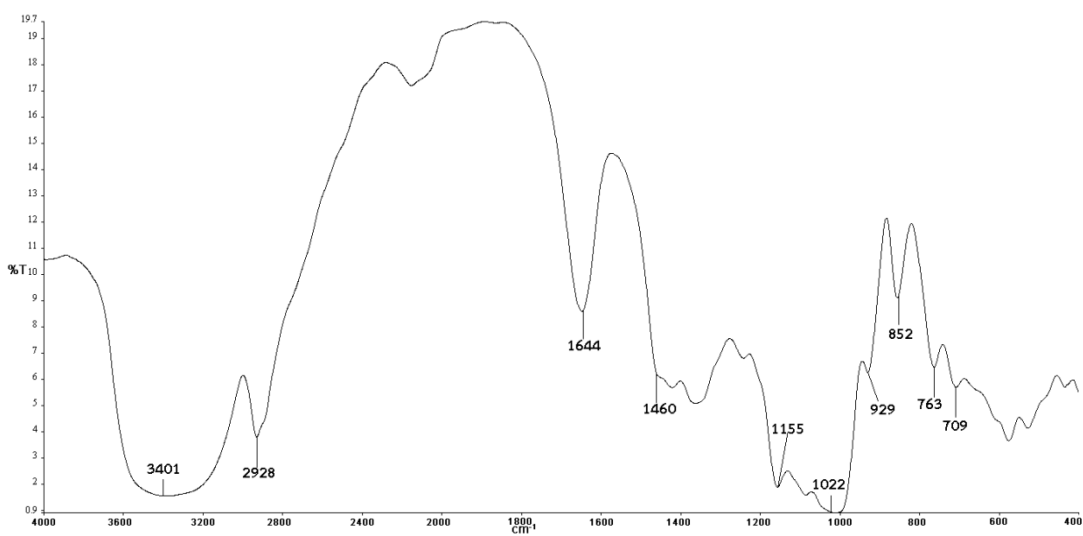
รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS



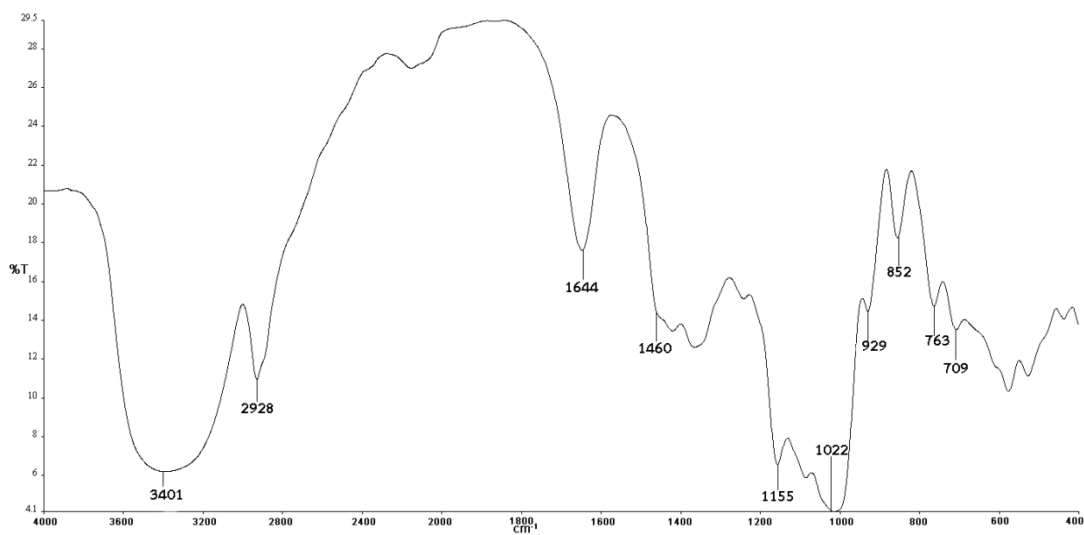
รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 20% OS



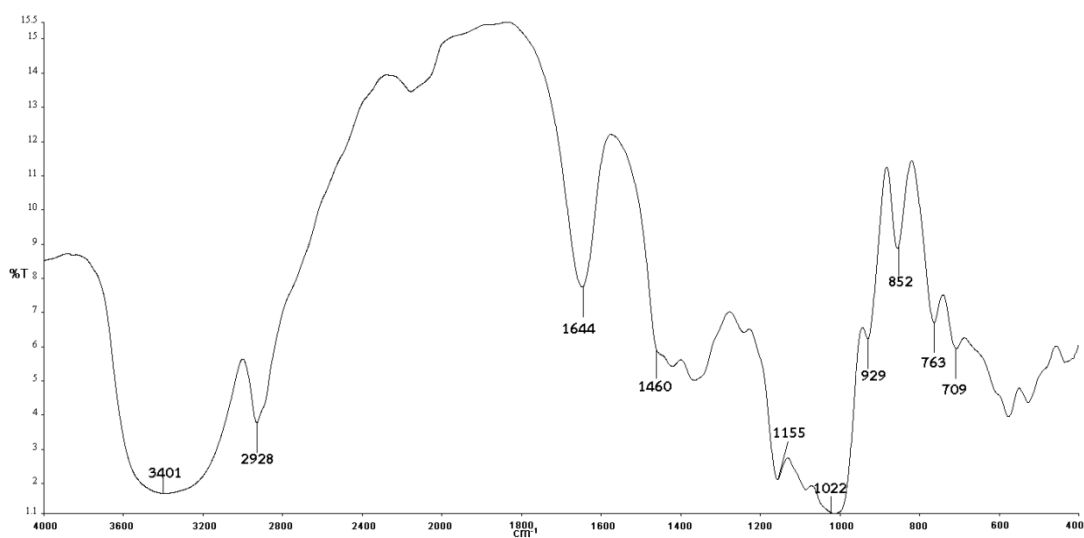
รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS



รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 2% CS



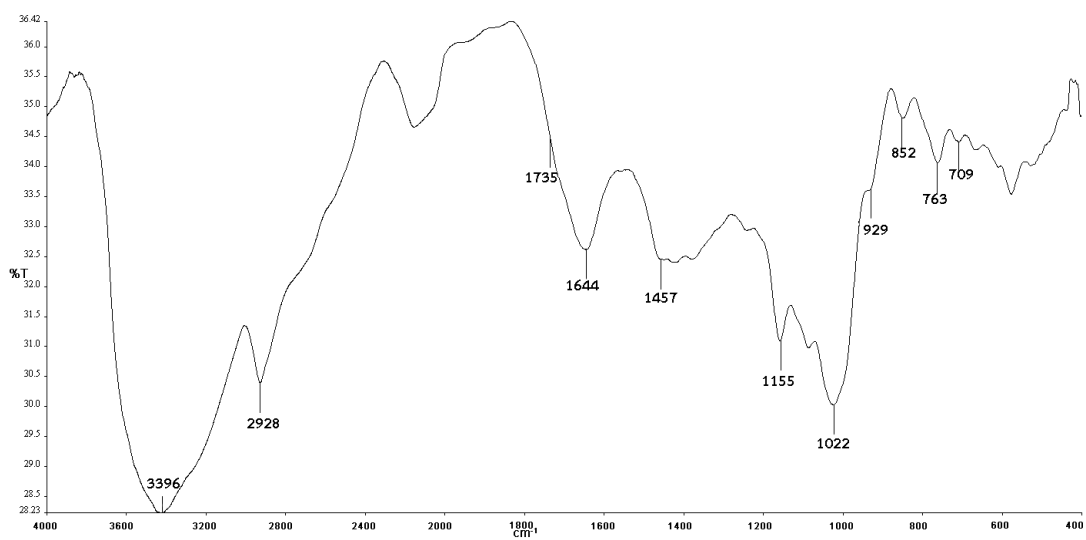
รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 3% CS



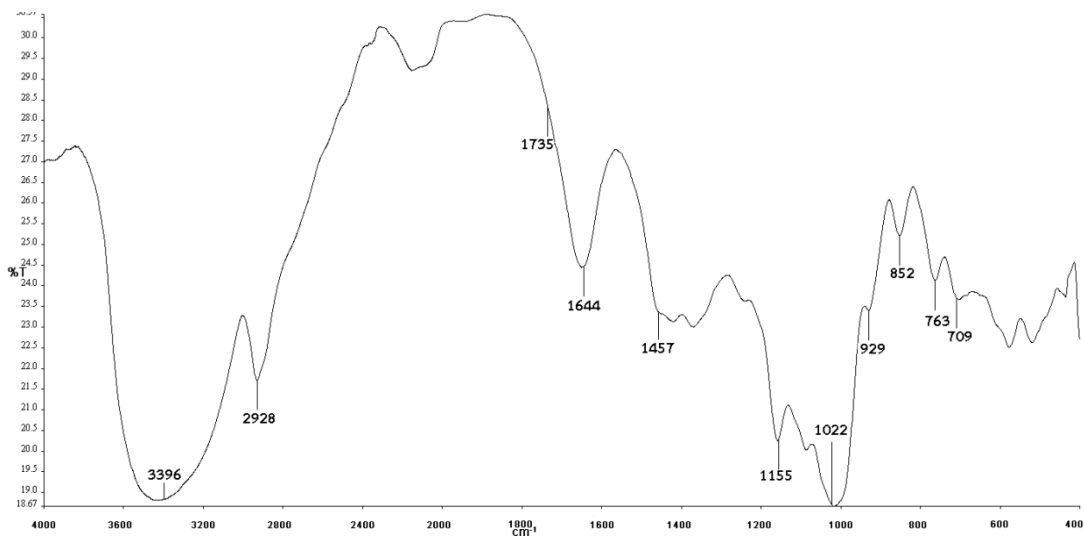
รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 4% CS



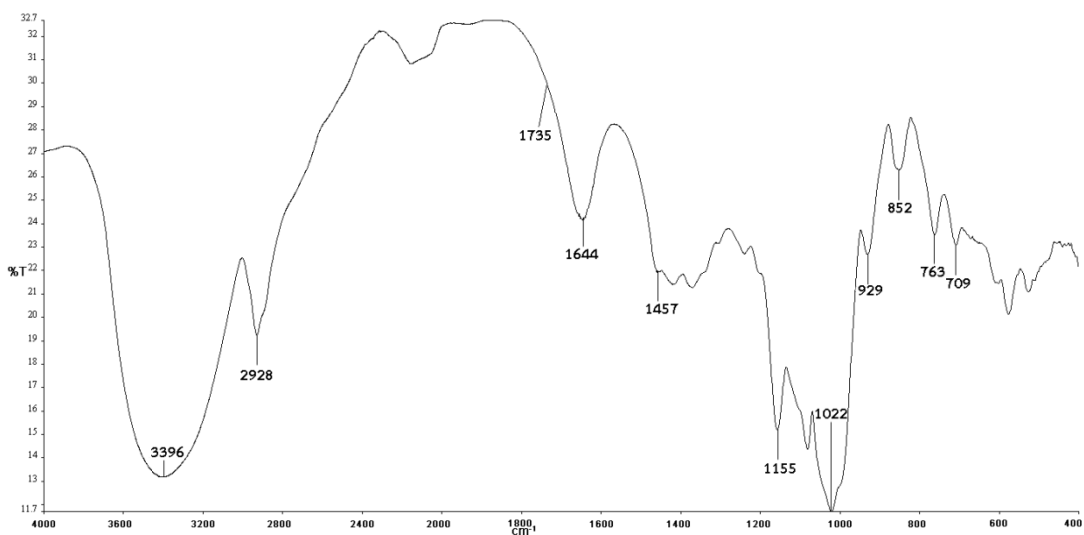
รูปที่ ก.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS-1% CS



รูปที่ ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 10% OS-4% CS



รูปที่ ก.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 20% OS-1% CS



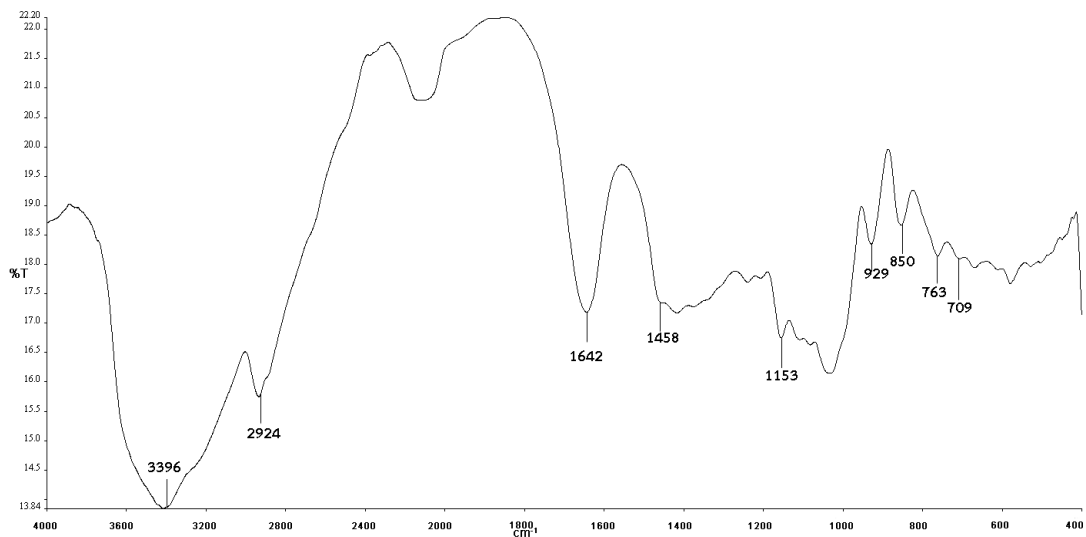
รูปที่ ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS-10% OS



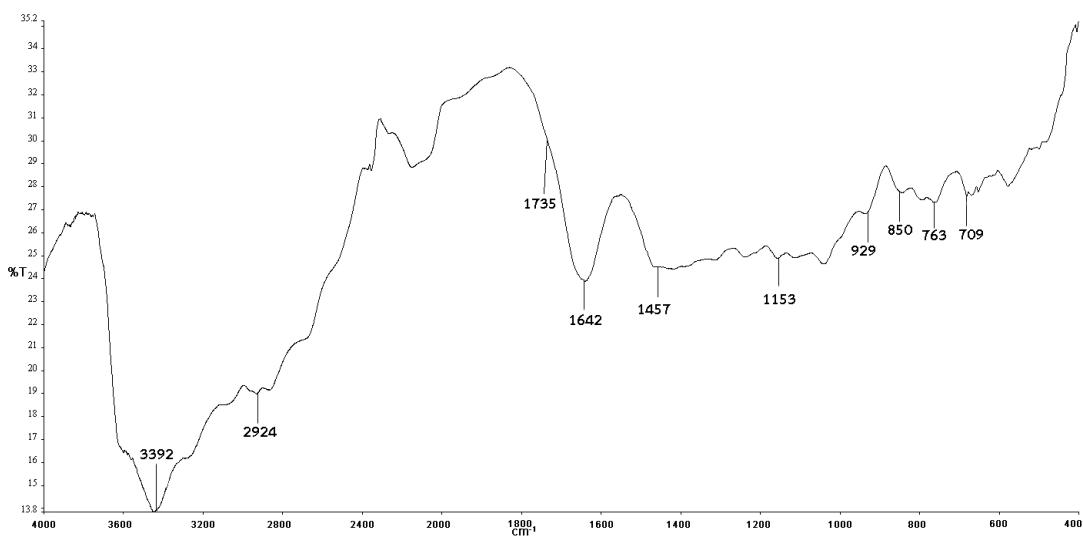
รูปที่ ก.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 1% CS-20% OS



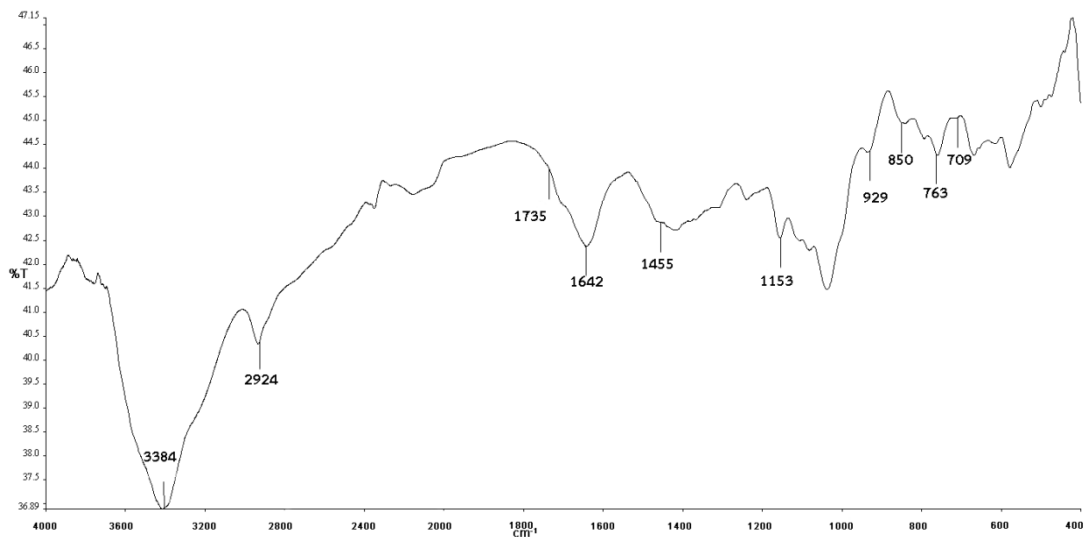
รูปที่ ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสูตร 4% CS-10% OS



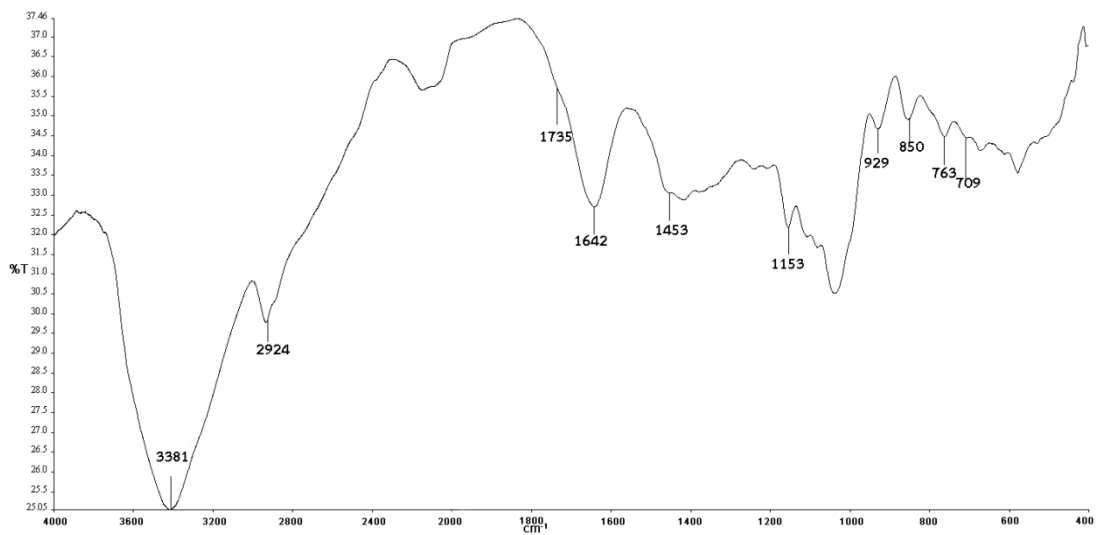
รูปที่ ก.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปรร



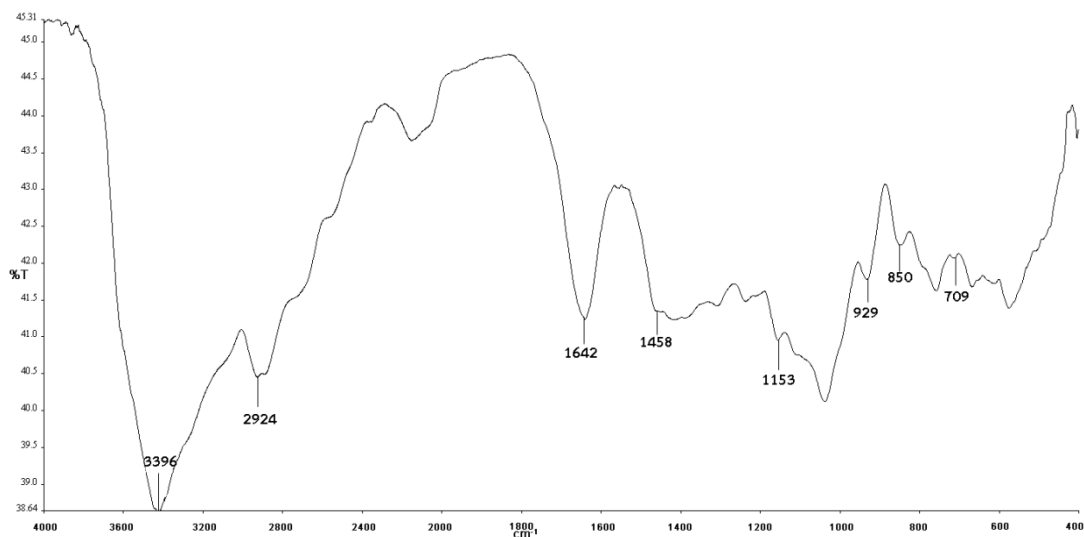
รูปที่ ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 5% OSF



รูปที่ ก.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 10% OSF



รูปที่ ก.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 20% OSF



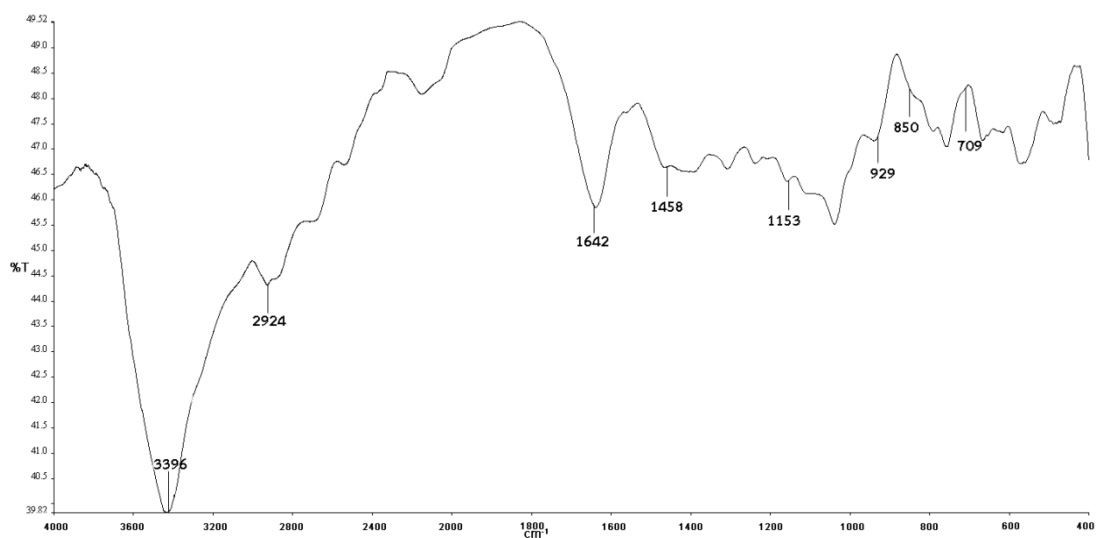
รูปที่ ก.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 1% CSF



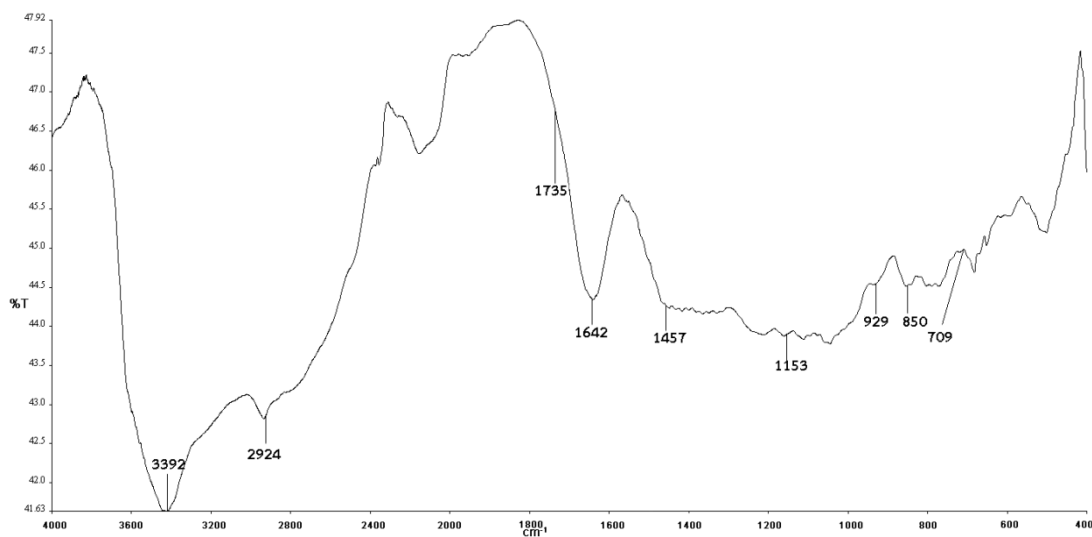
รูปที่ ก.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 2% CSF



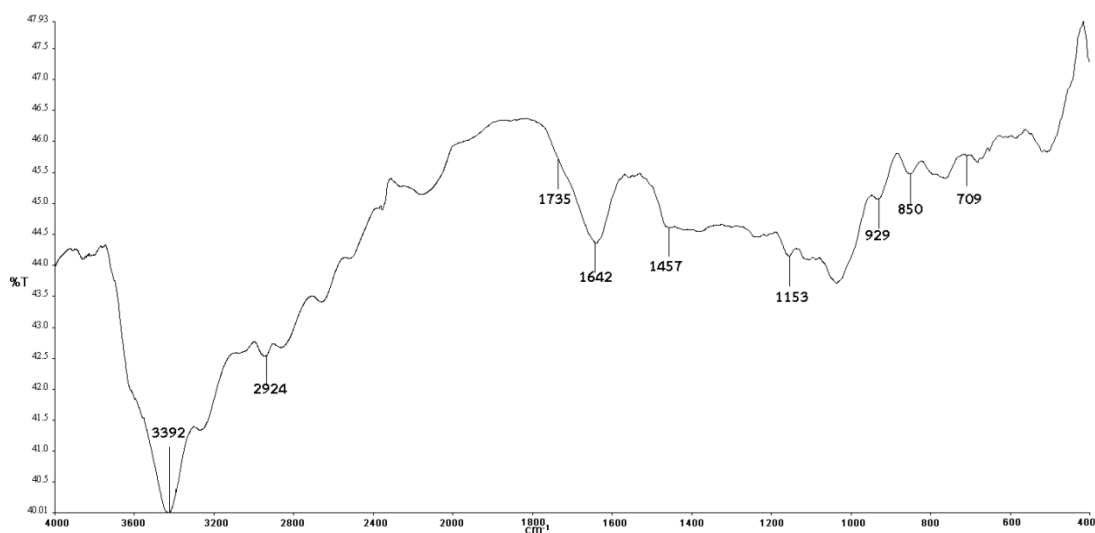
รูปที่ ก.21 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 3% CSF



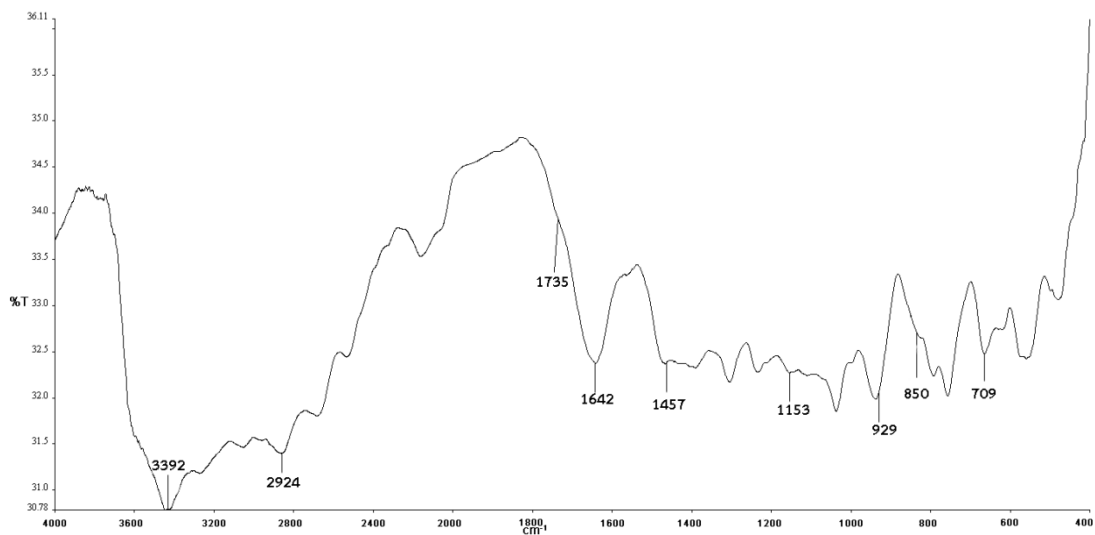
รูปที่ ก.22 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 4% CSF



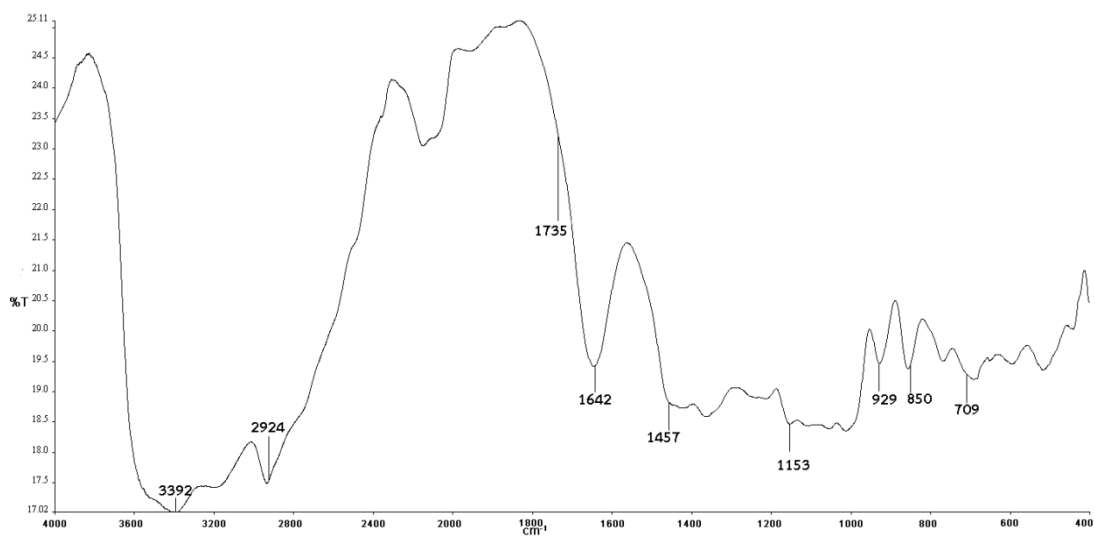
รูปที่ ก.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF



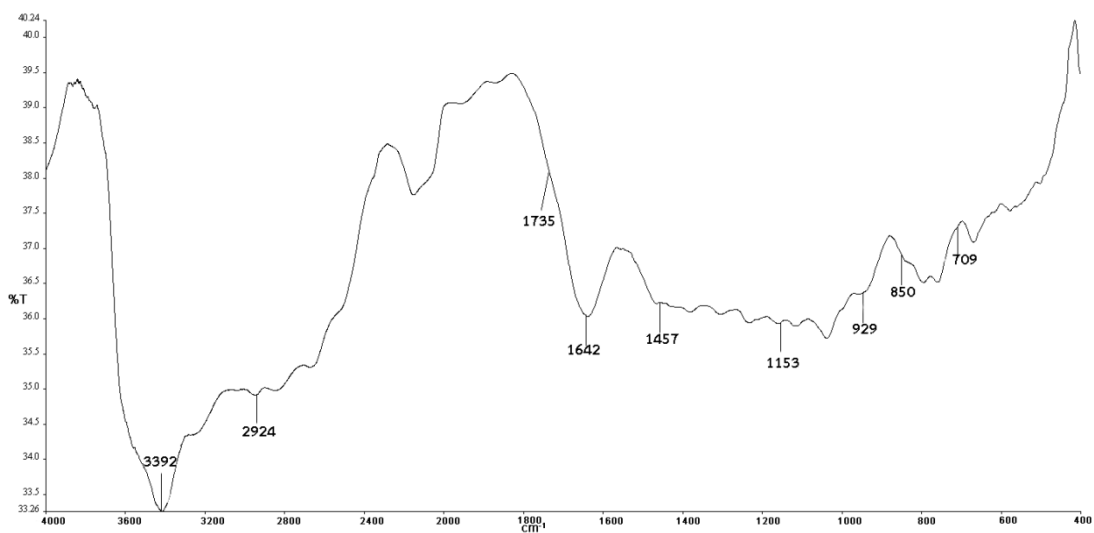
รูปที่ ก.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF



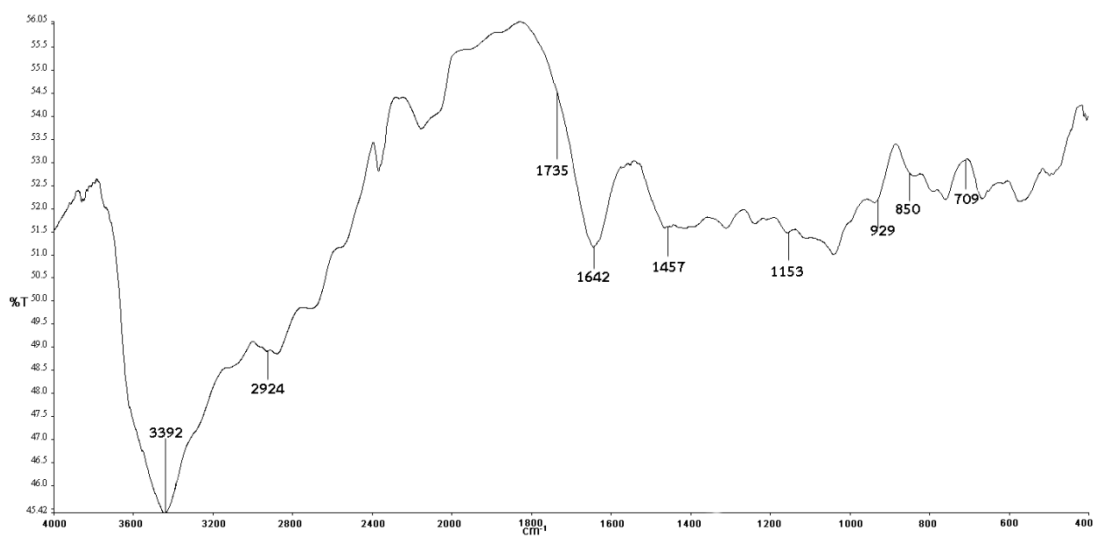
รูปที่ ก.25 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF



รูปที่ ก.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF



รูปที่ ก.27 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอสนสูตร 1% CS-20% OSF



รูปที่ ก.28 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอสนสูตร 4% CS-10% OSF

ภาคผนวก ข

การทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Averaged molecular weight)

วิธีการคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจากการวัดความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity) ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืด (Ubbelohde Viscometer) โดยใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) เป็นตัวทำละลายแ่ง ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแ่ง ดังต่อไปนี้

1. หลังจากนำแ่งสูตรต่างๆ มาละลายในตัวทำละลาย โดยมีสารละลายแ่งที่ความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.03 %w/v และทำการคำนวณหาความหนาแน่นของสารละลายแ่งและตัวทำละลายโดยใช้ขวดพิคโน ซึ่งในที่นี้ขอยกตัวอย่างการคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในสูตร NS โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ในการหาความหนาแน่นของสารละลาย ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.1

$$\text{ปริมาตรของขวดพิคโน (ml)} = \frac{\text{น้ำหนักขวดพิคโนที่ใส่น้ำกลั่น} - \text{น้ำหนักขวดพิคโนเปล่า}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิที่ทำการทดลอง}}$$

$$\text{ความหนาแน่นของสารละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักสารละลายแ่ง}}{\text{ปริมาตรของขวดพิคโน}}$$

ตารางที่ ข.1 ปริมาตรของขวดพิคโนและความหนาแน่นของสารละลาย

ปริมาตรของขวดพิคโน (ml)	9.8913
ความหนาแน่นของ DMSO (g/ml)	1.1061
ความหนาแน่นของ NS 0.01% w/v (g/ml)	1.1002
ความหนาแน่นของ NS 0.02% w/v (g/ml)	1.1073
ความหนาแน่นของ NS 0.03% w/v (g/ml)	1.1105

2. ทำการทดสอบวัดความหนืดสูตร NS และตัวทำละลาย DMSO โดยเครื่องวัดความหนืด ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง แต่ในกรณีนี้ขอยกตัวอย่างการคำนวณเพียงครั้งเดียว ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 เวลาในการทดสอบความหนืดของสารละลาย

สูตรของสารละลาย	เวลาที่วัดได้ (s)
DMSO	68.67
NS 0.01% w/v	651.00
NS 0.02% w/v	2230.00
NS 0.02% w/v	4860.00

3. หาความหนืดสัมพัทธ์ (η_r) ของสารละลาย จากสมการ

$$\eta_r = \frac{\rho_c t_c}{\rho_0 t_0}$$

- เมื่อ ρ_c คือ ความหนาแน่นของสารละลาย
 ρ_0 คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย
 t_c คือ เวลาที่สารละลายไหลผ่านท่อของเครื่องวัด
 t_0 คือ เวลาที่ตัวทำละลายไหลผ่านท่อของเครื่องวัด

จากตัวอย่าง NS ที่ยกตัวอย่าง มีค่าความหนืดสัมพัทธ์ แสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ความหนืดสัมพัทธ์ของสารละลาย

สูตรของสารละลาย	η_r
NS 0.01% w/v	9.4301
NS 0.02% w/v	32.5131
NS 0.02% w/v	71.0620

4. หาความหนืดจำเพาะ (η_{sp}) ของสารละลาย และค่า η_{sp}/C (ความเข้มข้นของสารละลาย
 แบ่ง) จากสมการต่อไปนี้

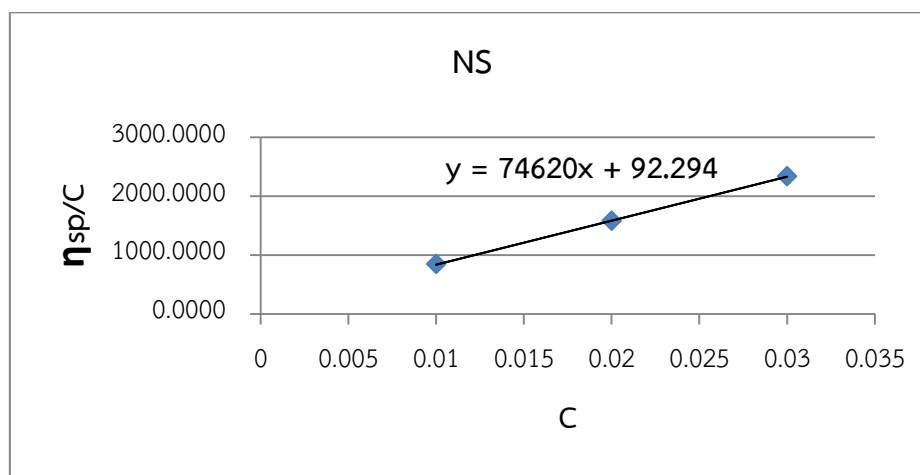
$$\eta_{sp} = \eta_r - 1$$

จากตัวอย่าง NS ที่ยกตัวอย่าง มีค่าความหนืดจำเพาะ และค่า η_{sp}/C แสดงดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 ความหนืดจำเพาะของสารละลายและค่า η_{sp}/C ของสารละลาย

สูตรของสารละลาย	η_{sp}	η_{sp}/C
NS 0.01% w/v	8.4301	843.0062
NS 0.02% w/v	31.5131	1575.6565
NS 0.03% w/v	70.0620	2335.3998

5. คำนวณหาความหนืดภายใน $[\eta]$ จากการพลอตกราฟระหว่าง η_{sp} และ C (ความเข้มข้น) และต่อกราฟไปที่ C=0



รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{sp} และ C

จากรูปที่ ข.1 ให้ $x=0$ ดังนั้นค่า y ที่เท่ากับความหนืดภายในของสูตร NS เท่ากับ 92.2940 mL/g

6. จากนั้นนำความหนืดภายในมาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ตามสมการของ Mark Houwink

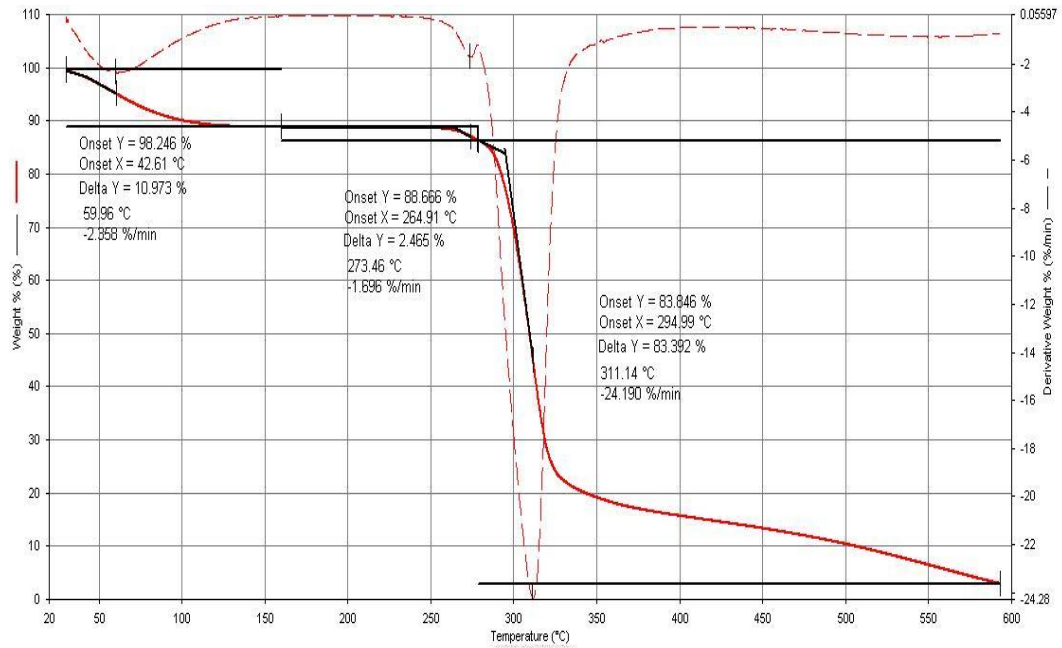
$$[\eta] = KM^a$$

เมื่อ	$[\eta]$	คือ ความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity)
	K	คือ ค่าคงที่ มีค่า 8.5×10^{-3} mL/g
	A	คือ ค่าคงที่ มีค่า 0.76
	M	คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

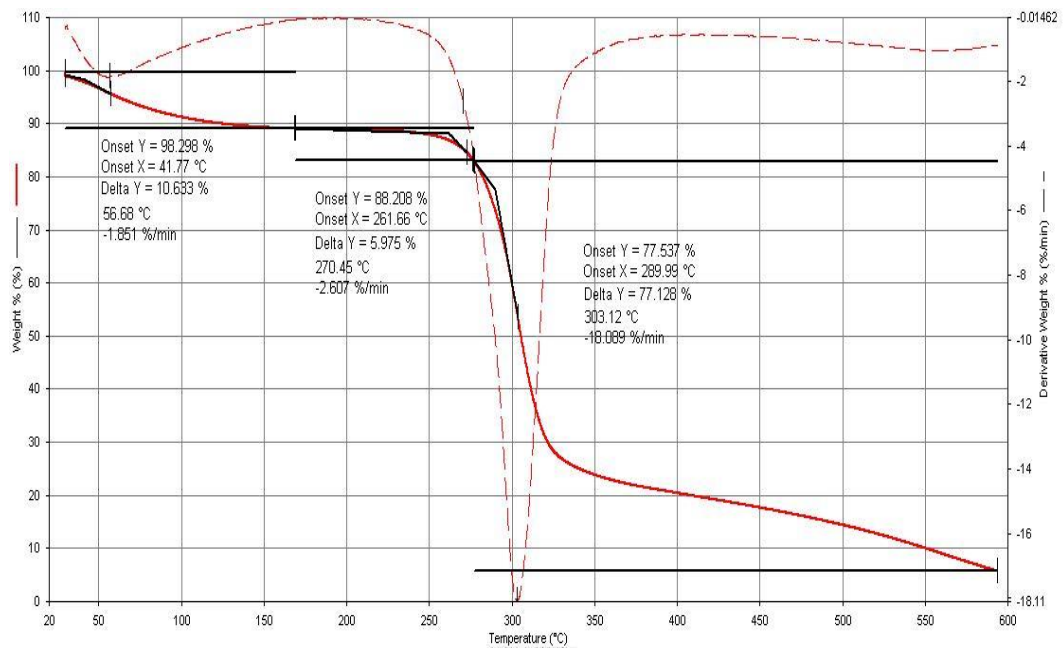
จากการคำนวณ พบว่าสูตร NS มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เท่ากับ 204,269.5 g/mol

ภาคผนวก ค

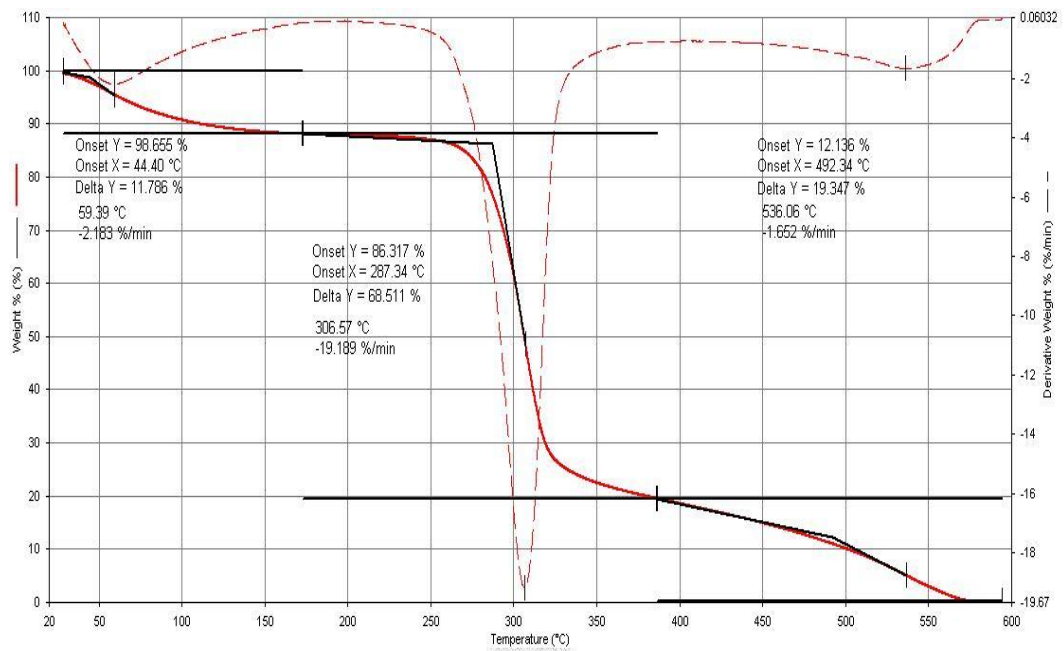
สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)



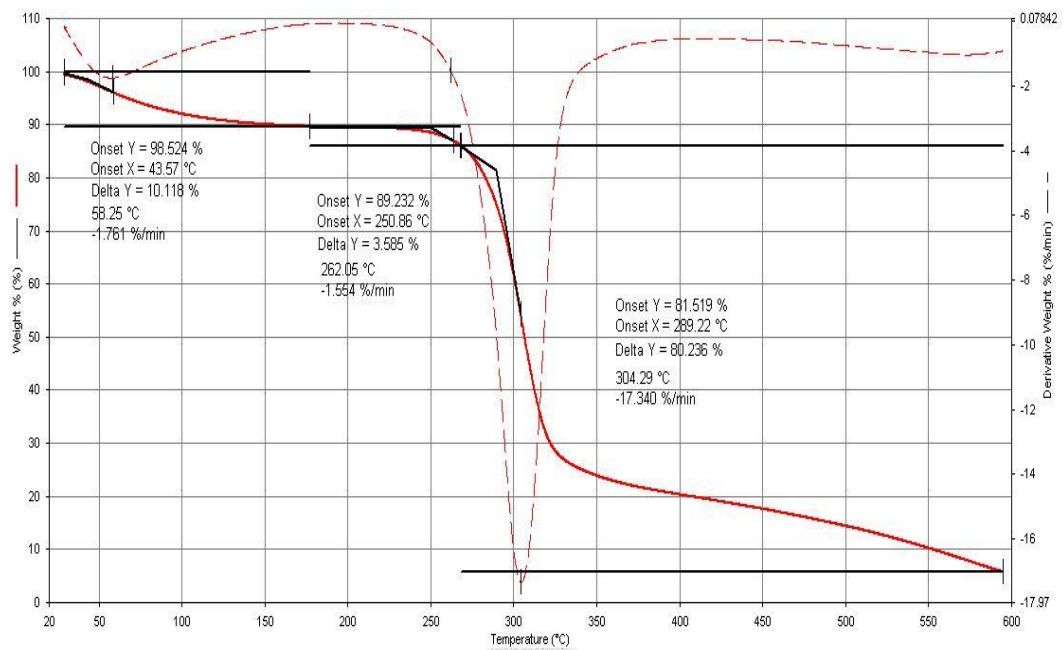
รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร



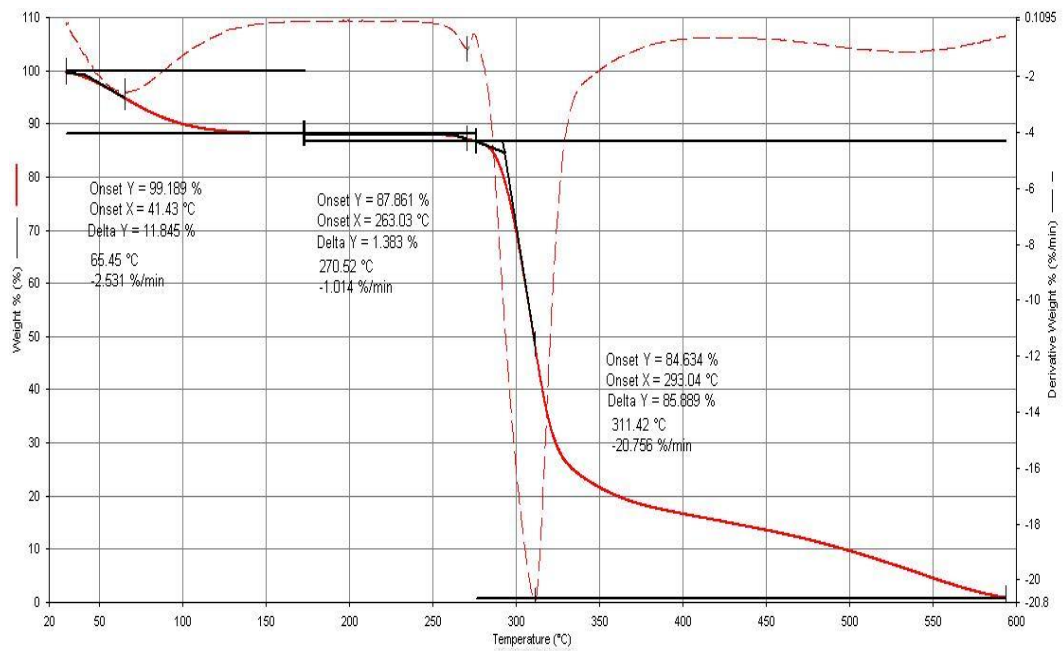
รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 5% OS



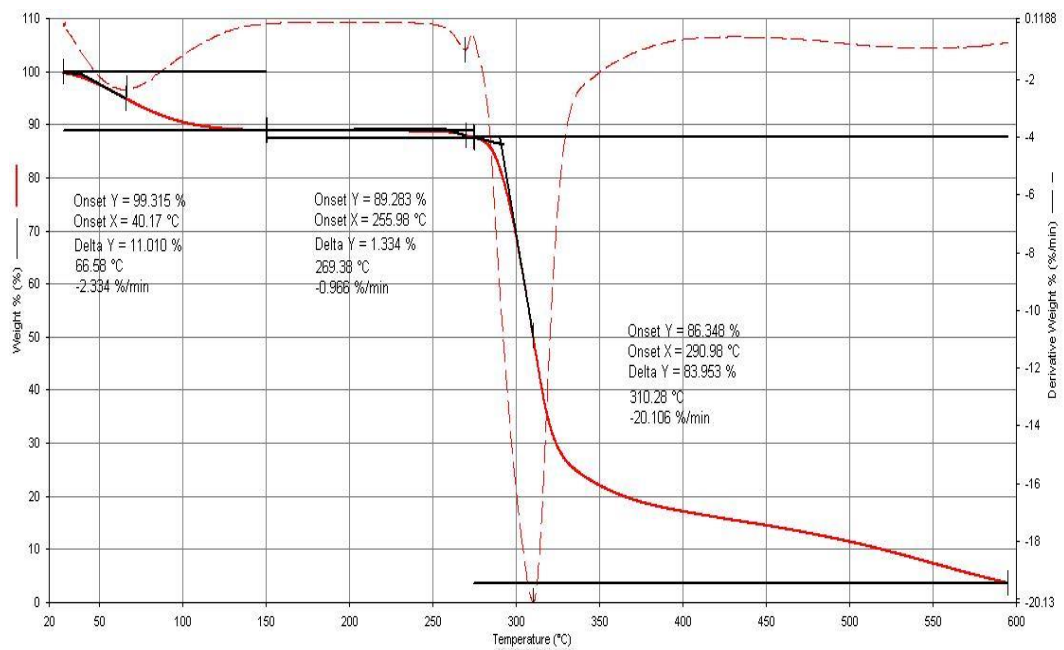
รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS



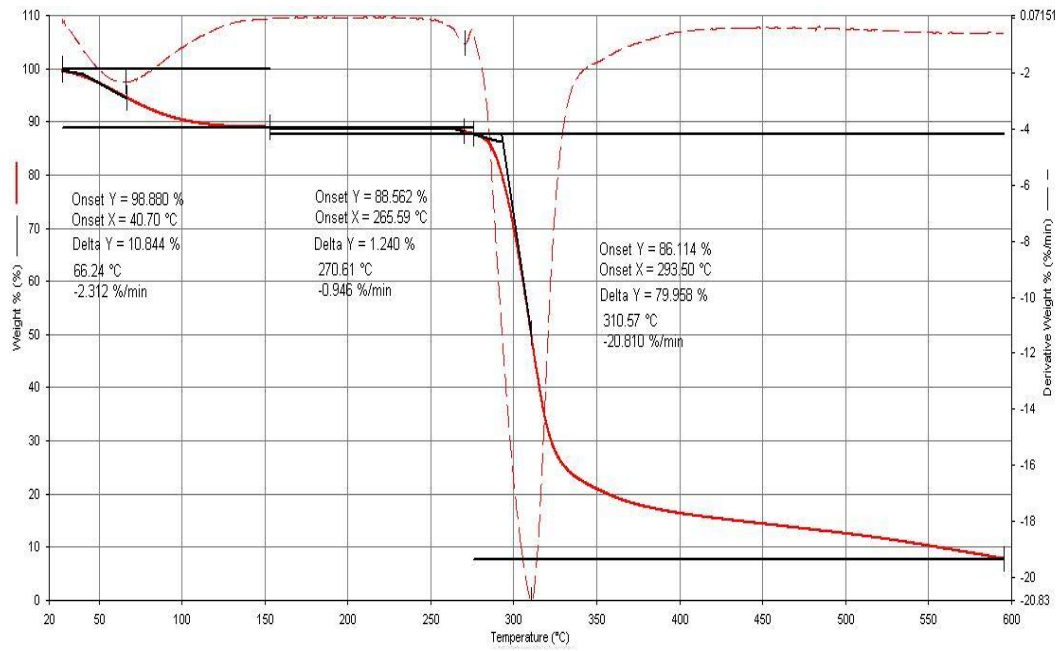
รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 20% OS



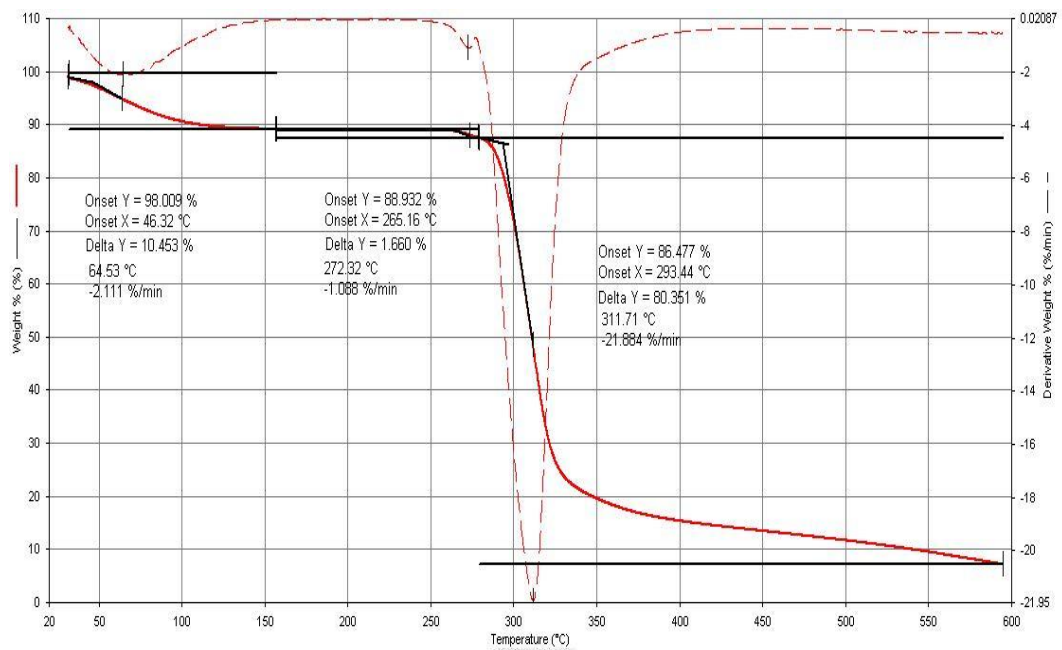
รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS



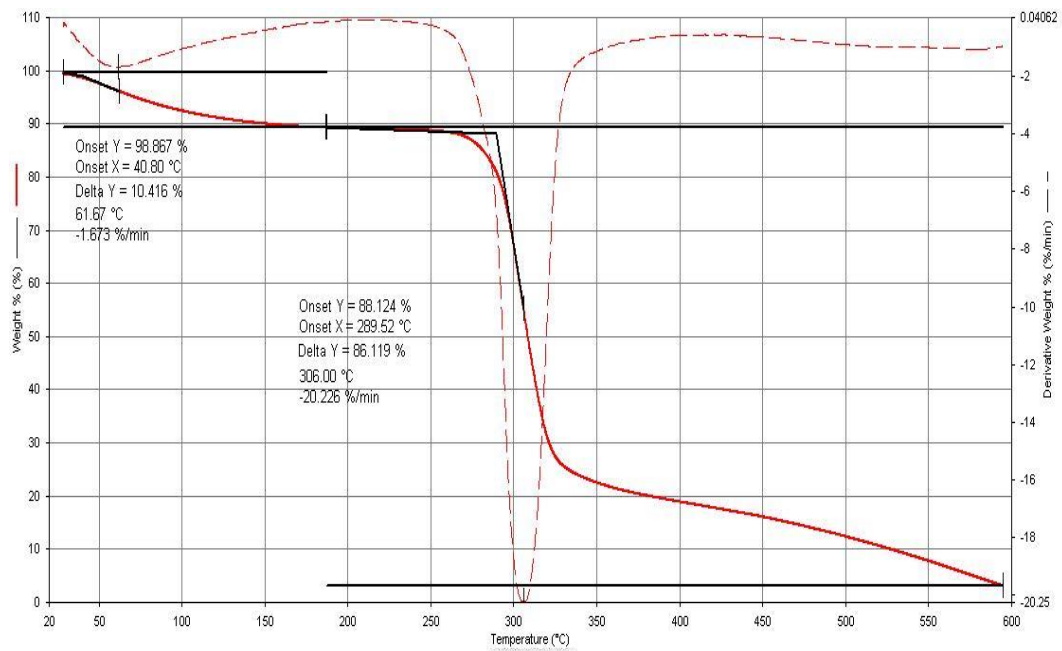
รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 2% CS



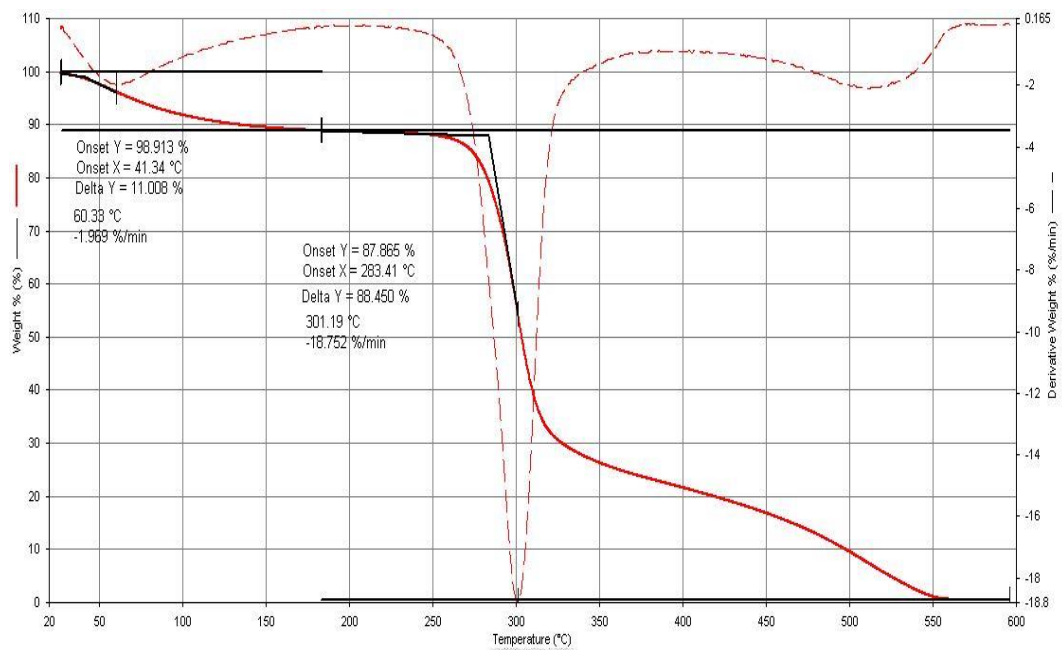
รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 3% CS



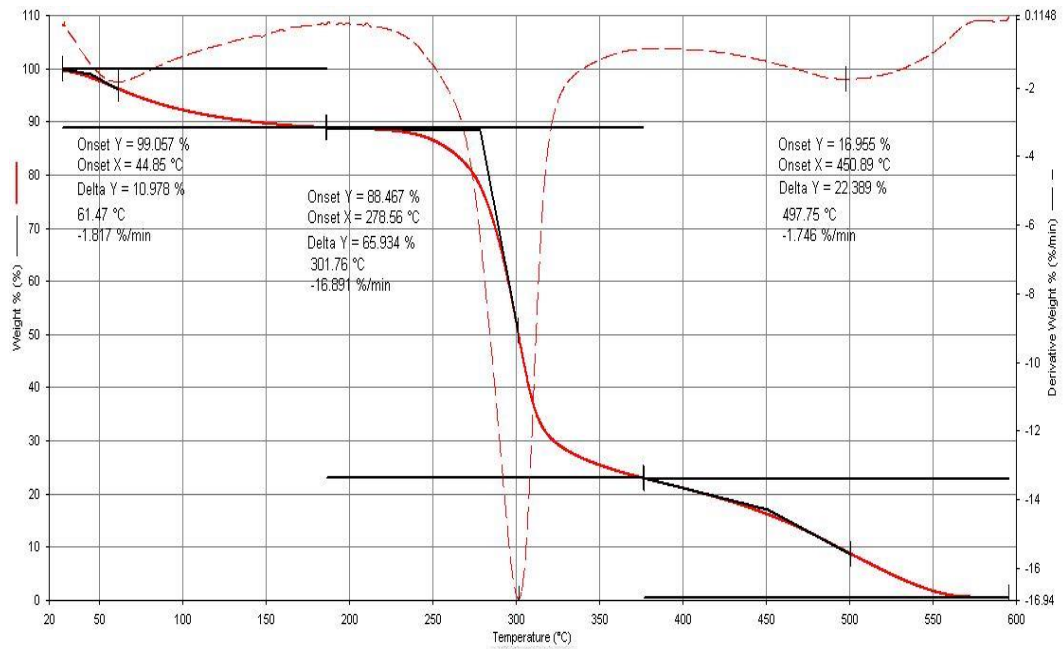
รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 4% CS



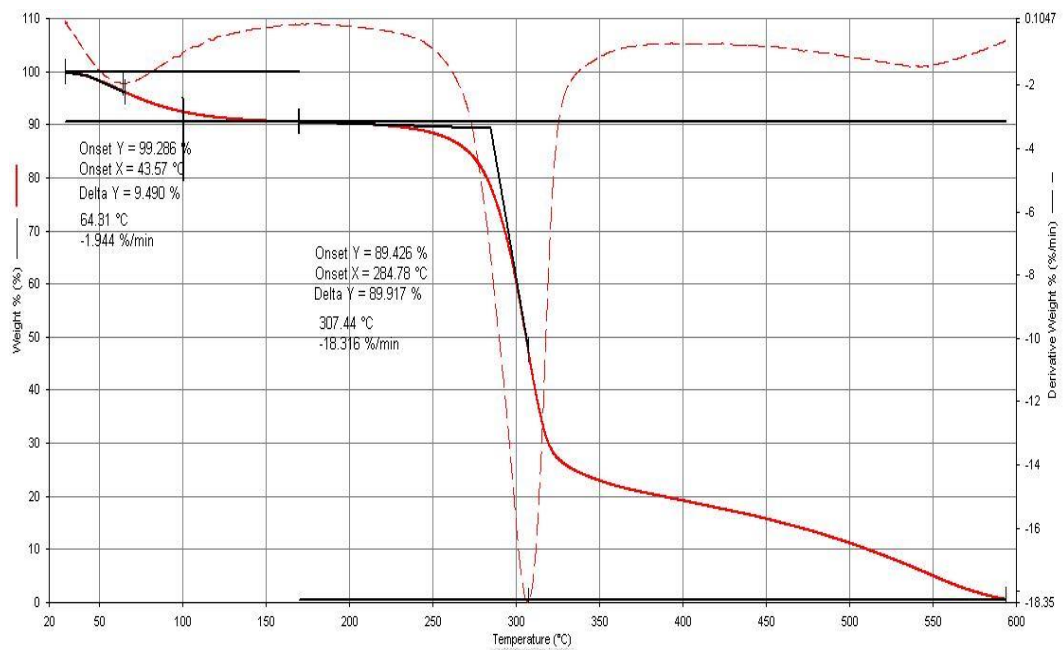
รูปที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS-1% CS



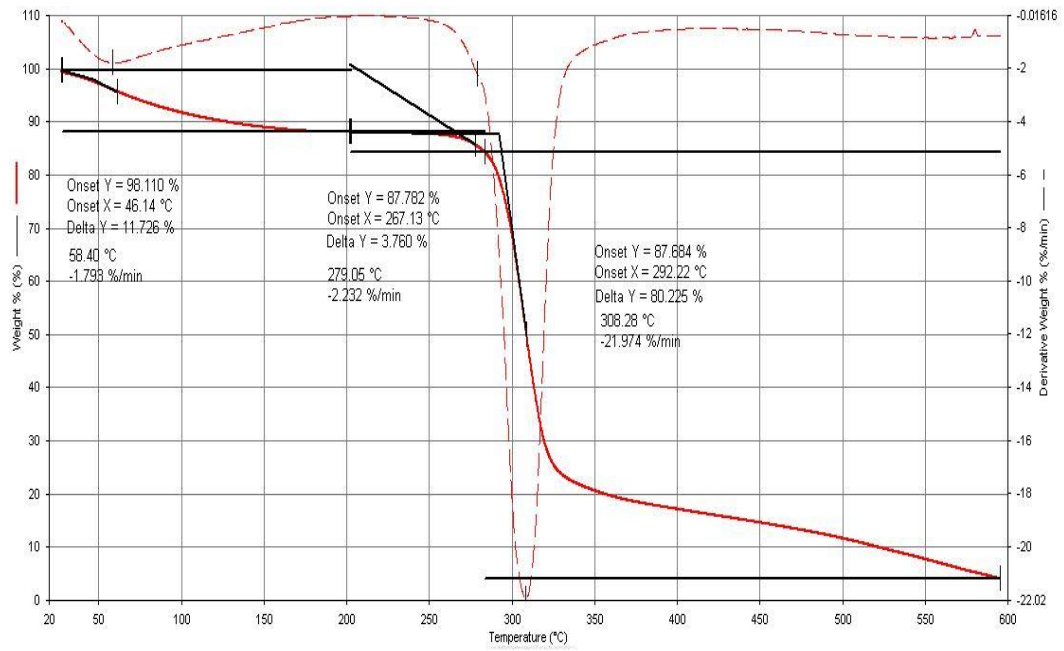
รูปที่ ค.10 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 10% OS-4% CS



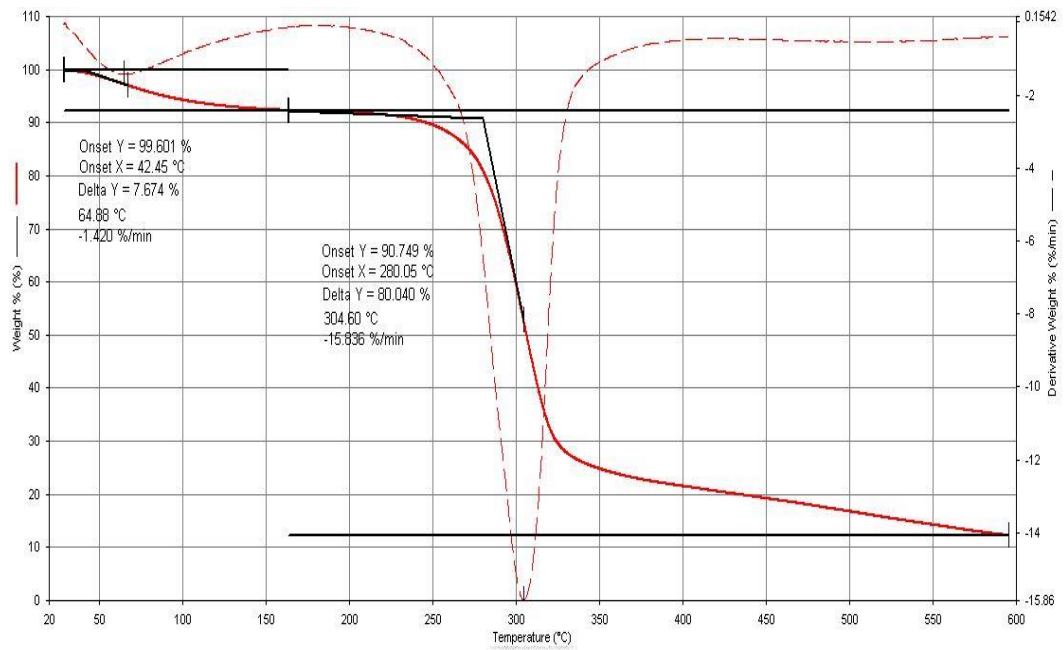
รูปที่ ค.11 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 20% OS-1% CS



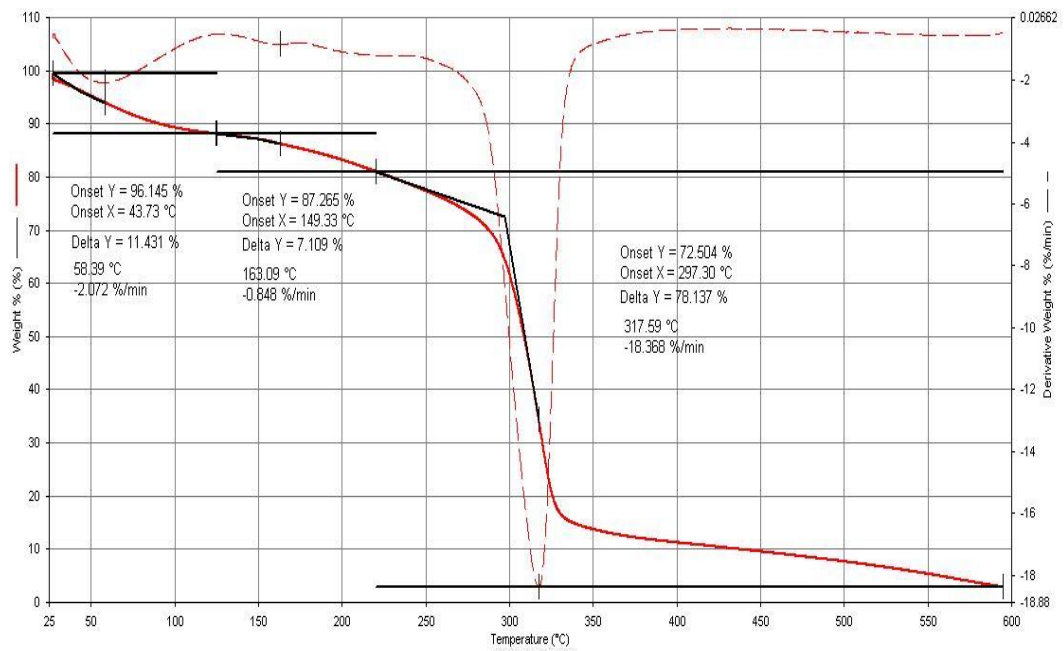
รูปที่ ค.12 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS-10% OS



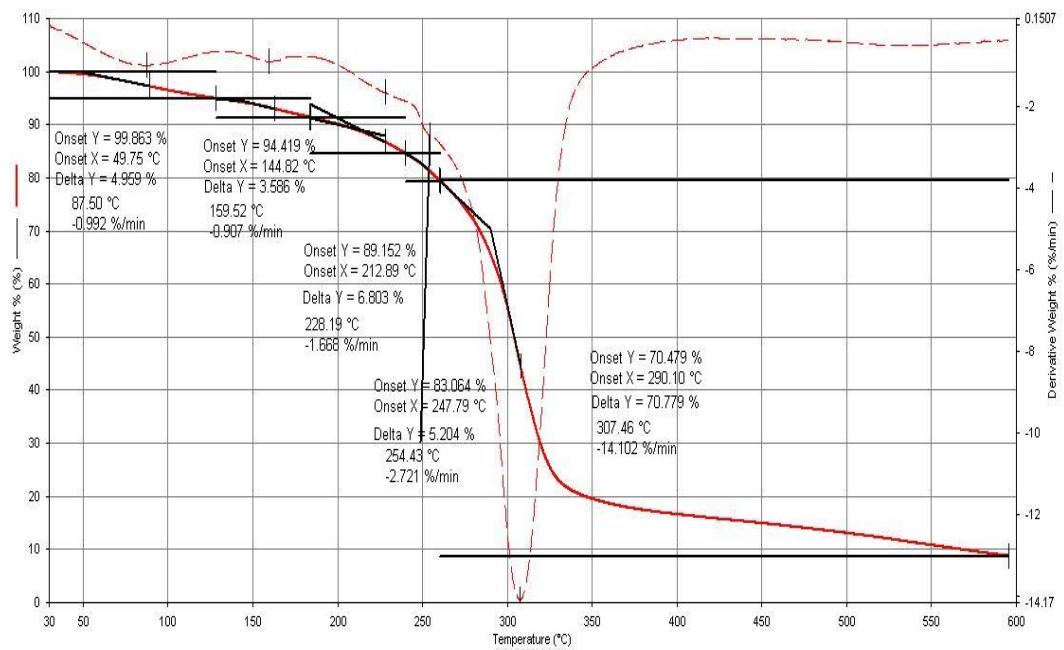
รูปที่ ค.13 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 1% CS-20% OS



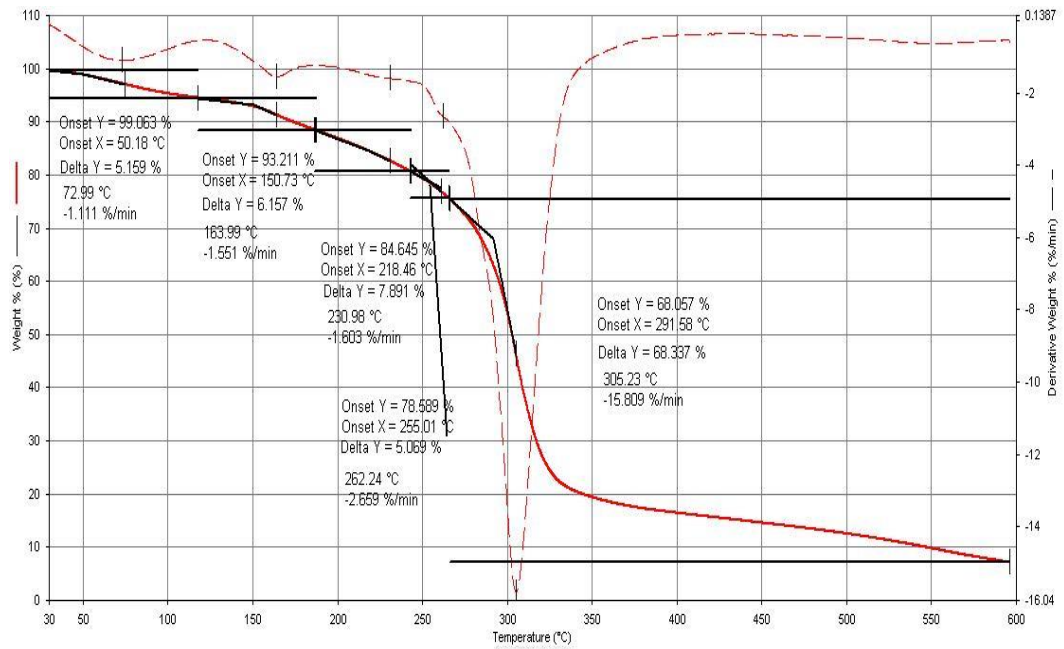
รูปที่ ค.14 เทอร์โมแกรมของแป้งสูตร 4% CS-10% OS



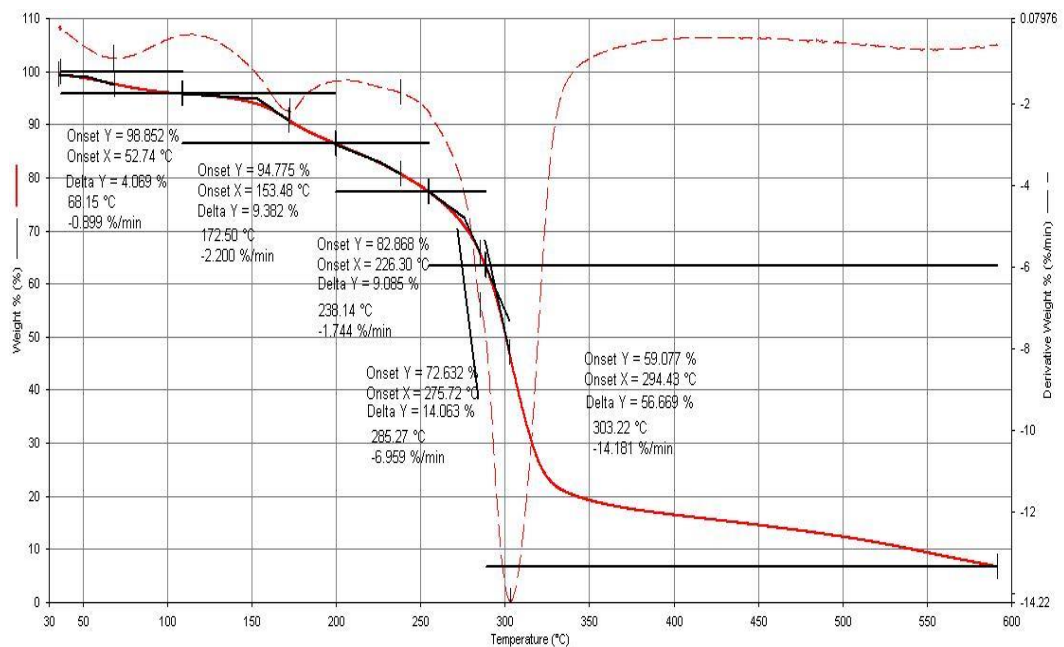
รูปที่ ค.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร



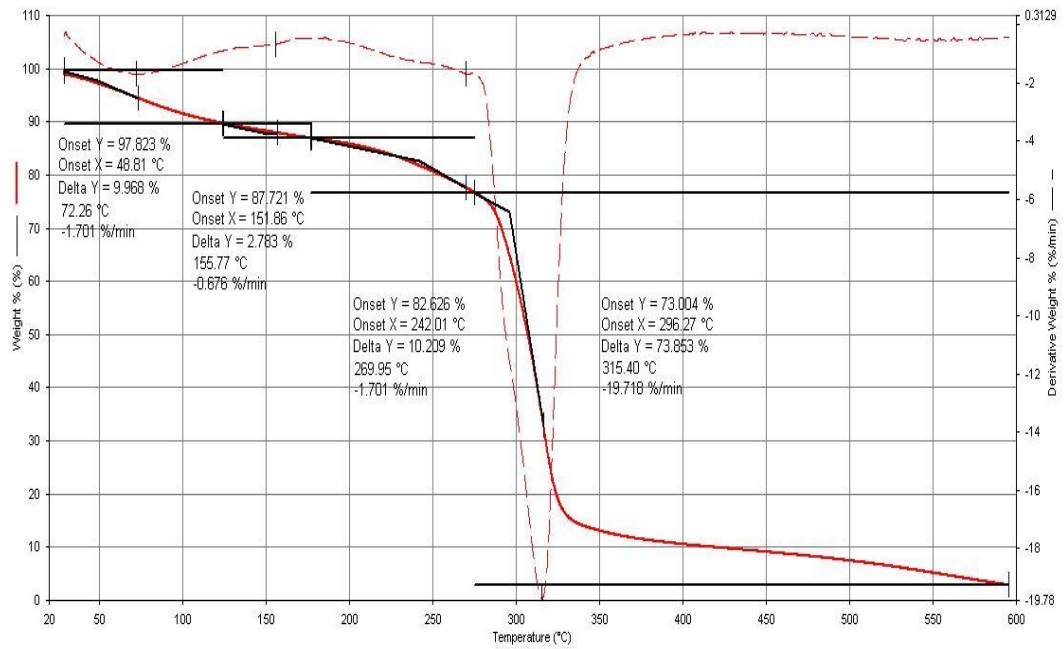
รูปที่ ค.16 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 5% OSF



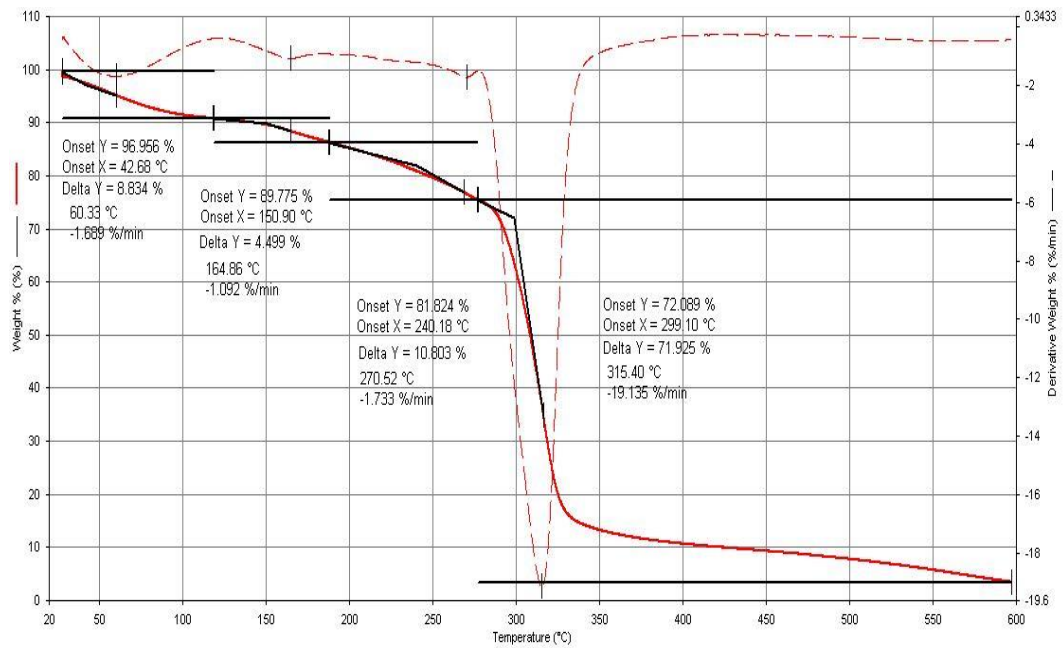
รูปที่ ค.17 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 10% OSF



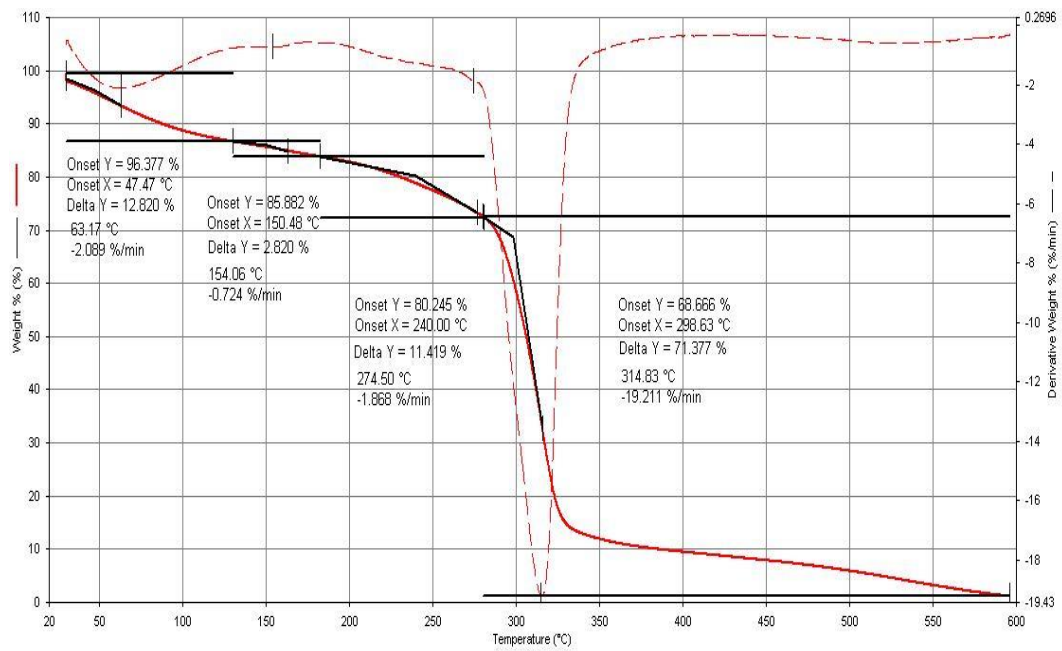
รูปที่ ค.18 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 20% OSF



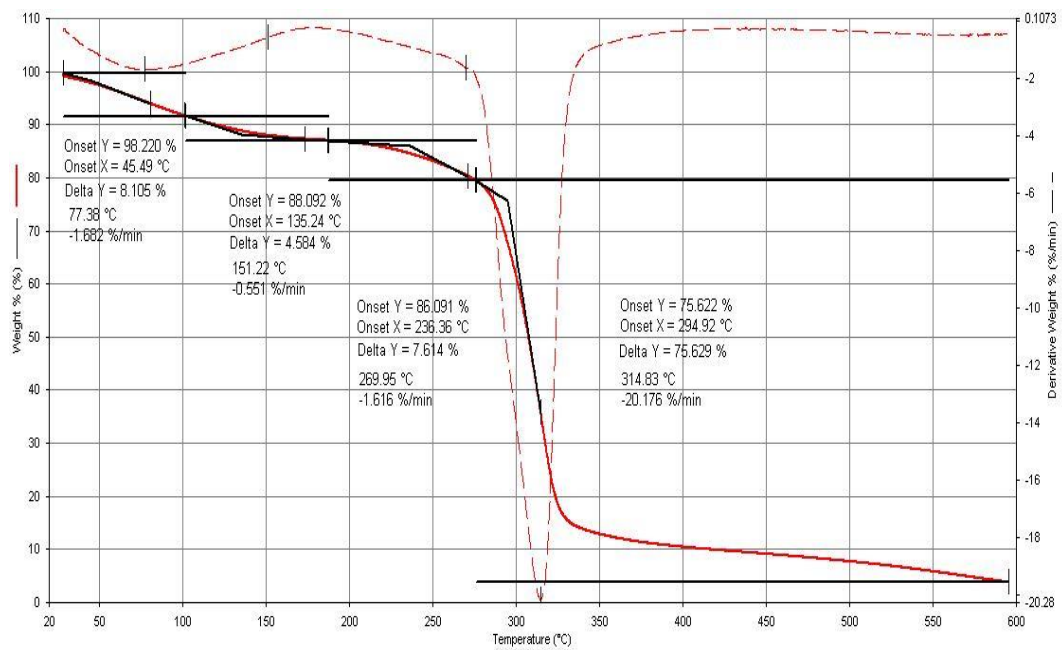
รูปที่ ค.19 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 1% CSF



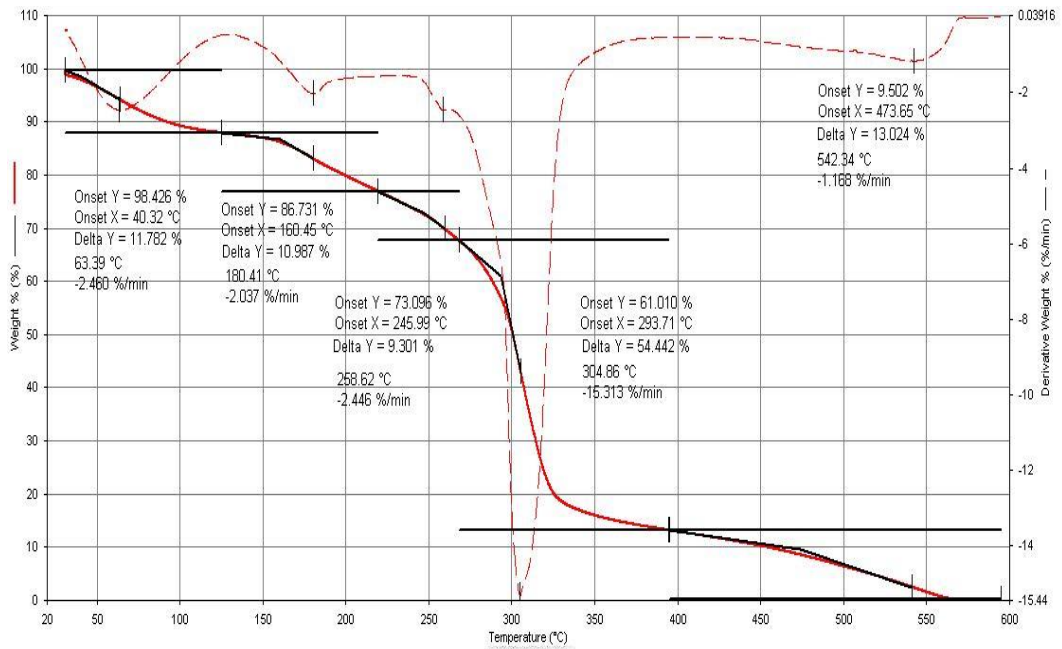
รูปที่ ค.20 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 2% CSF



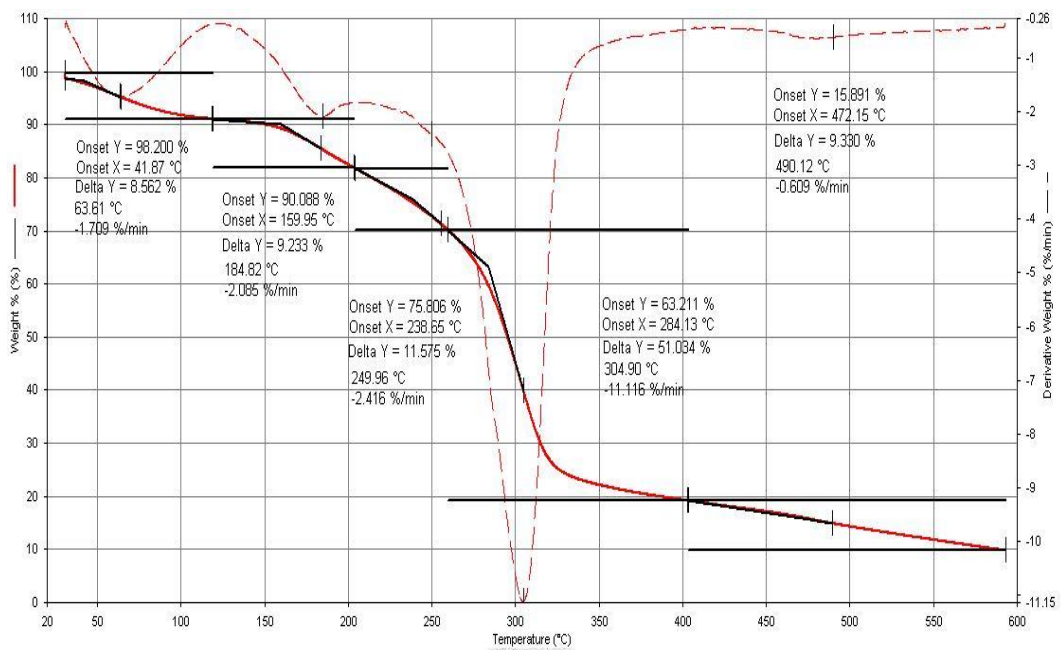
รูปที่ ค.21 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 3% CSF



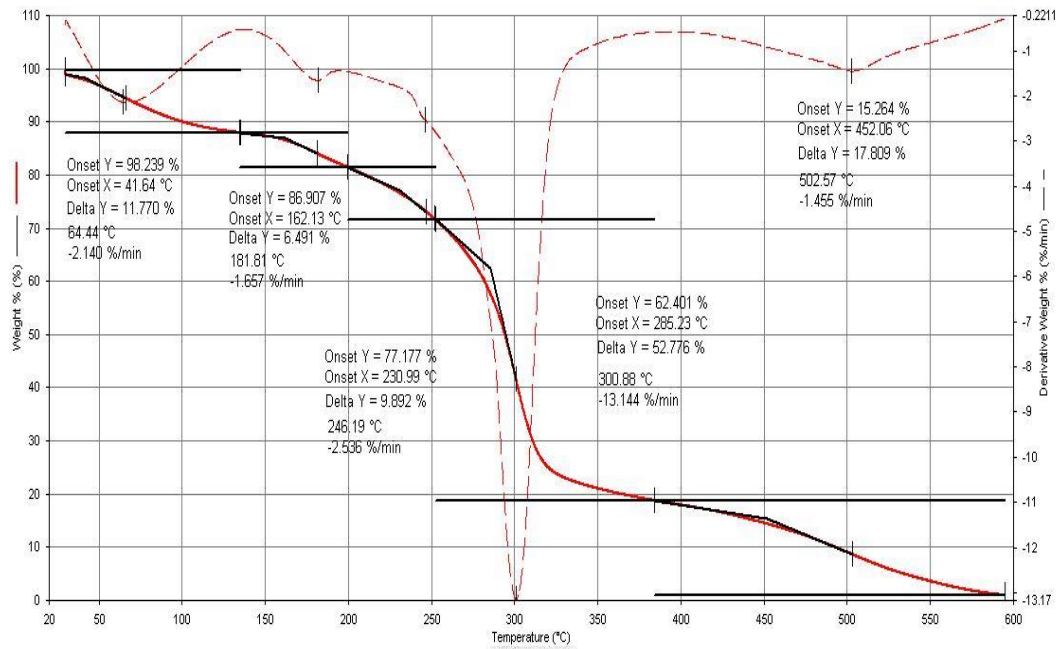
รูปที่ ค.22 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 4% CSF



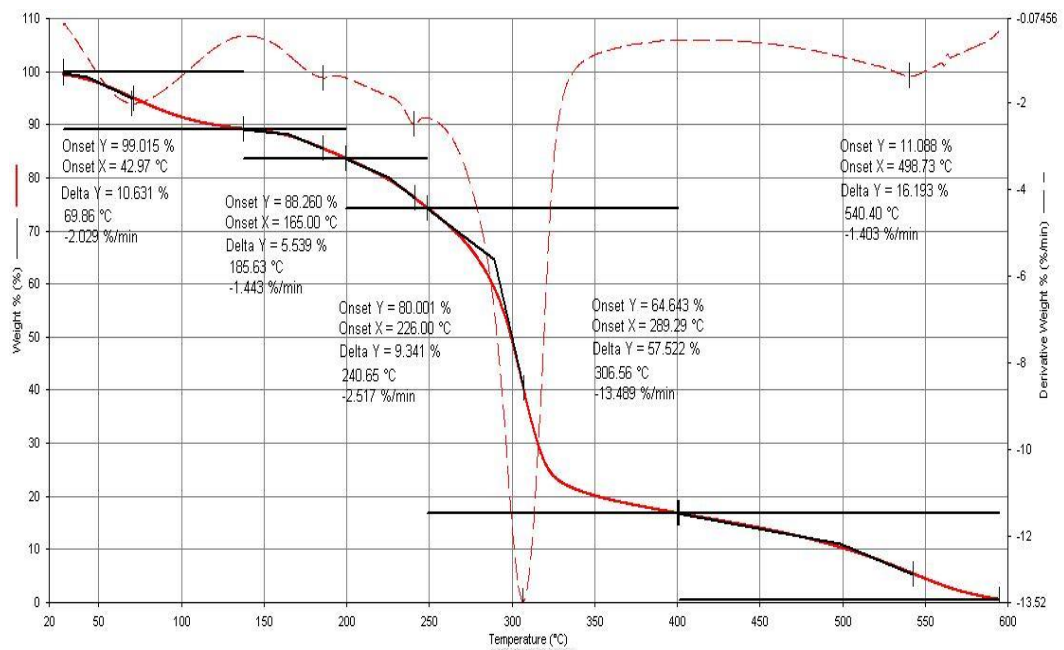
รูปที่ ค.23 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF



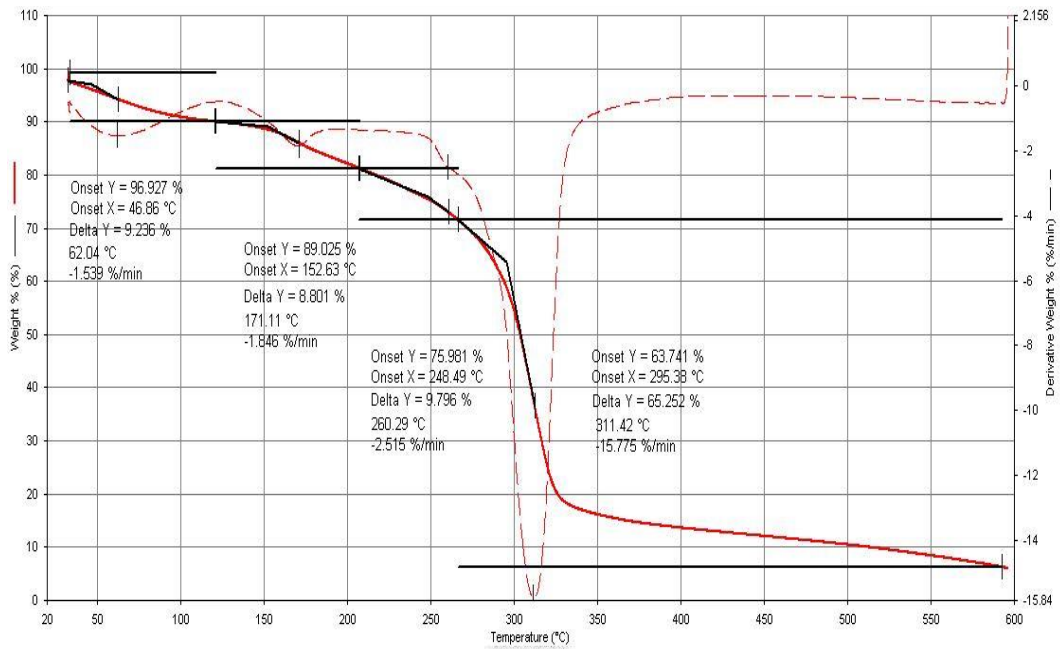
รูปที่ ค.24 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF



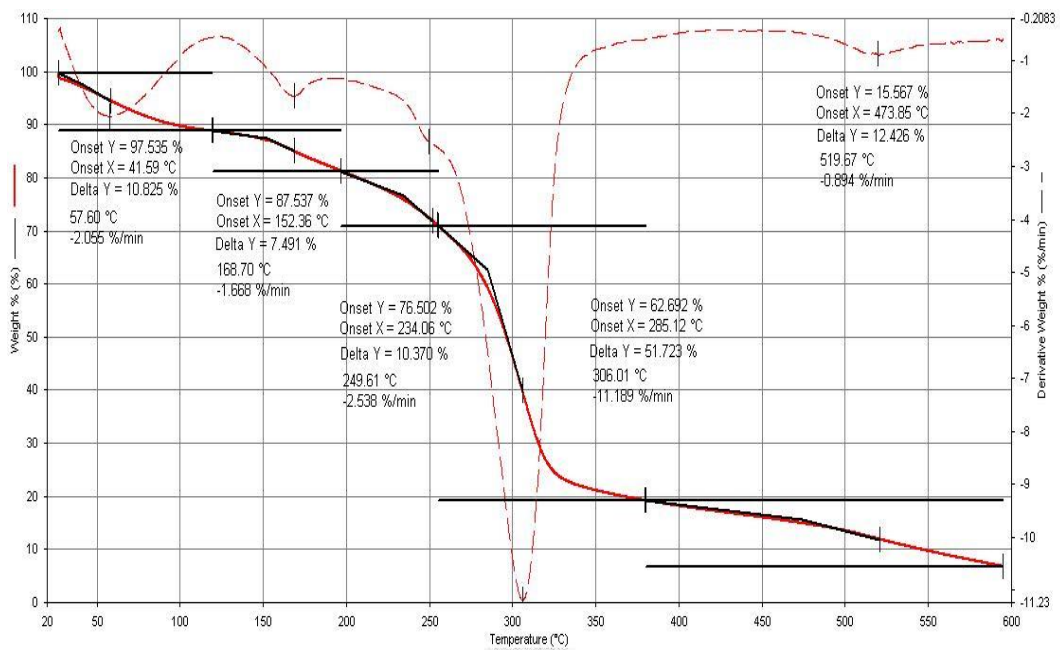
รูปที่ ค.25 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF



รูปที่ ค.26 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF



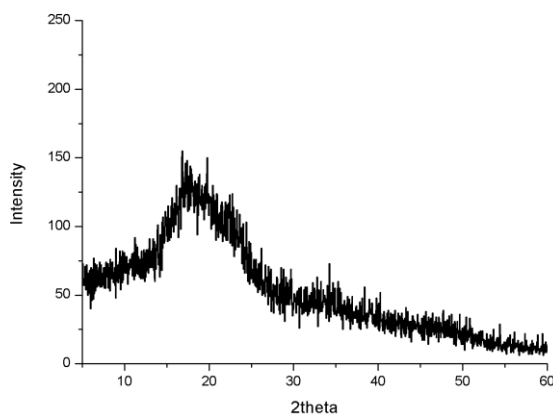
รูปที่ ค.27 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-20% OSF



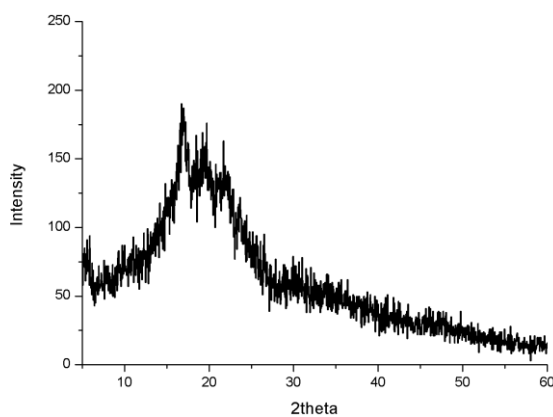
รูปที่ ค.28 เทอร์โมแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 4% CS-10% OSF

ภาคผนวก ง

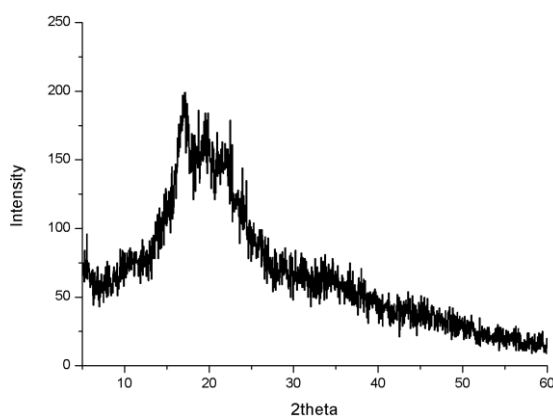
การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)



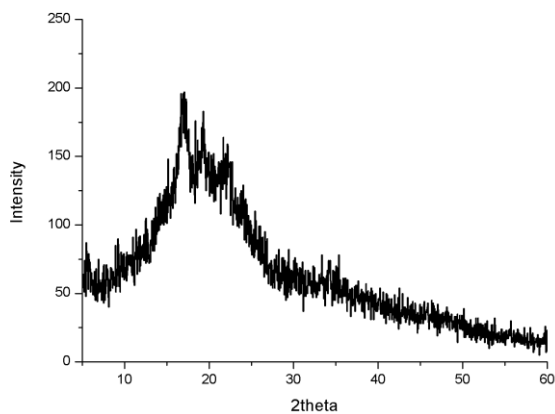
รูปที่ ง.1 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร



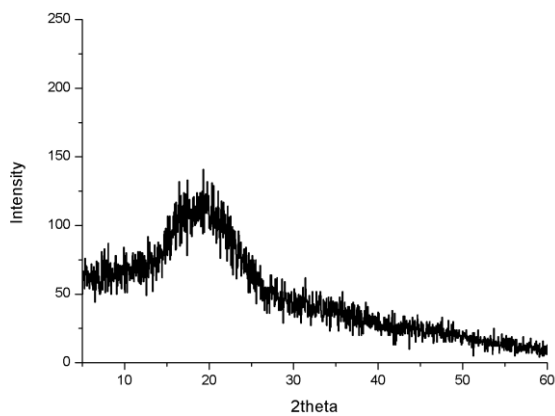
รูปที่ ง.2 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 5% OSF



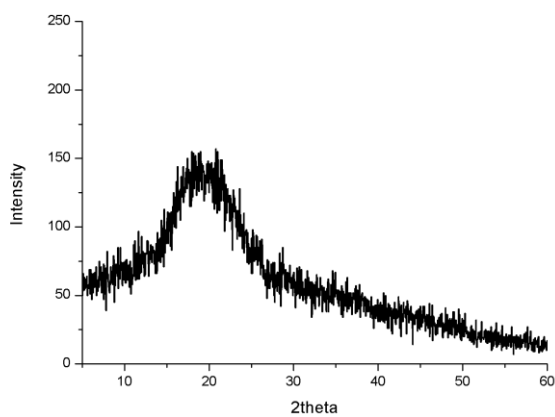
รูปที่ ง.3 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซิไดส์สูตร 10% OSF



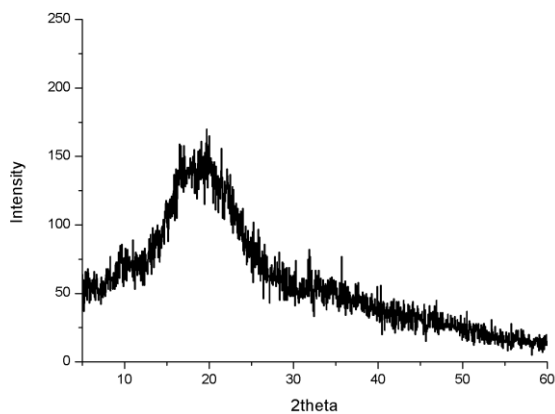
รูปที่ ง.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งออกซีไดส์สูตร 20% OSF



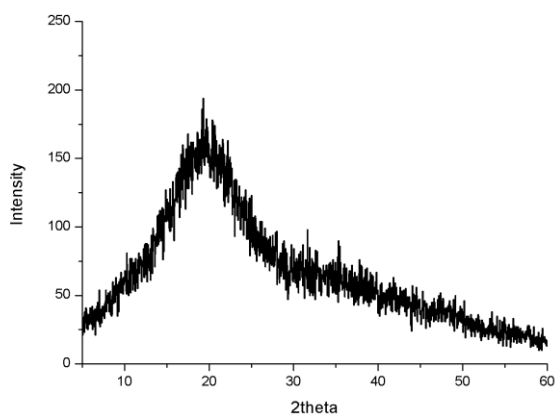
รูปที่ ง.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 1% CSF



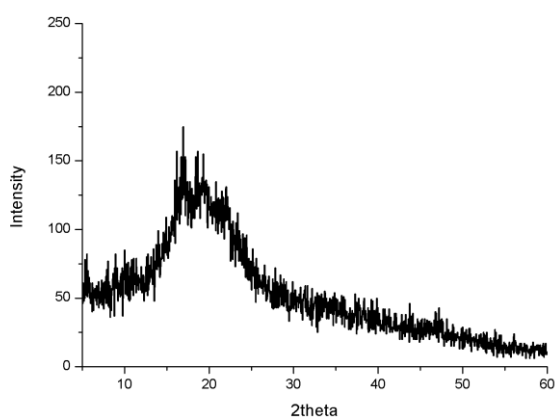
รูปที่ ง.6 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 2% CSF



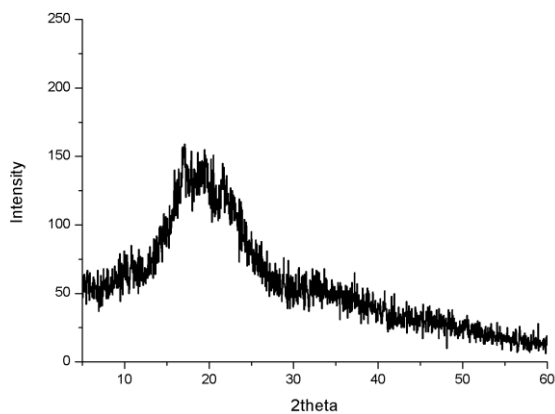
รูปที่ ง.7 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 3% CSF



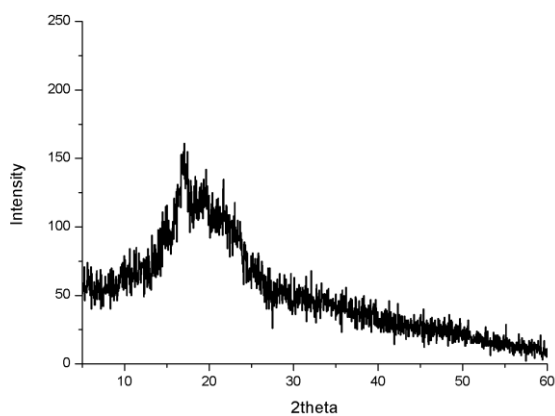
รูปที่ ง.8 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งครอสลิงค์สูตร 4% CSF



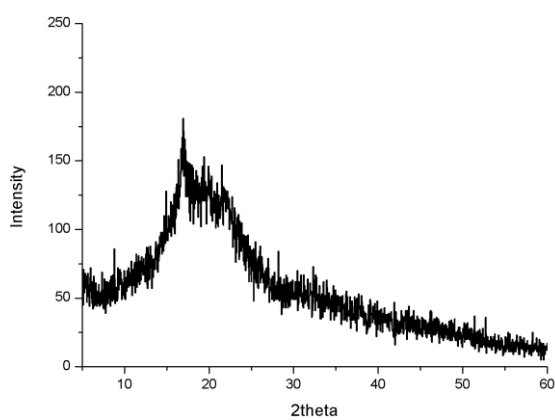
รูปที่ ง.9 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-1% CSF



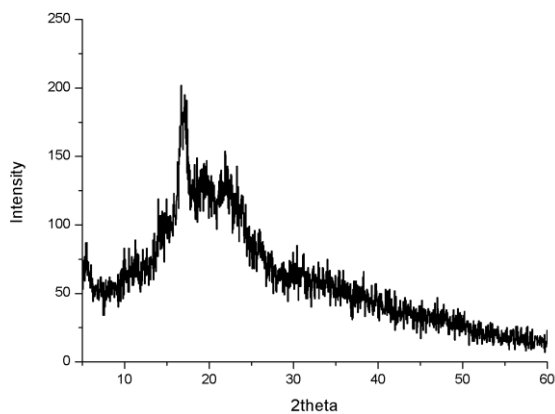
รูปที่ ง.10 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 10% OS-4% CSF



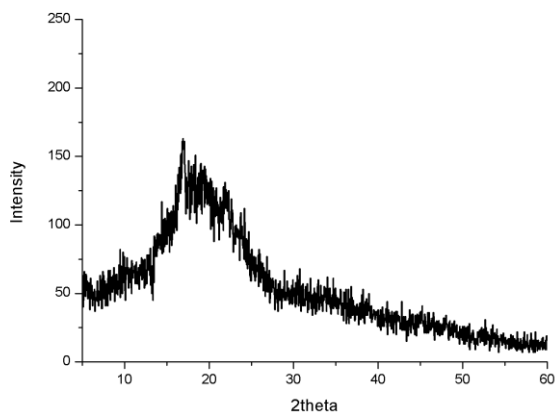
รูปที่ ง.11 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 20% OS-1% CSF



รูปที่ ง.12 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-10% OSF



รูปที่ ง.13 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 1% CS-20% OSF



รูปที่ ง.14 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตร 4% CS-10% OSF

ภาคผนวก จ

การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

ตารางที่ จ.1 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร แป้งออกซีไดส์ และแป้งครอสลิงค์สูตรต่างๆ เป็นระยะเวลาต่างๆ ตามลำดับ

ชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว							
	0	1	2	3	4	5	6	72
NS	0	574.77±67.32	598.96±61.42	607.74±68.76	625.70±81.73	644.23±86.93	643.77±95.76	646.25±33.44
5% OS	0	235.69±9.44	262.24±12.46	281.30±14.31	296.99±13.37	353.63±12.21	351.31±15.6	314.01±5.52
10% OS	0	224.30±2.07	259.47±9.31	262.28±6.75	283.42±0.91	293.47±7.78	305.91±10.09	303.12±3.49
20% OS	0	196.71±16.76	212.08±14.97	219.79±13.81	230.4±4.53	249.47±5.39	254.04±6.39	241.50±9.37
1% CS	0	482.28±65.87	489.32±46.80	508.97±61.88	512.46±45.37	517.14±49.54	511.97±47.46	515.80±54.10
2% CS	0	439.05±23.54	460.58±20.72	479.50±24.36	496.98±25.82	488.84±25.08	491.61±34.09	496.59±14.91
3% CS	0	427.06±11.08	450.93±11.82	463.26±11.41	472.67±15.90	470.91±12.29	477.17±14.30	500.43±11.21
4% CS	0	355.35±54.93	367.29±29.40	376.28±44.87	387.40±45.07	395.05±46.27	388.65±37.26	395.76±38.88
10% OS-1% CS	0	221.78±10.76	223.95±8.31	240.91±15.43	257.18±20.42	257.68±7.86	256.79±4.36	259.63±20.97
10% OS-4% CS	0	305.00±26.03	315.91±20.88	318.76±18.24	323.83±17.43	335.84±34.16	348.16±24.36	334.10±25.40
20% OS-1% CS	0	116.60±4.55	123.47±5.05	128.63±3.93	122.75±7.92	129.92±1.25	127.87±1.96	130.67±8.68
1% CS-10% OS	0	241.19±7.70	266.67±7.50	279.00±9.01	282.98±3.81	284.14±5.28	282.83±6.84	285.39±2.95
1% CS-20% OS	0	200.12±14.29	205.81±23.06	207.33±14.90	203.42±7.22	208.12±14.82	210.18±2.78	223.05±8.08
4% CS-10% OS	0	156.38±2.06	162.49±6.42	175.91±5.55	182.24±3.78	187.16±2.31	186.37±2.26	198.23±7.94

ภาคผนวก ฉ

การดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

ตารางที่ ฉ.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร แป้งออกซีไดส์ และแป้งครอสลิงค์สูตรต่างๆ เป็นระยะเวลา 10 วัน

วันที่	สูตร							
	NSF	5% OSF	10% OSF	20% OSF	1% CSF	2% CSF	3% CSF	4% CSF
1	14.80±0.17	13.62±0.19	11.56±0.22	10.64±0.41	13.16±0.16	7.99±0.21	7.87±0.87	4.85±0.78
2	15.81±0.51	14.47±0.27	12.36±0.34	11.81±0.55	15.19±0.30	9.69±0.39	9.50±0.07	6.45±0.29
3	17.82±0.07	16.07±0.04	12.69±0.34	12.23±0.26	16.88±0.98	12.28±0.26	11.67±0.07	9.45±0.16
4	18.27±0.43	16.67±0.82	13.81±0.65	13.39±0.50	17.51±0.85	16.22±0.89	14.34±0.36	9.90±0.15
5	18.69±0.24	16.94±0.88	14.00±0.65	13.73±0.31	18.00±0.94	17.07±0.12	14.76±0.66	10.11±0.23
6	19.91±0.46	17.21±0.56	14.27±0.12	13.30±0.69	18.49±0.04	17.91±0.36	15.19±0.1	10.33±0.32
7	21.10±0.11	17.27±0.07	14.72±0.67	14.00±0.22	19.48±0.92	18.49±0.06	15.34±0.61	10.33±0.12
8	21.30±0.60	17.34±0.18	15.37±0.84	14.70±0.16	20.47±0.83	19.07±0.78	15.49±0.56	10.60±0.13
9	21.56±0.52	18.13±0.64	15.86±0.17	14.24±0.72	20.69±0.27	20.51±0.99	16.42±0.92	10.82±0.17
10	21.72±0.84	18.32±0.87	15.95±0.99	14.44±0.38	20.97±0.30	20.82±0.97	16.91±0.07	11.43±0.72

ตารางที่ ๑.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งตัดแปรสองชั้นตอนสูตรต่างๆ เป็นระยะเวลา 10 วัน

วันที่	สูตร					
	10% OS-1% CSF	10% OS-4% CSF	20% OS-1% CSF	1% CS-10% OSF	1% CS-20% OSF	4% CS-10% OSF
1	8.68±0.29	9.57±0.48	5.97±0.40	9.35±0.61	9.01±0.02	7.42±0.44
2	9.55±0.24	12.26±0.08	6.95±0.12	11.43±0.66	9.30±0.15	7.81±0.05
3	13.08±0.17	14.62±0.53	9.16±0.46	13.58±0.21	12.58±0.27	10.55±0.17
4	14.00±0.45	16.42±0.73	9.28±0.68	15.68±0.42	13.28±0.71	11.78±0.33
5	14.29±0.93	16.61±0.86	9.01±0.57	16.02±0.12	13.57±0.90	12.11±0.48
6	14.67±0.49	16.82±0.99	8.74±0.88	16.35±0.85	13.86±0.09	12.44±0.65
7	14.87±0.31	17.43±0.95	9.15±0.73	16.70±0.95	14.43±0.76	12.53±0.65
8	15.67±0.16	18.05±0.92	9.56±0.85	17.05±0.08	15.00±0.48	12.63±0.65
9	16.85±0.76	19.33±0.887	10.23±0.92	18.61±0.24	15.32±0.77	13.67±0.40
10	17.07±0.52	19.67±0.27	10.65±0.72	18.94±0.57	15.87±0.26	13.80±0.39

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ตารางที่ ข.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ

สูตร	สมบัติเชิงกล		
	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด
NSF	2.47±0.32	6.78±2.59	101.78±0.32
5% OSF	4.92±0.32	32.35±2.84	27.07±6.68
10% OSF	5.63±0.21	39.01±3.06	26.02±5.47
20% OSF	6.37±0.15	43.71±3.56	25.09±3.32
1% CSF	3.58±0.27	10.04±4.54	30.13±9.54
2% CSF	5.74±0.31	40.34±2.15	6.12±1.27
3% CSF	6.90±0.53	44.73±3.97	5.29±0.22
4% CSF	6.95±0.20	79.75±5.36	6.29±0.50
10% OS-1% CSF	3.69±0.15	47.97±10.42	35.99±7.57
10% OS-4% CSF	3.51±0.71	62.32±7.27	20.66±5.98
20% OS-1% CSF	2.48±0.05	18.08±0.97	36.68±2.64
1% CS-10% OSF	5.68±0.23	64.31±10.40	56.02±7.83
1% CS-20% OSF	3.68±0.19	26.40±5.89	17.25±2.79
4% CS-10% OSF	5.72±0.10	74.07±3.78	42.58±9.53

ภาคผนวก ข

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ตารางที่ ข.1 สมบัติเชิงกลหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 16 วัน ของฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ

สูตร	สมบัติเชิงกล		
	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด
NSF	0.98±0.01	3.20±0.09	15.54±0.36
5% OSF	3.68±0.06	19.56±0.06	5.66±0.20
10% OSF	4.54±0.21	28.38±1.47	5.52±0.40
20% OSF	5.16±0.17	33.76±0.06	5.42±0.03
1% CSF	1.96±0.03	6.48±0.27	16.93±0.02
2% CSF	4.12±0.04	29.54±0.91	4.29±0.05
3% CSF	5.35±0.33	32.47±0.14	3.80±0.21
4% CSF	5.49±0.20	60.19±1.50	4.80±0.04
10% OS-1% CSF	2.12±0.08	36.12±0.15	7.81±0.65
10% OS-4% CSF	1.90±0.10	37.61±0.36	5.00±0.12
20% OS-1% CSF	2.01±0.02	15.11±0.29	9.41±0.88
1% CS-10% OSF	3.12±0.21	40.72±1.09	11.92±2.83
1% CS-20% OSF	2.69±0.07	18.18±0.28	4.09±0.07
4% CS-10% OSF	4.00±0.07	59.39±0.31	9.00±0.27

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพรทิพย์ ก้านสันเทียะ
วัน เดือน ปีเกิด	20 กุมภาพันธ์ 2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 61/45 หมู่ 2 ซอย 4 หมู่บ้านโรยัลปาร์ควิลล์ ถนนสุวินทวงศ์ เขตหนองจอก แขวงลำผักชี จังหวัดกรุงเทพฯ 10530
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.05 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Pornthip, K. and Prachayawarakorn, J. 2019. “Effects of Hydrogen Peroxide Contents on Properties of Biodegradable Oxidized Starch Films.” 60-64. In International Polymer Conference of Thailand 2019 (PCT-9) . Bangkok.