

ผลของเพคตินต่อสมบัติต่าง ๆ
ของฟิล์มแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF PECTIN ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC DIALDEHYDE CASSAVA STARCH FILM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2018-SC-M-014-013

ผลของเพคตินต่อสมบัติต่าง ๆ
ของฟิล์มแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF PECTIN ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC DIALDEHYDE CASSAVA STARCH FILM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2018-SC-M-014-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF PECTIN ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC DIALDEHYDE CASSAVA STARCH FILM

SASIKORN POOMKAEW

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 MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2018-SC-M-014-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของเทคนิคต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแบ่งได้อลดี-
ชื่อนักศึกษา	ไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง
รหัสประจำตัว	นางสาวศศิกร ภูมิแก้ว
ปริญญา	59605031
ภาควิชา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
พ.ศ.	เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	2562
	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมแบ่งได้อลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โซเดียมเมตาเปอร์ไอโอเดตเป็นสารออกซิไดส์ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ พบว่ามีจำนวนหมู่แทนที่อัลดีไฮด์ 43.39 ± 3.20 , 60.46 ± 2.05 , 70.21 ± 3.54 และ 80.61 ± 2.01 ตามลำดับ จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน พบพีก 1735 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอนิลจากหมู่อัลดีไฮด์ จากสัณฐานวิทยาพบเม็ดแป้งได้อลดีไฮด์มีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ความหนืดของแบ่งได้อลดีไฮด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้รับการดัดแปร และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าแป้งมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์

จากนั้นนำแบ่งได้อลดีไฮด์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ 1:0, 1:0.5 และ 1:1 มาปรับปรุงด้วยเทคนิคโดยการขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกได้อลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มโดยวิธีการเทหล่อ และมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์โดยใช้เทคนิคร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแป้ง จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแบ่งได้อลดีไฮด์ พบพีก 1735 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอนิลจากหมู่อัลดีไฮด์ เมื่อใส่เทคนิค พบพีก 1750 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ C=O Stretching ของเทคนิค นอกจากนี้พบการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของการสั่นแบบ O-H Stretching จากสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแบ่งได้อลดีไฮด์มีภาพตัดขวางที่เรียบมากขึ้นและร้อยละปริมาณผลึกลดลงเมื่อมีการใส่เทคนิคในฟิล์มได้อลดีไฮด์ จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่พบว่าฟิล์มได้อลดีไฮด์ที่ใส่เทคนิคมีความแข็งแรงดึงจน จุดรับแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสลดลง ในขณะที่ฟิล์มสามารถดึงยืดได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเทคนิค จากผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของแป้งที่ดีขึ้น จากการทดสอบการบวมตัวและการดูดความชื้น พบว่าฟิล์มแบ่งได้อลดีไฮด์ที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคมีร้อยละการบวมตัวและร้อยละการดูดความชื้นสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเทคนิคแต่มีค่าน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่ได้ดัดแปรและปรับปรุงด้วยเทคนิค นอกจากนี้พบว่าฟิล์มแบ่งได้อลดีไฮด์ที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคย่อยสลายได้เร็วกว่าแป้งได้อลดีไฮด์ที่ไม่ปรับปรุงด้วยเทคนิคแต่ย่อยสลายช้ากว่าฟิล์มจากแป้งไม่ดัดแปรที่ใส่เทคนิค เมื่อวัดสีของชิ้นงานพบว่าฟิล์มที่ใส่เทคนิคมีค่าดัชนีความเหลืองที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : แป้งไดอัลตีไฮด์, เพคติน, फिल्मผสม, फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of pectin on properties of thermoplastic dialdehyde cassava starch film
Student Name	Sasikorn Poomkaew
Student ID	59605031
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research studied on the preparation of dialdehyde starch from cassava starch using sodium metaperiodate (NaIO_4) as an oxidizing agent. The mole ratio between starch and NaIO_4 were varied at 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 and 1:1. The result revealed that the percentage of aldehyde content were in the range of 43.39 ± 3.20 , 60.46 ± 2.05 , 70.21 ± 3.54 and 80.61 ± 2.01 , respectively. FTIR spectra of dialdehyde starch showed the new peak at 1735 cm^{-1} , assigned for C=O stretching of carbonyl group in aldehyde group. Morphological study showed the irregular shape of dialdehyde starch granule. In addition, viscosity of dialdehyde starch clearly decreased, compared with the unmodified starch. TGA result showed the increase in thermal stability, with increasing mole ratio of starch/ NaIO_4 .

Different thermoplastic dialdehyde starch films (DASF) from dialdehyde starch, i.e. 0DASF, 0.5DASF and 1DASF modified by pectin were prepared by casting method with glycerol as a plasticizer. The pectin contents were varied, i.e. 0, 25, 50 and 75% of the weight of starch. The result from FTIR showed the new peak at 1735 cm^{-1} , assigned for C=O stretching of aldehyde group and the peak at 1750 cm^{-1} , attributed to C=O stretching, were observed by the incorporation of pectin into DASF. In addition, O-H stretching peak shifted to lower wavenumbers. For morphology, the result illustrated that pectin the cross-section of DASF modified by pectin was smooth. Moreover, X-ray diffraction patterns of DASF with pectin showed lower crystallinity, led to the decrease of stress at maximum load and Young's modulus. Consequently, strain at maximum load increased with increasing pectin contents. The result from TGA showed that DASF modified by pectin presented the improvement of thermal stability. Moreover, DASF with high pectin contents showed lower swelling percentage and water absorption values than 0DASF modified by pectin. Furthermore, DASF with

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

increasing pectin contents degraded faster than DASF but slower than ODASF modified by pectin and yellow index of DASF increased with increasing pectin contents.

Keywords : Dialdehyde starch, Pectin, Blended films, Biodegradable film



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้แนวทางในการศึกษา สอนแนวคิดในการแก้ปัญหาและวิธีการดำเนินงาน ตลอดจนมอบกำลังใจส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ผู้กรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุตใจ สอนสะอาด ผู้เป็นเจ้าหน้าที่อาคาร ฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุก ๆ ท่าน ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะลูกศิษย์ของ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร ผู้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว เพื่อน และบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้กำลังใจ และความกรุณาช่วยเหลือสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวศศิกร ภูมิแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิเมอร์.....	4
2.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์.....	4
2.1.1.1 เทอร์โมพลาสติก.....	4
2.1.1.2 เทอร์โมเซต.....	4
2.2 การย่อยสลายของพลาสติก.....	5
2.2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic).....	5
2.2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic).....	5
2.2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic).....	5
2.2.1.4 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic).....	6
2.2.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	6
2.2.2.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน.....	6
2.2.2.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป.....	7
2.2.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	7
2.2.2.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	7
2.2.2.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	8
2.2.2.6 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	8
2.3 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง.....	8
2.3.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้.....	8
2.3.3 แป้งกราฟฟิโคพอลิเมอร์.....	9
2.4 แป้ง (Starch).....	9
2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	10
2.4.1.1 อะมิโลส.....	10
2.4.1.2 อะมิโลเพคติน.....	12
2.4.1.3 สารตัวกลาง.....	13
2.4.1.4 ไขมัน.....	13
2.4.1.5 ไนโตรเจน (โปรตีน).....	13
2.4.1.6 เถ้า.....	14
2.4.1.7 ฟอสฟอรัส.....	14
2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	14
2.4.3 สมบัติของแป้ง.....	16
2.4.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	16
2.4.3.2 ความหนืด.....	16
2.4.3.3 การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization).....	17
2.4.3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	18
2.4.4 สมบัติของแป้งฟิล์ม.....	18
2.5 แป้งมันสำปะหลัง.....	19
2.5.1 ถิ่นกำเนิด.....	19
2.5.2 ลักษณะทั่วไป.....	19
2.5.3 สมบัติของของแป้งมันสำปะหลัง.....	20
2.6 แป้งดัดแปร.....	20
2.6.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร.....	21
2.6.2 การดัดแปรทางเคมี.....	21
2.6.2.1 การเกิดอนุพันธ์ (Derivertization).....	21
2.6.2.2 การลดขนาดโมเลกุลของแป้งโดยกรด (Acid thinning).....	22
2.6.2.3 เดกซ์ทรีไนเซชัน.....	22
2.6.2.4 ออกซิเดชัน.....	22
2.6.2.5 การย่อยสลายโดยเอนไซม์.....	23
2.6.3 การดัดแปรทางกายภาพ.....	23
2.6.3.1 แป้งพรีเจลลาทีไนซ์.....	23
2.6.3.2 แป้งละลายน้ำเย็น.....	23
2.6.3.3 การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล.....	23
2.6.3.4 การแช่.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.3.5 การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น.....	24
2.6.4 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ.....	24
2.6.4.1 แป้งชนิดมีอะมิโลสสูง.....	24
2.6.4.2 แป้งอะมิโลเพกติน.....	24
2.7 แป้งไดอัลตีไฮด์.....	24
2.8 เพกติน.....	26
2.8.1 กระบวนการผลิตเพกติน.....	26
2.8.2 โครงสร้างของเพกตินจากธรรมชาติ.....	28
2.8.3 ประเภทของเพกติน.....	29
2.8.3.1 เพกตินที่มีเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin : HM).....	29
2.8.3.2 เพกตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (low methoxyl pectin : LM).....	29
2.8.4 สมบัติของเพกติน.....	30
2.8.4.1 ความเป็นกรดต่าง.....	30
2.8.4.2 ความคงตัว.....	30
2.8.4.3 การละลาย.....	30
2.8.4.4 ความหนืด.....	31
2.8.4.5 การเกิดเจล.....	31
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 สารเคมี.....	36
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	37
3.3 การทดลอง.....	39
ตอนที่ 1 การเตรียมแป้งไดอัลตีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โซเดียม เปอร์ไอโอเดตเป็นสารออกซิไดซ์.....	39
ตอนที่ 2 การเตรียมฟิล์มจากเพกติน.....	40
ตอนที่ 3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไม่ดัดแปรผสมเพกติน.....	40
ตอนที่ 4 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไดอัลตีไฮด์ผสมเพกติน.....	40
3.4 การทดสอบ.....	42
3.4.1 การหาปริมาณอัลตีไฮด์.....	42
3.4.2. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	42
3.4.3 สันฐานวิทยา	42
3.4.4 การศึกษาความหนืด.....	42
3.4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	43
3.4.6 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	43
3.4.7 การศึกษาการบวมตัว.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.8 การดูความชื้น.....	43
3.4.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	44
3.4.9.1 การทดสอบ ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และ	
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	44
3.4.10 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	45
3.4.11 การวัดสี.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	47
4.1 การศึกษาสมบัติของเม็ดแป้ง.....	49
4.1.1 การทดสอบหาปริมาณหมู่แอลดีไฮด์.....	49
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน.....	51
4.1.3 สัณฐานวิทยา.....	53
4.1.4 การศึกษาความหนืด.....	54
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	56
4.2 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติ	
ด้วยเพคติน.....	60
4.2.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน.....	60
4.2.2 สัณฐานวิทยา.....	64
4.2.3 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	68
4.2.4 การศึกษาสมบัติการบวมตัว.....	70
4.2.5 การทดสอบการดูความชื้น.....	74
4.2.6 สมบัติเชิงกล.....	78
4.2.7 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	82
4.2.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	87
4.2.9 การวัดสี.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.1.1 การศึกษาสมบัติของเม็ดแป้ง.....	94
5.1.2 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วย	
เพคติน.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
เอกสารอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน.....	10
2.2 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิด.....	13
2.3 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด.....	16
2.4 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด.....	18
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	36
3.2 รายละเอียดของเพคตินชนิดผง.....	37
3.3 อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งมันสำปะหลังต่อโซเดียมเปอร์ไอโอเดต และ ปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง (กรัม) กับ โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (กรัม) ที่ใช้ในการ เตรียมแป้งไดอัลติไฮด์.....	39
3.4 ปริมาณขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติก.....	41
3.5 ปริมาณขององค์ประกอบของแป้งไม่ดัดแปรและแป้งไดอัลติไฮด์ที่ใช้ขึ้นรูป ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกผสมกับเพคตินในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	41
3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง.....	44
3.7 การคำนวณสมบัติเชิงกล.....	45
4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	47
4.1 (ต่อ) สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	48
4.2 ปริมาณหมู่แทนที่อัลติไฮด์ของแป้งที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแป้งและสาร ออกซิไดส์ที่ปริมาณต่างกัน.....	50
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น.....	51
4.4 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนพื้นที่พื้นที่ใต้กราฟของพีคของแป้งสูตรต่าง ๆ..	52
4.5 ฐานวิทยาของแป้งไดอัลติไฮด์สูตรต่าง ๆ (ก) ODAS (ข) 0.5DAS และ (ค) 1DAS.....	53
4.6 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) และน้ำหนักที่หายไป (%) ของแป้ง ดัดแปรไดอัลติไฮด์สูตร ODAS, 0.5DAS และ 1DAS ตามลำดับ.....	58
4.7 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนพื้นที่พื้นที่ใต้กราฟของพีคของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..	61
4.8 พื้นที่ใต้กราฟของพีคและสัดส่วนพื้นที่พื้นที่ใต้กราฟของพีคของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน.....	63
4.9 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์ สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) ODASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF (จ) 1DASF (ฉ) ODAS50PF (ช) 0.5DAS50PF และ (ซ) 1DAS50PF.....	65
4.9 (ต่อ) ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติ ไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) ODASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF (จ) 1DASF (ฉ) ODAS50PF (ช) 0.5DAS50PF และ (ซ) 1DAS50PF..	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 (ต่อ) ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF (จ) 1DASF (ฉ) 0DAS50PF (ช) 0.5DAS50PF และ (ซ) 1DAS50PF.	67
4.10 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	69
4.11 ร้อยละการลดลงของสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	84
4.12 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) และน้ำหนักที่หายไป (%) ของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DAS, 0.5DAS, 1DAS, 0DAS50P, 0.5DAS50P และ 1DAS50P ตามลำดับ.....	89
4.13 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ และเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่งตามลำดับ.....	92
ข.1 ค่าความหนืด (Centipoise) ของสารละลายแป้งตัดแปรโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส.....	113
จ.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF, 1DASF และ 100PF.....	122
จ.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 ตามลำดับ...	123
ฉ.1 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ.....	124
ฉ.1 (ต่อ) ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ.....	125
ช.1 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน.....	126
ช.1(ต่อ) ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน.....	127
ช.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สูตรต่าง ๆ หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 15 วัน.....	132
ณ.1 ที่มาของปริมาณสารที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม	135

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลาย.....	6
2.2 โครงสร้างอะมิโลส.....	10
2.3 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์.....	11
2.4 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส.....	11
2.5 โครงสร้างอะมิโลเพคติน.....	12
2.6 รูปแบบการหักเหรังสีเอกซ์ของเม็ดแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน.....	15
2.7 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบริฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	15
2.8 ขนาดและรูปร่างของแป้งมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	19
2.9 ปฏิกริยาการเกิดแป้งไดอัลดีไฮด์.....	24
2.10 พันธะเชื่อมโยงที่คาดว่าเกิดในแป้งไดอัลดีไฮด์.....	25
2.11 การนำแป้งไดอัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ.....	26
2.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตเพคติน.....	27
2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของเพคตินจากธรรมชาติ.....	28
2.14 หน่วยกรดกาแลคทูโรนิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4.....	28
2.15 การเกิดปฏิกริยาการแตกพอลิเมอร์ (De-polymerisation) ของกรดกาแลคทูโรนิก.....	30
2.16 แบบจำลองกล่องไข่ (Egg-box model) แสดงกลไกการเกิดเจลของเพคตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin : LM).....	32
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	38
4.1 ปฏิกริยาการเกิดแป้งไดอัลดีไฮด์ระหว่างสารออกซิไดส์ไฮเดรียมเมตาเปอร์ไอโอเดตกับแป้ง.....	49
4.2 โครงสร้างพันธะเชื่อมขวางของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ประกอบด้วยพันธะอะซีทัล และเฮมิอะซีทัล (Acetal and Hemiacetal linkage).....	50
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกัน (ก) ODAS (ข) 0.25DAS (ค) 0.5DAS (ง) 0.75DAS และ (จ) 1DAS.....	51
4.4 ค่าความหนืด (Centipoise) ของสารละลายแป้งดัดแปรโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดส์ต่างกันที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ.....	55
4.5 เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ที่ใช้สารออกซิไดส์ปริมาณต่าง ๆ (ก) TG และ (ข) DTG.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF และ (จ) 1DASF.....	60
4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF ที่ปรับปรุง สมบัติด้วย เพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0DAS25PF (ค) 0DAS50PF (ง) 0DAS75PF และ (จ) 100PF.....	62
4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.5DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) 0.5DASF (ข) 0.5DAS25PF (ค) 0.5DAS50PF (ง) 0.5DAS75PF และ (จ) 100PF.....	62
4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) 1DASF (ข) 1DAS25PF (ค) 1DAS50PF (ง) 1DAS75PF และ (จ) 100PF.....	63
4.10 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF	68
4.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DAS50P, (ข) 0.5DAS50P และ (ค) 1DAS50P.....	69
4.12 ดิฟแฟรกโทแกรมเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม สูตร (ก) 0DASF และ (ข) 0DAS50PF.....	69
4.13 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ ที่ ระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง.....	71
4.14 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณ เพคติน ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF.....	72
4.15 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณ สารออกซิไดส์และปริมาณเพคตินคงที่ (ก) 25P (ข) 50P และ (ค) 75P.....	74
4.16 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ และฟิล์มเพคติน.....	75
4.17 ร้อยละการดูดความชื้นตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่เพิ่มปริมาณเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF.....	76
4.18 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่ม ปริมาณสารออกซิไดส์และปริมาณเพคตินคงที่ (ก) 25P (ข) 50P และ (ค) 75P.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF, 0.5DASF และ 1DASF (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส.....	79
4.20 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส.....	81
4.21 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ระยะเวลา 0 และ 10 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส.....	83
4.22 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง ที่ระยะเวลา 0 และ 10 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส.....	86
4.23 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) TG และ (ข) DTG.....	87
4.24 เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ที่ใช้สารออกซิไดส์ปริมาณต่าง ๆ และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินสูตร ODAS50PF, 0.5DAS50PF และ 1DAS50PF โดย (ก) TG และ (ข) DTG.....	88
ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.....	103
ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.25.....	103
ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.5.....	104
ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.75.....	104
ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 1.....	105
ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF.....	105
ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.25DASF	106
ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.5DASF..	106
ก.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.75DASF	107
ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 1DASF...	107
ก.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตร ODAS25PF.....	108
ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตร ODAS50PF.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0DAS75PF.....	109
ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DAS25PF.....	109
ก.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF.....	110
ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DAS75PF.....	110
ก.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DAS25PF.....	111
ก.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DAS50PF.....	111
ก.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DAS75PF.....	112
ก.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 100PF.....	112
ค.1 เทอร์โมแกรมของแป้งตัดแปรรูปไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สูตร 0DAS.....	114
ค.2 เทอร์โมแกรมของแป้งตัดแปรรูปไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สูตร 0.5DAS.....	114
ค.3 เทอร์โมแกรมของแป้งตัดแปรรูปไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สูตร 1DAS.....	115
ค.4 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0DASF.....	115
ค.5 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DASF.....	116
ค.6 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DASF.....	116
ค.7 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0DAS50PF.....	117
ค.8 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF....	117
ค.9 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DAS50PF.....	118
ง.1 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0DASF.....	119
ง.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DASF...	119
ง.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DASF.....	120
ง.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0DAS50PF	120
ง.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF.....	121
ง.6 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตร 1DAS50PF	121
ข.1 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 0 วัน.....	128
ข.2 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 1 วัน.....	129
ข.3 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน.....	130
ข.4 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สตาบิลิซันต์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 20 วัน.....	131
ข.1 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกไซด์สูตรต่าง ๆ หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 15 วัน.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ทางด้านการแพทย์ ทางการเกษตร อาจกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์จากพลาสติกได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากพลาสติกมีข้อดี คือ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและราคาถูก แต่การใช้พลาสติกในปริมาณมาก ทำให้เกิดปริมาณขยะที่สูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และก่อให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อน ทั้งนี้เพราะพลาสติกมีความคงทนต่อการย่อยสลายและใช้เวลานานนับร้อยปี ในการสูญเสียน้ำหนักบางส่วนไป [1]

จากปัญหาที่เกิดขึ้นงานวิจัยที่ผ่านมาได้มุ่งเน้นศึกษาการใช้วัสดุธรรมชาติเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังจะเห็นได้จากการเลือกใช้แป้ง (Starch) มาใช้เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในประเทศไทย มีราคาถูก เป็นทรัพยากรใช้แล้วไม่หมดไปสามารถปลูกทดแทนได้ นอกจากนี้แล้วแป้งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ง่าย แต่แป้งมีข้อด้อยบางประการที่สำคัญ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ และมีสมบัติการดูดความชื้นสูง [2]

เนื่องจากโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยโครงสร้าง 2 องค์ประกอบหลัก คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin) แต่ละส่วนของวงแหวนแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ข้างเคียงได้ ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในสายโซ่หลักทำให้เมื่อแป้งได้รับความร้อนจึงเกิดการสลายตัว [3] ทำให้แป้งมีสมบัติแบบเทอร์โมเซต (Thermoset polymer) ดังนั้นจึงต้องขึ้นรูปแป้งโดยวิธีการทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) เตรียมได้จากแป้งผสมพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งสามารถไหลและขึ้นรูปได้เมื่ออยู่ในสภาวะได้รับความร้อน ความดันและแรงเฉือนที่สูง แต่เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งธรรมชาติ มีสมบัติที่ยังคงต้องการปรับปรุง เพราะแป้งธรรมชาติมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี มีความคงทนต่อสภาวะแรงเฉือนในกระบวนการผลิตต่ำ ก่อให้เกิดการดัดแปรแป้งธรรมชาติผ่านกระบวนการต่าง ๆ เรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch) [1]

แป้งดัดแปร คือ แป้งที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติ มาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืดลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน โดยกรรมวิธีการผลิตแป้งดัดแปรมีหลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี กายภาพ เอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์ แป้งดัดแปรมีหลายชนิด เช่น แป้งแอซิเตต (Starch acetate) แป้งไฮดรอกซีเอทิล (Hydroxyethyl starch) แป้งไดอัลดีไฮด์ (Dialdehyde starch) เป็นต้น [1]

แป้งไดอัลดีไฮด์ เป็นแป้งดัดแปรทางเคมีเกิดจากการนำแป้งธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ ประเภทเปอร์ไอออกไซด์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการแตกออกของพันธะคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในโมเลกุลของแป้ง เกิดการเปลี่ยนแปลงจากหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่อัลดีไฮด์ ส่งผล

ให้แป้งมีสมบัติที่เปลี่ยนไป คือดูดซับความชื้นลดลงเนื่องจากแป้งที่ได้มีขั้วน้อยลง [2] ความหนืดลดลง เม็ดแป้งมีความขาวขึ้น สารละลายและฟิล์มที่ได้มีความใสมากขึ้น และเจลที่ได้มีความคงตัวสูง [1] จากงานวิจัยของ ปรรณนา คำใส ได้นำแป้งไดอัลไธไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยวิธีการเทหล่อโดยผสมกับแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางเชิงกลและสมบัติการดูดความชื้นได้ [4] แต่พบปัญหาบางประการ คือ ฟิล์มที่ได้มีเม็ดแป้งบางส่วนที่ไม่กลม เนื่องจากแป้งทั้งสองหลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน ทั้งนี้ที่ไม่สามารถขึ้นรูปโดยใช้แป้งไดอัลไธไฮด์เพียงองค์ประกอบเดียวได้ เพราะแป้งไดอัลไธไฮด์ที่สังเคราะห์ได้มีความหนืดต่ำ งานวิจัยนี้จึงนำเพกทิน (Pectin) มาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

เพกทินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) พบตามธรรมชาติในผนังเซลล์ของพืช และรอยต่อระหว่างผนังเซลล์ โดยรวมตัวอยู่กับเซลล์ลูลอส ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกัน สกัดได้จากเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม (Citrus) กากของแอปเปิ้ลที่คั้นน้ำแล้ว และหัวบีท เพกทินถูกนำมาใช้ในงานประเภทยาอาหาร เช่น การทำแยมผลไม้ เนื่องจากเพกทินเป็นสารก่อเจล (Gelling agent) กล่าวคือสามารถรวมกับน้ำได้ปริมาณมาก เกิดเป็นของกึ่งแข็ง ยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในทางด้านเภสัชกรรม และเวชสำอางเนื่องจากเป็นมิตรต่อผิวหนังของมนุษย์ [5]

จากงานวิจัยของ J. Yu และคณะ ทำการศึกษาสมบัติของแป้งไดอัลไธไฮด์ โดยใช้แป้งมันฝรั่งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเปอร์ไอโอเดต ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเปอร์ไอโอเดตต่อแป้ง คือ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.1 ตามลำดับ ได้ร้อยละจำนวนหมู่แทนที่อัลดีไฮด์ (% Aldehyde content) มีค่า 14.80, 29.49, 47.15, 63.41, 81.46 และ 93.05 ตามลำดับ จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มโดยวิธีการเทหล่อโดยมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการทดสอบ FTIR พบว่าพบพีคที่สำคัญ คือ 1735 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ที่ตำแหน่ง C-2 และ C-3 จากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อร้อยละโดยโมลของเปอร์ไอโอเดตเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรอยยุบบริเวณผิวและเป็นรูบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้ง เนื่องจากส่วนที่เป็นออสันฐานถูกทำลาย ความเป็นผลึกของแป้งลดลง และยังพบว่าการดูดซับความชื้นลดน้อยลง [6] นอกจากนี้งานวิจัยของ S.D. Zhang และคณะได้ทำการศึกษาสมบัติของแป้งไดอัลไธไฮด์โดยใช้สารออกซิไดส์ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (NaIO_4) เซอร์ริกแอมโมเนียมไนเตรต (CAN) และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) โดยพบว่า NaIO_4 มีประสิทธิภาพการออกซิไดส์ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลที่เท่ากัน จากการนำแป้งไดอัลไธไฮด์จากการออกซิไดส์โดย NaIO_4 มาทำปฏิกิริยากับสารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ เกิดเป็นแป้งอะซิทัลไดอัลไธไฮด์ ที่คาร์บอนตำแหน่ง C-2 และ C-3 เพื่อปรับปรุงสมบัติ พบว่า แป้งอะซิทัลไดอัลไธไฮด์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด $305\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งไดอัลไธไฮด์ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษเพื่อปรับปรุงสมบัติของแป้งไดอัลไธไฮด์เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่ยังคงต้องการพัฒนา เช่น สมบัติทางเชิงกล สมบัติการดูดความชื้น และสมบัติทางความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเพกทินมาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของแป้งไดอัลไธไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เนื่องจากเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีปริมาณการผลิตมากภายในประเทศไทย และเพกทินมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับแป้งมีสมบัติเป็นสารก่อเจล โดยจะเตรียมแป้งไดอัลไธไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังและใช้โซเดียมเปอร์ไอโอเดตเป็นสารออกซิไดส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม โดยนำแป้งไดอัลดีไฮด์ที่สังเคราะห์ได้ผสมเพกทินในอัตราส่วนที่ต่างกันและขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อ แล้วนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน การทดสอบสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการบวมตัว การวัดความหนืด การดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์ม ซึ่งมีความคาดหวังว่าฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น และหวังว่าจะสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันได้ เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และฟิล์มที่ใช้ในงานเกษตรกรรม เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โซเดียมเปอร์ไอโอดेटในอัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกัน
- 2) เพื่อเตรียมฟิล์มผสมจากแป้งไดอัลดีไฮด์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วยเพกทิน
- 3) เพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มจากแป้งไดอัลดีไฮด์และปรับปรุงสมบัติด้วยเพกทิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โซเดียมเปอร์ไอโอดेटอัตราส่วนโดยโมลของแป้งไดอัลดีไฮด์ต่อโซเดียมเปอร์ไอโอดेट คือ 1:0, 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ
- 2) ศึกษาแนวทางการขึ้นรูปแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังและเพกทินในอัตราส่วนที่ต่างกัน
- 3) ศึกษาสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติการบวมตัว และสมบัติการย่อยสลายได้ของฟิล์มที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โซเดียมเปอร์ไอโอดेटเป็นสารออกซิไดส์
- 2) สามารถเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่สามารถย่อยสลายได้จากแป้งไดอัลดีไฮด์และเพกทิน
- 3) สามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ณ ปัจจุบัน ตลอดจนในอนาคต
- 4) เพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีปริมาณการผลิตที่สูงในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) คำนี้ใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1830 โดยมีนักเคมีชื่อ H.V. Regnault หมายถึง สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดจากการรวมกันของโมเลกุลเล็กจำนวนมากด้วยพันธะโคเวเลนต์ คำว่าน้ำหนักโมเลกุลสูงหมายถึงมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 20,000 ขึ้นไป ถ้าโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่า มอนอเมอร์ มีโครงสร้างเหมือนกันมารวมกันเรียกพอลิเมอร์นั้นว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามอนอเมอร์ต่างชนิดกันมารวมกัน เรียกพอลิเมอร์นั้นว่า โคพอลิเมอร์ หรือ พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ปฏิกริยาที่มอนอเมอร์รวมกันเรียกว่าการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerisation) ซึ่งอาจมีจำนวนมอนอเมอร์เป็นล้าน พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลอิสระซึ่งอาจต้องการลดขนาดของโมเลกุลลงต้องทำลายพันธะโคเวเลนต์ระหว่างมอนอเมอร์

2.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์

แบ่งตามพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ในเรื่องของการนำพอลิเมอร์ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยผ่านความร้อน ได้แก่

2.1.1.1 เทอร์โมพลาสติก

พอลิเมอร์ชนิดนี้จะอ่อนตัวและไหลเมื่อได้รับความร้อนและนำไปขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีรูปร่างตามภาชนะหรือแม่พิมพ์ สามารถนำพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้วมาหลอมได้อีก กระบวนการนี้เกิดซ้ำได้หลายครั้ง เพราะว่าพอลิเมอร์ประเภทนี้ไม่มีพันธะเชื่อมโยงโครงร่างที่เกิดขึ้นในขณะเป็นของแข็ง ประมาณร้อยละ 90 ของพอลิเมอร์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นเทอร์โมพลาสติก ตัวอย่าง เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอไมด์ และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลท

2.1.1.2 เทอร์โมเซต

พอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนผสมหลายชนิดทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เมื่อได้รับความร้อนแล้วเปลี่ยนสถานะจากของไหลหนืดเป็นของแข็ง เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงโครงร่างแห เมื่อขึ้นเป็นรูปร่างใดแล้ว ไม่สามารถหลอมหรือละลายได้อีก เพราะมีพันธะเชื่อมโยงจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งตรงข้ามกับเทอร์โมพลาสติก ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้วหรือยางสังเคราะห์ หากมาพันธะเชื่อมโยงอยู่จำนวนไม่มากนัก จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นและบวมตัวในตัวทำละลายที่เหมาะสมได้ แต่หากมีพันธะเชื่อมโยงอย่างจะแข็ง วัสดุที่มีสมบัติแบบนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นเทอร์โมพลาสติก ก่อนการเกิดพันธะเชื่อมโยง และเป็นเทอร์โมเซตหลังเกิดพันธะเชื่อมโยงโครงร่างแห ตัวอย่าง เช่น ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ [8]

2.2 การย่อยสลายของพลาสติก

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) ว่าหมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากการสูญเสียคุณสมบัติ

2.2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

2.2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

2.2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวีหรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

2.2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอมไธดเรต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ (Enzyme) ต่าง ๆ เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Nonenzyme) เช่น โลหะแอสคาไลต์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมีสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่

เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.2.1.4 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้เอนไซม์ภายในเซลล์ (Endoenzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบใช้เอนไซม์นอกเซลล์ (Exoenzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ [9]



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลาย [1]

2.2.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย มีดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ
 C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้
 C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d/C_i) * 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.2.2.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น เช่น พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่า พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณแป้งต่ำ

2.2.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

1. การใช้กล้องจุลทรรศน์

สามารถวิเคราะห์ได้โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบรูขนาดเล็กในพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและแป้ง เมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือน และนำมาล้างก่อนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงถึงแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

2. การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งฝังไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาวซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน

2.2.2.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัวไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์ สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรดใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมี CO_2 เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวัดจากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.2.2.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

1. การวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไปโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)
2. การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
3. การศึกษาโดยใช้ TGA ใช้วิเคราะห์ปริมาณแ่งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.2.2.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 X 120 มิลลิเมตรหลาย ๆ ตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมาการทดสอบใช้เวลาประมาณ 2 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน [1]

2.3 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง

สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้เป็นกลุ่มดังนี้

2.3.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

ในกลุ่มนี้จะมีการใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90% ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปที่เรียกว่าแผ่นแป้งเจลาติไนซ์ (Gelatinized starch puff) หรือ แผ่นแป้งจากเครื่องอัดรีด (Plate expanded by extrusion) หรือ แป้งพองตัวจากแรงน้ำ (Baking with water) โดยการให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ

2.3.1.1 โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกจากหัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟมสำหรับอุ้มอากาศ ทั้งนี้สมบัติของโฟมแป้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ปริมาณน้ำ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง

2.3.1.2 โฟมจากแป้ง

เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่นเยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

2.3.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ได้จากกลุ่มนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแป้งหรือแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่เอกลำนี้เป็นเอกลำที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถย่อยได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแบ่งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์บนพื้นผิวของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

2.3.2.1 ในรูปเม็ดแข็ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี และนำไปขึ้นรูปเลยโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก โดยปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดด้วยแรงดันสูงหรือเครื่องอัดรีด (Extruder) อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่น ๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพดซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเอง (Auto-oxidant) เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดิน เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ (Peroxide radical) ซึ่งเข้าไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีให้ได้โอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่เล็กลงง่ายต่อการสลายต่อไป

2.3.2.2 ในรูปแป้งเจลาตินไนซ์

วิธีนี้แบ่งจะแตกตัวออกทั้งหมดผสมรวมกับอนุพันธ์ของปิโตรเคมีที่หลอมละลาย โดยแบ่งมันสำปะหลังได้ใช้ผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในเชิงเปรียบเทียบกับแบ่งแหล่งอื่นๆ (Pranamuda และคณะ, 1996) ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากส่วนผสมของแบ่งมันสำปะหลังและโพลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) โดยแบ่งมันที่ใช้จะอยู่ในรูปของแบ่งเจลาทีนซ์ (Chollakup และคณะ, 1993) ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแบ่งที่ใช้ เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่า ส่วนผสมที่มีเม็ดแบ่งเจลาทีนซ์ 30% และ PCL 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

2.3.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

สามารถใช้แบ่งได้ทั้งในรูปเม็ดแบ่งและแบ่งเจลาทีนหุ้ม การทำปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรซ์เซชันเริ่มจากการทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เนื่องจากความหลากหลายของระบบที่ใช้ทำปฏิกิริยามีมากกว่าและปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระจะใช้กับโมโนเมอร์ได้หลายชนิดมากกว่า [10] โดยวิธีการทำแบ่งกราฟท์โคพอลิเมอร์มี 2 วิธี คือ วิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ขึ้นกับชนิดของมอนอเมอร์ เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของแบ่งไอออนของมอนอเมอร์ปโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งในแบ่งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย [1]

2.4 แป้ง (Starch)

ผลิตมาจากส่วนของพืชที่มีการสะสมอาหาร เช่น เมล็ดของข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด ถั่วเหลือง มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเทศ และ เผือก นำมาผ่านกระบวนการทำให้ละเอียดด้วยวิธีการบดหรือโม่ซึ่งมีทั้งวิธีแบบแห้ง (Dry Milling) และวิธีแบบเปียก (Wet Milling) แบ่งที่ผลิตได้โดยทั่วไป จะมีลักษณะเป็นผงแห้ง มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ผลิต [11]

แบ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แบ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของ น้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (Reducing end group) แบ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์ เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แบ่งจากแหล่งที่ต่างกันมี อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิด ต่างกัน

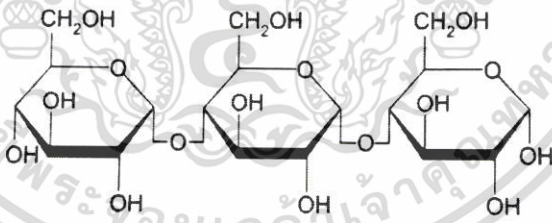
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [1]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด (หน่วยกลูโคส)	200 - 2000	มากกว่า 10000
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะ จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

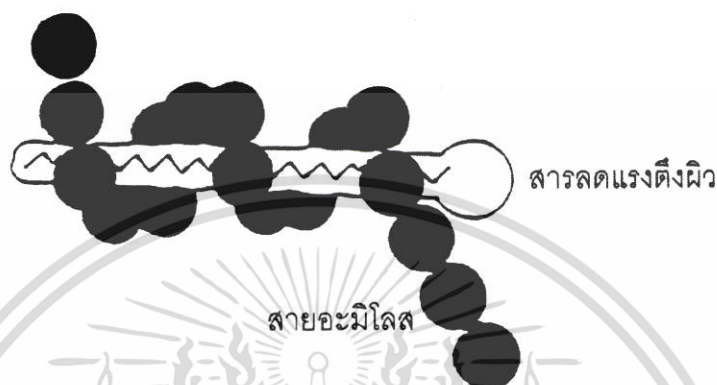
2.4.1.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด แอลฟา-1,4 ดังรูปที่ 2.2



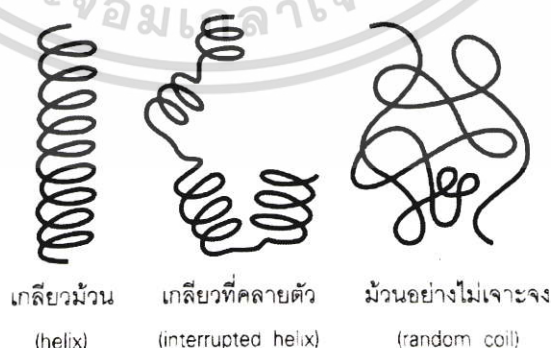
รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะมิโลส [1]

อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.3 นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์ [1]

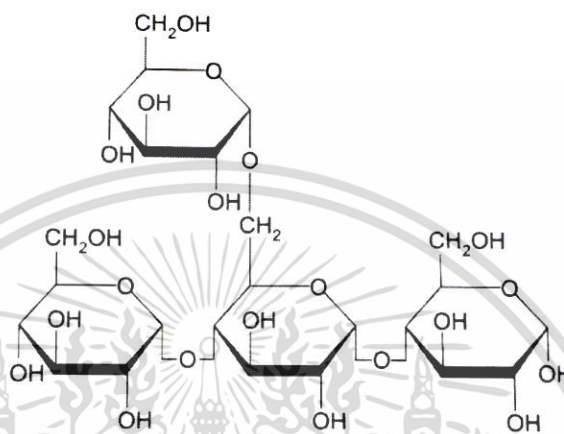
ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน และส่วนผลึกโครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังรูปที่ 2.4 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.4 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส [1]

2.4.1.2 อะมิโลเพคติน

อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization : DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิด α -1,6 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะมิโลเพคติน [1]

หน่วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิด α -1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพคตินทั้งหมด ขนาดของโมเลกุลของอะมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพคตินมีขนาดของโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวที่ต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นกิ่ง

ขนาดของอะมิโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพคตินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ไกลเคียงกัน

อะมิโลเพคตินถือว่ามีความสำคัญทั้งทางด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะมิโลเพคตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะมิโลส และอะมิโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกันโดยปริมาณและสัดส่วนอะมิโลส และอะมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิด [1]

	แป้งมัน ฝรั่ง	แป้ง ข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด เหนียว
อะมิโลส (%น้ำหนักแห้ง)	21	28	28	17	0
อะมิโลเพคติน (%น้ำหนักแห้ง)	79	72	72	83	100
สัดส่วนจำนวน อะมิโลสต่อ อะมิโลเพคติน	200	1,000	1,000	150	0

2.4.1.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพคตินแต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์พบว่าสารตัวกลางในแป้งสาลีจะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับอะมิโลเพคตินแต่มีกิ่งที่สั้นกว่า นอกจากนี้มีรายงานว่าสารตัวกลางในแป้งข้าวโอตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะมิโลสแต่มีสัมพรรคภาพไอโอดีน (Iodine affinity) และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน (Blue value) ต่ำกว่าอะมิโลสแต่มากกว่าค่าของอะมิโลเพคติน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพคติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช

2.4.1.4. ไขมัน

โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความหนืด ไขมันภายในเม็ดแป้งมีทั้งที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ กลูโคลิพิด ฟอสโฟลิพิด และไขมันที่กระจายอยู่ทั่วไปภายในเม็ดแป้ง โดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวม ๆ ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและสมบัติของแป้ง โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง เมื่อเกิดฟิล์มและแป้งเปียก ไขมันจะรวมตัวกับอะมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฉื่อยทำให้ฟิล์มและแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะส่งผลให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่สำหรับไขมันที่รวมตัวกับอะมิโลสจะไม่ทำให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

2.4.1.5 ไนโตรเจน (โปรตีน)

ภายในเม็ดแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวของเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาทีนเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.6 เถ้า

แ่งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ปริมาณเถ้าในแ่งมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในแ่ง สำหรับเถ้าในแ่งจากธัญพืชสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัส

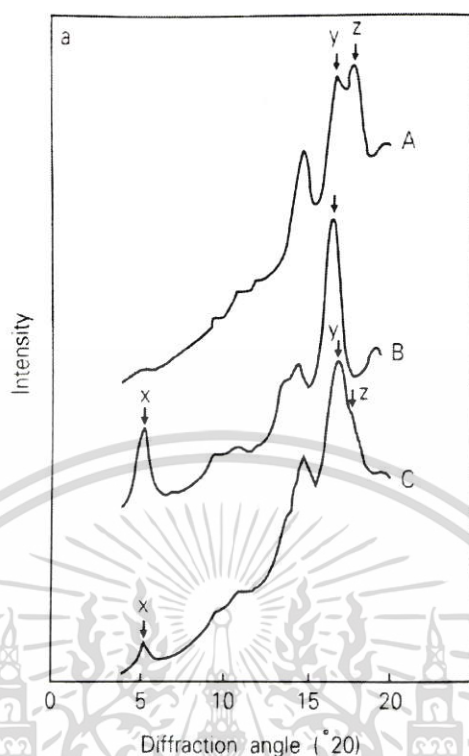
2.4.1.7 ฟอสฟอรัส

แ่งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1% โดยแ่งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัส ประมาณ 0.02–0.06% และสำหรับแ่งจากพืชหัวและราก เช่น แ่งจากมันฝรั่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 0.3–0.4% ฟอสฟอรัสภายในแ่งอยู่ในรูป ฟอสเฟสเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส แ่งมันฝรั่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสจึงทำให้มีประจุพื้นผิวเป็นลบ แรงผลักระหว่างประจุลบทำให้แ่งมันฝรั่งมีสมบัติพองตัวง่าย และมีความหนืดสูงกว่าแ่งชนิดอื่น ๆ

2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแ่ง

แ่งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปของเม็ดแ่ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแ่งชนิดต่าง ๆ ด้วย SEM พบว่าเม็ดแ่งมีขนาด รูปร่างที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแ่งนั้น ๆ

เม็ดแ่งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแ่งทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก และส่วนอสัณฐาน ดังรูปที่ 2.6 ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแ่งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแ่งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A จะให้พีค 2 θ ที่ 17 และ 17.9° แต่ไม่มีพีคที่ 5.6° ถ้าเรียงตัวกันหลวม ๆ จะเกิดเป็นผลึกแบบ B จะให้พีค 2 θ ที่ 5.6 และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ 17.9° และถ้าเกิดการจัดเรียงตัวแบบ A และ B รวมกันจะจัดเป็นแบบ C จะให้พีค 2 θ ที่ 5.6 และ 17.9° ตามลำดับ โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงที่ต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแ่งได้โดยเทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ (Wide angle x-ray diffraction, WAXS) แ่งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction) แตกต่างกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.6 รูปแบบการหักเหรังสีเอกซ์ของเม็ดแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [1]

เม็ดแป้งจะมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) ดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าในเม็ดแป้งมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ร้อยละ 25 ถึง 50 ในแป้งจากหัวหรือราก ส่วนอะมิโลเพคตินมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกและส่วนอะมิโลสอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานโดยปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.7 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด [1]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ (°C)	ปริมาณอะมิโลส
โครงสร้าง A			
ข้าวโอต	33	60.7	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
ข้าวโพดเหนียว	40	72.7	0
โครงสร้าง B			
สาคุ	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	38	70.0	20
มันสำปะหลัง	38	66.0	17

2.4.3 สมบัติของแป้ง

2.4.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในสภาวะบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่มีอิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งได้แป้งคาร์โบไฮเดรต

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าอุณหภูมิช่วงเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนถูกทำลายโมเลกุลของน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น สมบัติของการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ในเม็ดแป้งหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง การตัดแปรทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

2.4.3.2 ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืด ได้แก่ ชนิดของแป้ง และการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่าง ๆ

-ชนิดของแป้ง

โดยจากการแบ่งประเภทของแป้งตามกราฟแสดงความหนืด ตามวิธีของ Schoch และ Maynard (1968) สามารถแบ่งรูปแบบความหนืดของแป้งสูกที่วัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคมิ-โลกราฟ (Brabender viscoamylograph) ตามกำลังการพองตัวของแป้ง แบ่งเป็น 4 แบบ คือ

1. เม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูง (High-swelling starches) เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวฟ่าง แป้งจากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนเม็ดแป้งมีกำลังการพองตัวที่สูง ทำให้แรงยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดแป้งกระจายตัวออกเมื่อได้รับแรงเฉือน
2. เม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง (Moderate-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ เม็ดแป้งไม่พองตัวมากถึงขั้นกระจายตัวออก
3. เม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย (Restricted-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากถั่วต่าง ๆ และแป้งครอสลิงหรือพันธะข้าม (Cross-linked) วิธีครอสลิงทำให้การพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง ทำให้เม็ดแป้งพองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น
4. เม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (Highly-restricted swelling) ได้แก่ แป้งที่มีอะมิโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพดอะมิโลเมส ซึ่งมีอะมิโลส 50 ถึง 80%

-การดัดแปรแป้ง

1. การดัดแปรแป้งทางกายภาพ เช่น แป้งพรีเจลาไทไนซ์ สามารถกระจายตัวในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง
2. การดัดแปรด้วยกรดหรือเบสหรือเอนไซม์ ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบที่ได้มีลักษณะใสและแข็งกว่าแป้งดิบ
3. การดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แป้งเอสเทอร์ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบและคงความหนืดไว้ได้ดี มีอุณหภูมิที่เกิดความหนืด ต่ำกว่าแป้งดิบลักษณะเจลใส คงตัวต่ออุณหภูมิต่ำในสภาวะการขึ้นรูปจากเยือกแข็ง
4. การดัดแปรด้วยวิธีการครอสลิง แป้งที่ได้สามารถรักษาความหนืดไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง

นอกจากปัจจัยทั้งสองที่กล่าวมาแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องอันเนื่องมาจากชนิดของแป้งเมื่อวิเคราะห์ คือขนาดของเม็ดแป้ง ปริมาณอะมิโลส กล่าวคือ ขนาดของเม็ดแป้งที่ใหญ่มีกำลังการพองตัวสูงและให้ความหนืดสูงสุด แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงย่อมแสดงถึงค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ที่สูงด้วยเช่นกัน

2.4.3.3 การเกิดเจลาไทไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydropilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห ดังนั้นการจัดเรียงลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายได้ในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนคลายตัวลง เม็ดแป้งดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใส อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาไทไนซ์ เมื่อตรวจด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือ เวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเจลลาตินในเซชันในเม็ดแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัดความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารละลายน้ำแป้ง จะเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลลาตินในเซชัน

2.4.3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดการเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามามีความหนืดคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึกเรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือ การคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้นโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

2.4.4 สมบัติของแป้งฟิล์ม

แป้งฟิล์มจะมีสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์ม และความเป็นเงามัน

แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดีกว่าแป้งสาลี จึงเหมาะสมในการอบแห้งมากกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งฟิล์มที่ได้จากแหล่งแป้งที่ต่างกันมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่างกัน และมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ต่างกัน แป้งฟิล์มมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง แป้งฟิล์มที่ได้นำไปใช้ในผลิตภัณฑ์กาว เช่น ใช้ทำกาวของจดหมาย แสตมป์ กระดาษกาว

แป้งฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวเหนียวมีความใสและเป็นมันเงามากกว่าแป้งฟิล์มจากแป้งธัญพืช เนื่องจากในระหว่างการทำให้แห้งและการเก็บรักษา แป้งจากธัญพืชจะเกิด รีโทรเกรเดชัน โมเลกุลของอะมิโลสจะเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำทำให้แป้งฟิล์มขุ่น และเปราะแตกง่าย [1] คุณสมบัติของฟิล์มจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด [1]

สมบัติ	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวโพดเหนียว
ความใส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
การละลาย	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความเรียบ-ยืดหยุ่น	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความแข็งแรง-เหนียว	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง

2.5 แป้งมันสำปะหลัง

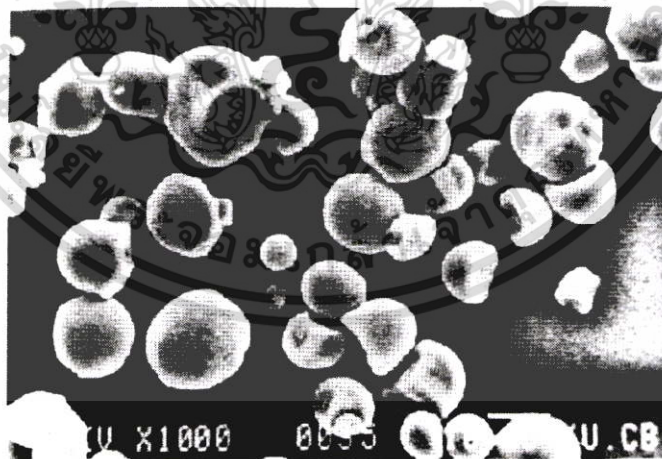
2.5.1 ถิ่นกำเนิด

ถิ่นกำเนิดของมันสำปะหลังอาจกล่าวได้ว่าอยู่ในอเมริกาใต้ บราซิล/เม็กซิโก มีการเรียกชื่อต่างๆ กันตามรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส เช่น Cassava, Mandioca, Yucca, Tapica และ Manioc ในทางพฤกษศาสตร์มันสำปะหลังเป็นพืชในวงศ์ (Class) ใบเลี้ยงคู่ (Dicotyledoneae) ตระกูล (Family) *Euphobiaceae* มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. (แต่เดิมเรียกว่า *Manihot utilisima* Pohl.)

2.5.2 ลักษณะทั่วไป

มันสำปะหลังเป็นพืชที่สะสมอาหารไว้ในรากเมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้ง ไว้ในรากองค์ประกอบส่วนรากนอกจากประกอบด้วยแป้งร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด [12]

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีแป้งอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (<1%) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ตั้งแต่ 2 ถึง 8 เม็ดมารวมกันแต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 5 ถึง 35 ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร บางเม็ดอาจมีริมด้านโค้งอีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ กัน เม็ดแป้งเหล่านี้แสดงให้เห็นรอยบุ๋ม (Eccentric hilum) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [13]



รูปที่ 2.8 ขนาดและรูปร่างของแป้งมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1000 เท่า [1]

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีอะไมโลสค่อนข้างต่ำคือ 18-23% และมีขนาดแตกต่างกัน โดยมีค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ตั้งแต่ 1,100 ถึง 3,220 โดยโครงสร้างของอะไมโลสประกอบ

ด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นกิ่ง โดยอัตราส่วนของโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงต่อโครงสร้างที่เป็นกิ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.58 ต่อ 0.42 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวโพด

2.5.3 สมบัติของของแป้งมันสำปะหลัง

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อนพลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองขึ้น ซึ่งกำลังการพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะมิโลส และอะมิโลเพกทิน เป็นต้น โดยแป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของอะมิโลสที่เป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และอะมิโลสอาจจับตัวกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะมิโลสต่ำจึงมีการพองตัวที่ดีและมีค่าความสามารถในการละลายได้ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว โดยค่ากำลังการพองตัวซึ่งวัดได้จากน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวอย่างอิสระในน้ำต่อน้ำหนักแห้งของแป้งมีค่าประมาณ 50 และการละลายได้ประมาณ 35% ที่อุณหภูมิ 95 °C ซึ่งมีค่ามากกว่าแป้งข้าวโพด แต่ต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง

ในระหว่างที่ให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และเม็ดแป้งเริ่มดูดซึมน้ำจากภายนอกนั้น เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวพร้อม ๆ กับที่เม็ดแป้งสูญเสียความสามารถในการบดระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเป็นแบบผันกลับไม่ได้และเม็ดแป้งเกิดเจลลาติไนซ์ขึ้น แป้งแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นและช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์แตกต่างกัน โดยแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์อยู่ในช่วง 58-70 °C

โดยทั่วไปเมื่อเม็ดแป้งที่พองตัวได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะแป้งเปียก (Paste) ที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นตัวลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิและมีการกวนอยู่ตลอดเวลาสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบอิงยวด (Rapid Visco Analyzer) หรือ บราเบนเดอร์ วิสโคอะมิโลกราฟ (Brabender Viscoamylograph) แป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนจะมีค่าการพองตัวจึงให้ความหนืดสูง แต่แป้งเปียกยังคงได้รับความร้อนและแรงกลอย่างต่อเนื่องจะมีความหนืดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้ง เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก [1]

2.6 แป้งดัดแปร

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว โดยแป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีการดัดแปรแป้ง เรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ได้จากการนำแป้ง มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่าง เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

1.การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) แบ่งออกเป็น

- การเกิดอนุพันธ์ (Derivertization)
- การลดขนาดโมเลกุลของแป้งโดยกรด (Acid thinning)
- เดกซ์ทรินไนเซชัน (Dextrinization)
- ออกซิเดชัน (Oxidation)
- การย่อยสลาย (Hydrolysis)

2.การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

- เจลาทีไนเซชัน (Gelatinization)
- แป้งละลายน้ำเย็น (Granular-cold-water-soluble-starch : GCWSS)
- การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล
- แอนนัล (Annealing)
- การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment)

3. การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม เช่น แป้งข้าวเหนียว (Waxy starch) คือ แป้งที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย และแป้งที่มีอะไมโลสสูง (High-amylose starch)

2.6.2 การดัดแปรทางเคมี

2.6.2.1 การเกิดอนุพันธ์ (Derivertization)

แป้งดัดแปรที่ได้จากการเกิดอนุพันธ์ เรียกว่า อนุพันธ์ของแป้ง (Starch derivatives) แบ่งชนิดของปฏิกิริยาการดัดแปรออกเป็น 3 ชนิด คือ

- อีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแทนอีเทอร์ ($R = -CH_3$) โดยนำแป้งมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีหมู่อีเทอร์ จะได้แป้งที่มีคุณสมบัติมีการคั่นตัวน้อยลง แต่ละหมู่ที่เข้ามาแทนที่จะทำให้แป้งมีประสิทธิภาพในการลดการคั่นตัวของแป้งได้ต่างกัน หมู่แทนที่สายโซ่ยาวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าหมู่แทนที่ที่มีความยาวเท่ากัน หมู่ที่มีประจุจะมีประสิทธิภาพมากกว่าหมู่ที่ไม่มีประจุ อนุพันธ์ในการเกิดเจลาทีไนซ์ต่ำลง ทำให้แป้งสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น
- เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแทนเอสเทอร์ ($R = -COCH_3$) จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่เอสเทอร์ของสารเคมีแป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ทางการค้า ได้แก่ แป้งแอซิเตด โดยมีสมบัติ คือ มีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลมีความใส มีความอ่อนตัวและยืดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการแช่แข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ครอสลิงกิง (Cross-linking) เป็นปฏิกิริยาที่ได้อาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแบ่งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (Multifunctional reagent) โดยสามารถเกิดผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันหรืออีเทอร์ริฟิเคชัน โดยขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแบ่งได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้าม (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแบ่งในสภาพแขวนลอย พันธะโควาเลนต์ช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแบ่งไว้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแบ่ง เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแบ่งโดยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพมีแรงเฉือน

2.6.2.2 การลดขนาดโมเลกุลของแบ่งโดยกรด (Acid thinning)

การผลิตแบ่งดัดแปรโดยการลดขนาดโมเลกุลของแบ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแบ่งกับกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง กระบวนการผลิตโดยทั่วไปเริ่มจากการนำสารละลายแบ่งร้อยละ 36-40 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิดเจลที่ในเซชัน (ประมาณ 40-60°C) เติมกรด กวนเป็นระยะเวลาหนึ่งจนถึงหลายชั่วโมง จนได้ความหนืดที่ต้องการจากนั้นปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็นกลาง กรองล้างและทำให้แห้ง ชนิดของกรดที่ใช้ เช่น กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก [15] กรดตัดโมเลกุลของแบ่งทำให้โมเลกุลของแบ่งมีขนาดเล็กลง ทำให้ได้เม็ดแบ่งมีสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ และสมบัติไม่ละลายน้ำเย็นเหมือนกับแบ่งดิบ แต่มีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ ในขณะที่ให้ความร้อนเม็ดแบ่งที่ย่อยด้วยกรดจะแตกออกได้เปื่อยเป็นของเหลวใสที่มีความหนืดลดลง จึงสามารถให้ความร้อนแก่แบ่งที่มีความเข้มข้นสูงได้แต่เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการคืนตัวทำให้สูญเสียความใสได้เป็นเจลแข็งทึบแสงเหมาะแก่การขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

2.6.2.3 เดกซ์ทรีโนเซชัน

การดัดแปรแบ่งโดยวิธีเดกซ์ทรีโนเซชัน เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับแบ่งแห้งที่มีลักษณะเป็นกรด เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะ α -1,4 และการโพลิเมอไรซ์ใหม่ (Re-polymerisation) ในเม็ดแบ่ง มีสมบัติสำคัญ คือ สามารถละลายในน้ำเย็นได้เพิ่มขึ้น มีความหนืดขณะร้อนลดลง ฟิล์มที่ได้มีสมบัติการยึดเกาะดีกว่าฟิล์มจากแบ่งดิบ ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารพวกครีมเทียม ลูกกวาด เนื่องจากมีความสามารถในการละลายได้สูงและมีความหนืดน้อยกว่าจึงทำให้ใช้งานได้สะดวกและระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็ว

2.6.2.4 ออกซิเดชัน

การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน เป็นการนำแบ่งมาทำปฏิกิริยาสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง สมบัติเคมี และขนาดของโมเลกุลเม็ดแบ่งเปลี่ยนไป ได้แบ่งดัดแปรออกซิไดซ์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะเปลี่ยนหมู่ $-OH$ เป็นหมู่ $-CHO$, $-CO$ และ $-COO$ มีการตัดโมเลกุลแบ่งเกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ทำให้แบ่งมีความขาวขึ้น ได้แบ่งที่มีประจุลบเนื่องจากมีหมู่ $-COO$ เข้าไปอยู่ในอะมิโนส ทำให้อัตราการคืนตัวของแบ่งเปื่อยลดลง แบ่งเปื่อยที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้แบ่งเปื่อยที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ สารละลายแบ่งเปื่อยและฟิล์มมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแบ่งขาวขึ้น และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เพราะมีการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ ณัฐยา พุนสุวรรณ และคณะ พบว่าปริมาณโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ระยะเวลา และค่าความเป็นกรดต่างขณะทำปฏิกิริยาส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิล และค่าความหนืดของแป้งดัดแปร สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแป้งดัดแปรจาก แป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยสาร โซเดียมไฮโปคลอไรท์ คือ สภาวะที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต่อแป้งเท่ากับ 18 : 100 อุณหภูมิ $28 \pm 10^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และค่าความเป็นกรดต่างขณะทำปฏิกิริยาเท่ากับ 9.5 [16]

2.6.2.5 การย่อยสลายโดยเอนไซม์

สามารถผลิตได้โดยผสมแป้งและเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยการให้ความร้อนสัมผัสโดยตรง (Direct steam injection) เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาได้โดยเพิ่มอุณหภูมิ เอนไซม์ที่ใช้อยู่ ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส เป็นต้น

2.6.3 การดัดแปรทางกายภาพ

2.6.3.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์

แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพโดยการให้ความร้อนแก่แป้งทำให้แป้งสุกแล้วทำให้แห้ง ได้แป้งดัดแปรที่มีสมบัติความสามารถละลายและการกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็นหรืออุณหภูมิห้องมีแนวโน้มการเกิดเจลที่ลดลงสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่สามารถละลายและให้ความหนืดได้ทันที โดยไม่ต้องให้ความร้อน

2.6.3.2 แป้งละลายน้ำเย็น

แป้งละลายน้ำเย็นผลิตได้จากการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และเบส โดยเตรียมได้จากการนำแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ มาแขวนลอยในสารละลายเอทานอล (ในสัดส่วน 1 : 20 โดยน้ำหนัก) และปรับสภาพด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ที่แปรสัดส่วนเท่ากับ 2.0-6.0 โดยน้ำหนัก [17] แป้งละลายน้ำเย็นมีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งพรีเจลทำให้แป้งพรีเจลเสียรูปในลักษณะของเม็ดแป้ง และมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่อนำไปอบแห้ง แต่แป้งละลายน้ำเย็นยังคงสภาพของเม็ดแป้งอยู่

2.6.3.3 การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล

การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกลที่สามารถควบคุมปัจจัยที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิ จะทำให้ได้เม็ดแป้งที่มีขนาดเล็ก ๆ และมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล ที่สามารถทำปฏิกิริยาจะมีมากขึ้น แป้งที่ได้จากการลดขนาดทางกล นำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ การนำไปใช้แทนส่วนของไขมันในอาหารจำพวกไอศกรีม

2.6.3.4 การแช่

การแช่ (Annealing) ทำการแปรรูปโดยใช้ความร้อน ในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนซ์ เม็ดแป้งจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในระดับของผลึก แรงจับตัวระหว่างผลึกกับอสังฐานจะเปลี่ยนไปเช่นกัน แต่ลักษณะของผลึกเมื่อตรวจสอบโดยรังสีเอกซ์จะไม่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการเจลาติไนซ์จะเปลี่ยนไปอย่างมาก

2.6.3.5 การแปรรูปด้วยความร้อนขึ้น

การแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นปกติ คือ การให้ความร้อนแก่แป้งมากกว่า 100°C โดยที่แป้งมีความชื้นมากกว่าปกติเล็กน้อย คือ ประมาณ 18–27 % และเวลานาน ๆ ได้แป้งที่มีการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของผลึก สมบัติทางความร้อนและความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป

2.6.4 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ

2.6.4.1 แป้งชนิดมีอะมิโลสสูง

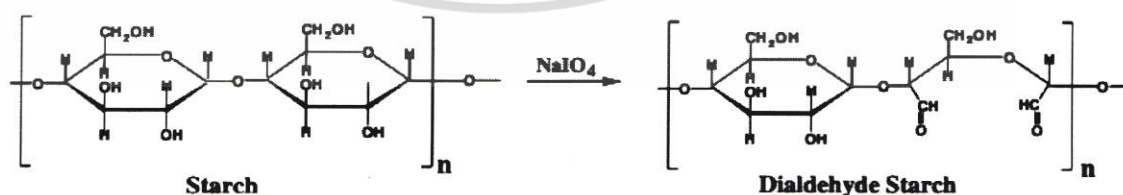
แป้งชนิดอะมิโลสสูง เป็นแป้งที่มีอะมิโลสสูงพบในพืชบางชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าว บาร์เลย์ มีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเนื้อสัมผัสที่คงทน ไม่แตกง่ายใช้เป็นสารเคลือบเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ ใช้เป็นกาวที่มีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจากมีอะมิโลสสามารถยึดเกาะกับเซลลูโลสได้ดีและยึดติดแน่นมากกว่าอะมิโลเพคติน และไม่สามารถชะออกได้โดยน้ำร้อน เหมือนกับอะมิโลเพคติน

2.6.4.2 แป้งอะมิโลเพคติน

แป้งอะมิโลเพคตินเป็นแป้งที่ประกอบด้วยอะมิโลเพคตินเพียงอย่างเดียวพบในธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเกิดการกลายพันธุ์ไม่มีองค์ประกอบของอะมิโลสทำให้มีสมบัติที่ไม่เกิดการคืนตัวหรือการคืนตัวเพียงเล็กน้อย มีความมันเงาสูง สามารถทำให้ชุ่มน้ำได้อย่างรวดเร็วจึงมีการใช้ในอุตสาหกรรมกาว เพื่อผลิตเทปกาวหรือใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในกาว นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เคลือบผ้าชั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ผ้ามีความมันเงาและคงทน [1]

2.7 แป้งไดอัลดีไฮด์

แป้งไดอัลดีไฮด์เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่ได้จากการดัดแปรทางเคมีจากแป้งธรรมชาติ โดยถูกนำออกซิไดส์ โดยสารออกซิไดซ์กรดเปอร์ไอออนิก ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง กรดเปอร์ไอออนิกจะทำให้หน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) เกิดการแตกออกของพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 2 และ 3 (C-2 และ C-3) เกิดเป็นหมู่อัลดีไฮด์ [18] ดังรูปที่ 2.8

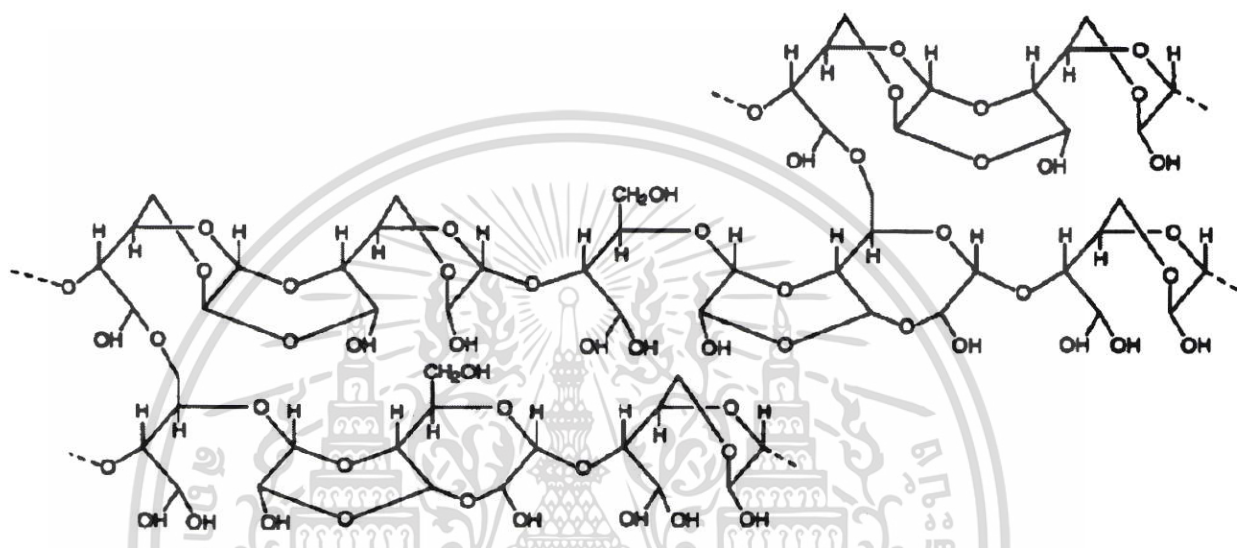


รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการเกิดแป้งไดอัลดีไฮด์ [19]

เม็ดแป้งของแป้งไดอัลดีไฮด์เมื่อถูกออกซิไดซ์ จะมีปริมาณหมู่แทนที่เพิ่มสูงขึ้น การเกิดเจลของแป้งเกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งมีความแข็งแรง เพราะมีหมู่อัลดีไฮด์ในโครงสร้างเกิดแรงยึด

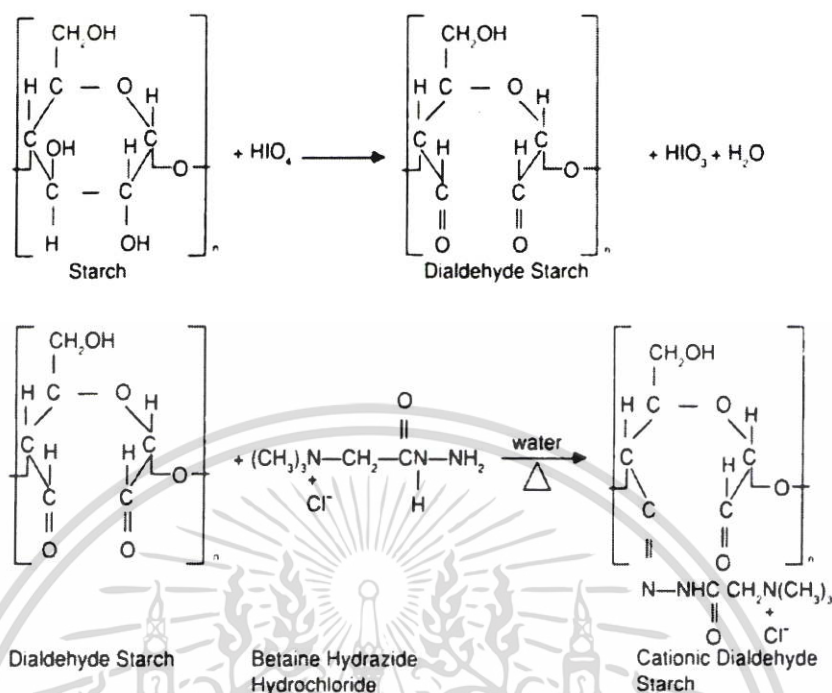
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนียวกันภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง (Intragranular hemiacetalization) รูปที่ 2.9 แป้งไดอัลดีไฮด์มีความสามารถในการละลายที่ต่ำ ไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยแป้งไดอัลดีไฮด์จะสามารถเกิดเจลได้ หากเพิ่มอุณหภูมิ แรงเฉือน หรือใส่แป้งที่ไม่ได้ดัดแปรผสมนอกจากนี้ แป้งไดอัลดีไฮด์ซึ่งมีแรงกระทำดังกล่าวส่งผลให้ ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งลดลงดังรูปที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร ทำให้แป้งมีความหนืดลดลง ความเป็นผลึกลดลง และต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลได้ที่สูงขึ้น [20]



รูปที่ 2.10 พันธะเชื่อมโยงที่คาดว่าจะเกิดในแป้งไดอัลดีไฮด์ [21]

แป้งไดอัลดีไฮด์ถูกใช้เป็นสารเชื่อมโยง (Cross linking agent) กับสารที่มีหมู่อะมิโน (Amino group) ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ [13] เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงขณะเปียก รวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใย และวงการเภสัชกรรม [9]



รูปที่ 2.11 การนำแป้งไดอัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ [22]

2.8 เพคติน

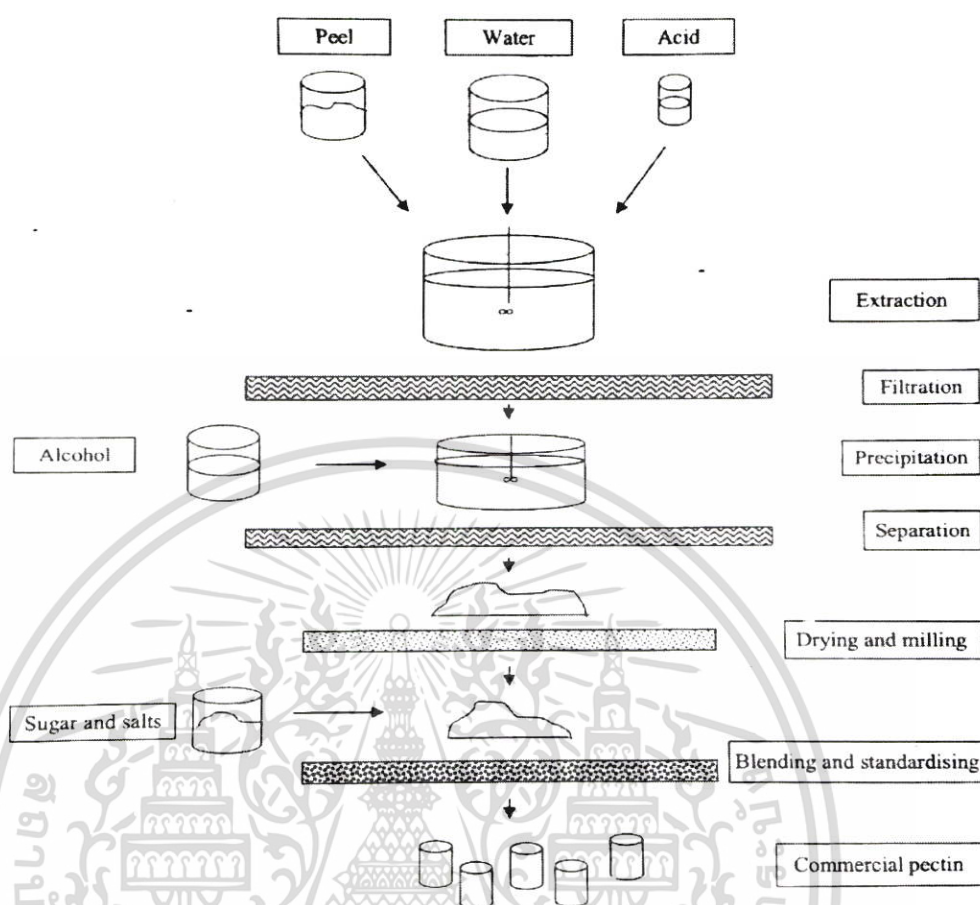
เพคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) จัดอยู่ในสารประเภทคาร์โบไฮเดรต เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่เป็นโครงสร้างของพืชชั้นสูงเกือบทุกชนิด ถูกค้นพบในศตวรรษที่ 18 ทำหน้าที่เป็นสารก่อกาว ในปี ค.ศ. 1825 Henry Braconot ได้ตั้งชื่อและศึกษาวิธีการสกัดเพคติน เพคตินมาจากคำว่า “Peptikos” ซึ่งเป็นภาษากรีก หมายถึง ทำให้ข้นแข็ง โดยคำนียามของเพคติน คือ เป็นกรดเพคตินิกชนิดละลายน้ำได้ ซึ่งมีหมู่เมทิลเอสเทอร์ หลากหลาย สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มีน้ำตาลและมีความเป็นกรดที่เหมาะสม หรือมีแคลเซียมไอออนร่วมอยู่ด้วย [23]

สารประกอบเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์และเป็นสารสำคัญในบริเวณชั้นผนังเชื่อมยึดระหว่างเซลล์ หรือเซลล์ชั้นกลาง (Middle lamella) ที่ยึดเข้าด้วยกันโดยจับกับ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และไกลโคโปรตีนของผนังเซลล์พืช [24] เพคตินจะช่วยเสริมผนังเซลล์ให้หนาแข็งแรง และยืดหยุ่นได้เล็กน้อย โดยเฉพาะบริเวณที่มีเนื้อเยื่อ อ่อนนุ่ม เช่น ต้นอ่อน ใบ และผล

2.8.1 กระบวนการผลิตเพคติน

การผลิตเพคตินทางการค้ามีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถการละลายน้ำได้ โดยสมบัติที่ควรคำนึงถึง คือ ค่าองศาการเกิดหมู่เมทิลจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Degree of methyl esterification : DE) และมวลโมเลกุล การผลิตเพคตินสามารถผลิตได้จากการสกัดด้วยสารละลายกรดที่มีอุณหภูมิสูงตามด้วยขั้นตอนของการตกตะกอนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ขั้นตอนการผลิตเพคตินแสดงดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตเพคติน [5]

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการนำเปลือกและกากผลไม้ที่คั้นน้ำออกแล้ว มาใส่ในสารละลายกรดที่มีการให้อุณหภูมิเพื่อแยกส่วนที่เป็นผนังเซลล์ออกโดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จากสภาวะความเป็นกรดและอุณหภูมิที่สูงในขั้นตอนนี้มีข้อควรระวัง คือ การแช่เปลือกในสารละลายกรดในเวลาที่ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกพอลิเมอร์ (De-polymerisation) และการแตกออกของหมู่เมทิลที่พันธะเอสเทอร์ (Methyl de-esterification) สภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 50-90 °C เป็นเวลา 3-12 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรดต่าง 1-3 สำหรับการผลิต LM จะเลือกใช้สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำและมีความเป็นกรดเนื่องจากสภาวะดังกล่าวจะก่อให้เกิดการไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ มากกว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพันธะไกลโคซิดิกและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกของแข็งออก และการสกัดจะเลือกใช้ปริมาณน้ำมากในขั้นเริ่มต้น เพคตินสามารถถูกสกัดได้ในสภาวะที่เป็นด่างและกลาง ที่อุณหภูมิห้อง แต่เพคตินจะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดที่ตำแหน่งเบต้า (β -elimination) กล่าวคือ พันธะไกลโคซิดิก จะเกิดการแตกออกจึงทำให้มีมวลโมเลกุลที่ต่ำ ดังนั้นการสกัดเพคตินในสภาวะที่เป็นกลางและด่างจึงไม่เป็นที่นิยม

ขั้นตอนต่อมา คือ ขั้นตอนของการกรองเพื่อแยกสารละลายกรดที่มีเพคตินกับเนื้อเยื่อที่ไม่ละลายน้ำออกจากกันการกรองที่มีประสิทธิภาพควรใช้ค่าความหนืดที่ต่ำขึ้นอยู่กับชนิดของเพคติน สารละลายเพคตินที่ได้จากการกรอง จะถูกนำมาระเหยจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จากนั้น

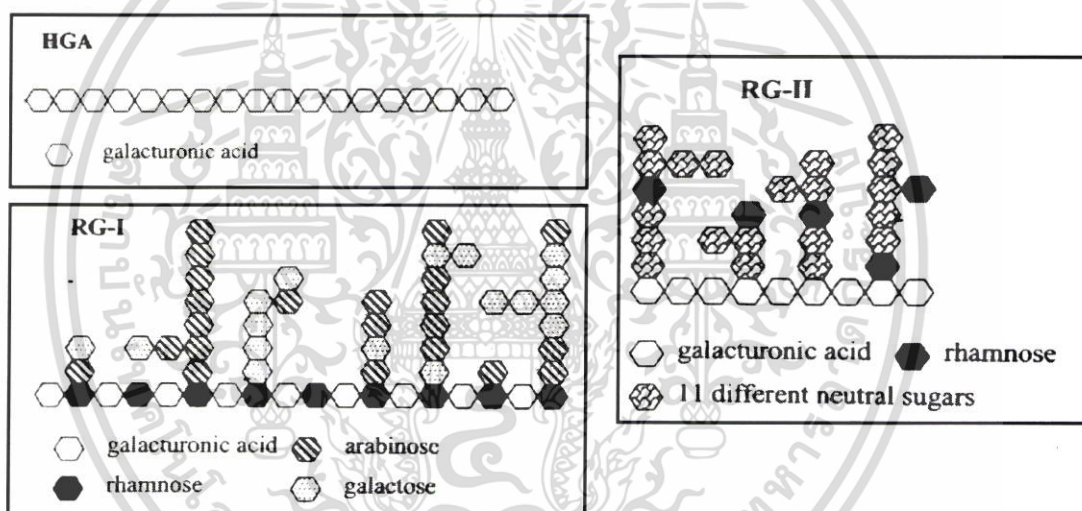
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปตกตะกอนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งเพคตินจะต้องไม่ละลายในตัวทำละลายนั้นแต่สิ่งเจือปนที่มีอยู่ในสารละลายกรดสามารถละลายได้ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้เพื่อตกตะกอน คือ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) หรือ ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) จากนั้นทำการล้างตะกอนที่ได้ เพื่อกำจัดตัวทำละลายอินทรีย์ที่ตกค้าง และนำตะกอนที่ได้ไปอบเป็นผงให้ได้ขนาดตามความต้องการ

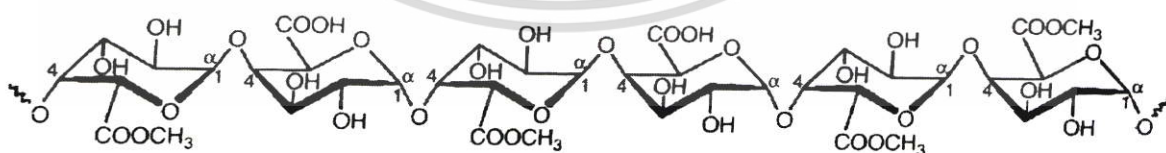
2.8.2 โครงสร้างของเพคตินจากธรรมชาติ

เพคตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนพบในชั้นระหว่างเซลล์โดยเคลือบเส้นใยเซลลูโลส และอาจเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่น ๆ ด้วยพันธะโควาเลนต์ มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 คือ

1. โฮโมกาแลคโตรูแนน (Homogalactorunan : HGA)
2. แรมโนกาแลคโตรูแนน I (Rhamnogalactorunan : RG-I)
3. แรมโนกาแลคโตรูแนน II (Rhamnogalactorunan : RG-II)



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของเพคตินจากธรรมชาติ [5]



รูปที่ 2.14 หน่วยกรดกาแลคทูโรนิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 [5]

ส่วนแรก คือ HGA เป็นโฮโมพอลิเมอร์สายโซ่ตรงเชื่อมต่อกันด้วย α -1,4 ของกรดกาแลคทูโรนิก (Galacturonic acid) ยาวประมาณ 100-200 หน่วย โดยการสังเคราะห์จะเริ่มจากส่วนที่เรียกว่า กอลจิแอปพาราตัส (Golgi apparatus) จากนั้นจะถูกส่งต่อมายังเนื้อเยื่อเซลล์ชั้นกลาง และสิ้นสุดที่ผนังเซลล์ชั้นต้น (Primary cell wall) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงต้นการสังเคราะห์ของเพคติน มีการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) สูงที่สุดแต่เมื่อสารประกอบเพคตินถูกส่งมายังผนังเซลล์ของพืชการเกิดเอสเทอร์ริฟิเคชันลดลง ส่งผลให้ค่าองศาการเกิดหมู่เมทิลจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Degree of methyl esterification : DE) ของกรดกาแลคโทโรนิกเหลือ 60-90% ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาชั้นของผนังเซลล์ที่สกัด และความสูงของผลไม้อายุผนังเซลล์พืชที่แตกออกและต้นไม้ที่เจริญเติบโตเต็มที่ที่มีค่าองศาการเกิดหมู่เมทิลจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ต่ำ

ส่วนที่สอง RG-I เป็นส่วนที่มีความหลากหลายและเป็นโซ่กิ่งโดยสายโซ่หลักประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลแรมโนส (Rhamnose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,2 และกรดกาแลคโทโรนิกที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 ยาวประมาณ 100 โมเลกุลปลายสุดของสายโซ่จะเชื่อมต่อกับกรดกาแลคโทโรนิกที่บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 และ 3 ของน้ำตาลแรมโนสเชื่อมต่อกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกาแลคโตสและอะราบินอส

ส่วนที่สาม คือ RG-II ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์หลักของกรดกาแลคโทโรนิก 9 หน่วย มีสายโซ่กิ่งประกอบด้วยน้ำตาลแรมโนสและน้ำตาลธรรมชาติชนิดต่าง ๆ 11 ชนิด

2.8.3 ประเภทของเพคติน

เพคตินทางการค้าที่มีการนำมาใช้จะทำการสกัด RG-I และ RG-II ออกจากโครงสร้างของเพคตินจากธรรมชาติ เพคตินทางการค้าแบ่งออกโดยใช้ค่า DE เป็น 2 ชนิด คือ

2.8.3.1 เพคตินที่มีเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin : HM)

เป็นสารเพคตินที่มี ค่า DE ไม่ต่ำกว่า 50% ในทางการค้าจะอยู่ในช่วง 55-75% การเกิดเจลของเพคตินชนิดนี้จะต้องมีองค์ประกอบที่เหมาะสม คือ มีปริมาณน้ำตาล 55-65% ค่าความเป็นกรดต่าง อยู่ในช่วง 2.5-3.8 เพคตินชนิดเมทอกซิลสูงสามารถแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดเจลได้ 6 ชนิด คือ

- Ultra rapid set pectin มีค่า DE 82%
- Extra rapid set pectin มีค่า DE 76%
- Rapid set pectin มีค่า DE 72%
- Medium rapid set pectin มีค่า DE 65-69%
- Slow set pectin มีค่า DE 60-64%
- Extra slow set pectin มีค่า DE 55-59%

2.8.3.2 เพคตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin : LM)

เป็นสารเพคตินที่มีค่า DE ต่ำกว่า 50% ส่วนใหญ่มีค่า DE อยู่ในช่วง 20-45% เพคตินชนิดนี้สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจำเป็นต้องมีไอออนโลหะที่ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งคือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะใช้ปริมาณน้ำตาลเพียงเล็กน้อย และเกิดเจลได้ในสภาวะช่วงความเป็นกรดต่าง 3.0-4.5 ในการผลิตจะต้องมีการดีเอสเทอร์ริไฟด์โดยใช้เอทิลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ หรือถ้าใช้สารแอมโมเนียมร่วมกับต่างในกระบวนการ จะเรียกว่า Amidated low methoxyl pectin จึงต้องหาค่า DE ร่วมกับค่าองศาการมีหมู่เอไมด์ (Degree of amidation : DA) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างกรดกาแลคโทโรนิกที่มีหมู่เอไมด์ส่วนต่อหน่วยของกรดกาแลคโทโรนิกทั้งหมด นอกจากนี้เพค-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชนที่มีเมทอกซิลต่ำ สามารถจำแนกได้ตามอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยากับอนุพลของ Ca^{2+} ได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. มีความสามารถในการเกิดเจลได้ช้า เนื่องจากมีความไวต่อ Ca^{2+} ต่ำ ได้มาจากเพคตินดีเอสเทอร์รีไฟด์จากเซลล์ชั้นต้น
2. มีความสามารถในการเกิดเจลได้เร็ว เนื่องจากมีความไวต่อ Ca^{2+} สูง ได้มาจากเพคตินดีเอสเทอร์รีไฟด์จากเซลล์ชั้นกลางหรือเพคตินที่มีโครงสร้างของกรดกาแลคทูโรนิกที่ต่อกันแบบบล็อก

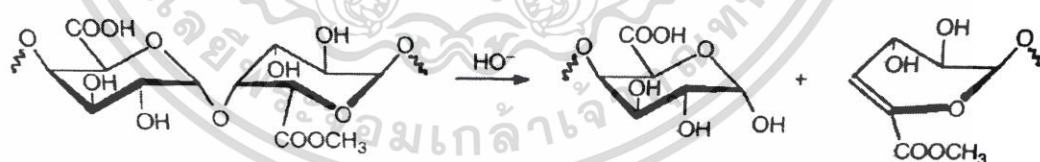
2.8.4 สมบัติของเพคติน

2.8.4.1 ความเป็นกรดต่าง

เพคตินมีสมบัติเป็นกรดอ่อนในสภาวะที่เป็นกลางเพคตินมีประจุเป็นลบ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างลดลงค่าประจุจะเป็นศูนย์เพราะเพคตินมีพฤติกรรมเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolytes) คือ สารที่สามารถแตกตัวได้เป็นไอออนและอยู่รวมกลุ่มกันเป็นจำนวนมาก โดยมีค่า pK_a เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีองศาการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิกบนสายโซ่พอลิเมอร์กรดกาแลคทูโรนิก โดยค่าจะอยู่ในช่วง 2.9-3.3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ pK_a ของกรดกาแลคทูโรนิก คือ 3.5

2.8.4.2 ความคงตัว

เพคตินสามารถเสื่อมสภาพได้จากปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์รีไฟเคชันใหม่ (Re-esterification) และปฏิกิริยาการแตกพอลิเมอร์ (De-polymerisation) เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้เพคตินยังสามารถถูกทำลายได้ด้วยเอนไซม์ โดยเพคตินจะคงสภาพได้ในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่าง 3.5-4.0 ในสภาวะที่เป็นกลางและต่างเพคตินซึ่งมีสายโซ่หลักเป็นกรดกาแลคทูโรนิก เกิดการแตกออกของพอลิเมอร์ที่พันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาการแตกพอลิเมอร์ (De-polymerisation) ของกรดกาแลคทูโรนิก [5]

นอกจากนี้แล้วเพคตินที่มีหมู่เมทิล เอสเทอร์ (Methyl ester) และหมู่อะซีทิล (Acetyl) อาจถูกเปลี่ยนไปโดยปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification) ในสภาวะที่ค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 3 และอุณหภูมิต่ำจะเกิดการสลายพันธะ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการแตกออกของพันธะไกลโคซิดิกในสายโซ่หลัก

2.8.4.3 การละลาย

ความสามารถการละลายของเพคตินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ความแข็งแรงของไอออน ชนิดของเคอร์เตอร์ไอออน และปริมาณของแข็งที่ละลายได้โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้วเพคตินจะสามารถละลายได้ในน้ำแต่จะไม่ละลายในแอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อใส่ผลเพคตินลงไปผสมกับน้ำ จะเกิดลักษณะเป็นก้อนได้ง่าย สารละลายเพคตินมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian) คือ มีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วในการปั่นกวนจึงส่งผลอย่างมากต่อการละลายได้ของเพคติน หากใช้ความเร็วในการปั่นกวนสูง สามารถเตรียมสารละลายเพคตินที่มีความเข้มข้นได้สูงถึง 10% แต่หากไม่ใช้ความเร็วรอบในการผสมสามารถเตรียมสารละลายเพคตินได้มีความเข้มข้น 3-4% เท่านั้น

2.8.4.4 ความหนืด

ความหนืดของเพคตินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.5% จะมีสมบัติการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (Shear rate) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น จะแสดงสมบัติการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian) โดยมีพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิง (Shear-thinning) คือ มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เมื่อหยุดให้แรงเฉือน เพคตินมีความหนืดสูงขึ้นทันที ความหนืดของเพคตินไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับ ชนิดของเพคติน ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ มวลโมเลกุล โดยเพคตินที่มีมวลโมเลกุลสูงจะมีความหนืดที่สูงและมีความแข็งแรงมากกว่าเพคตินที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

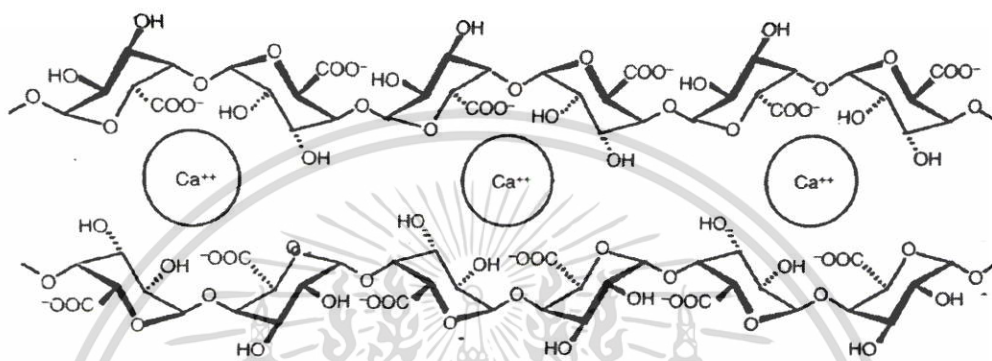
2.8.4.5 การเกิดเจล

- การเกิดเจลของเพคตินที่มีเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin : HM)

การเกิดเจลของ HM สามารถเกิดได้ในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด และมีปริมาณน้ำน้อย โดยค่าความเป็นกรดต่างที่สามารถเกิดเจลได้อยู่ในช่วง 2.5 -3.8% และมีปริมาณของแข็งละลายได้อยู่ในช่วง 55-85% อย่างไรก็ตาม HM จะสามารถเกิดเจลได้หากค่าปริมาณของแข็งละลายได้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 55% แต่มีค่า DE ที่สูง และมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 3.8 หรือ มีค่า DE ที่สูง สามารถอธิบายได้ดังนี้หากปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีปริมาณมาก แสดงว่ามีปริมาณน้ำน้อย เกิดแรงกระทำระหว่างสายโซ่ของเพคตินกระทำระหว่างกัน มากกว่าสายโซ่ของเพคตินจะมีแรงกระทำกับตัวทำละลาย และจำเป็นต้องมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ ๆ เป็นเพราะ ค่าความเป็นกรดลดการเกิดการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักกันระหว่างสายโซ่ ทำให้เกิดเจลได้ยาก กลไกการเกิดเจลของ HM เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกที่ไม่เกิดการแตกตัวกับ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (Secondary alcohol) และการเกิดแรงกระทำกันเองระหว่างหมู่เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ภายในโครงสร้าง นอกจากนี้การเพิ่ม DE และค่าความเป็นกรดต่าง จะทำให้ความสามารถในการเกิดเจลเพิ่มสูงขึ้น

- การเกิดเจลของเพคตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin : LM)

กลไกการเกิดเจลของ LM สามารถเกิดได้โดยมี Ca^{2+} ซึ่งเป็นไดวาเลนต์ แคทไอออน (Divalent cation) สามารถอธิบายได้โดย แบบจำลองกล่องไข่ (Egg-box model) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กล่าวคือ การเกิดเจลโดยอาศัย Ca^{2+} โดยจากโครงสร้างของเพคตินที่มีระนาบสองมิติมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ Ca^{2+} สามารถเข้าไปแทรกระหว่างกลางเกิดเป็นไดเมอร์ (Dimer) ของกรดพอลิ-กาแลคโทรนิก (Polygalacturonic acid) ซึ่ง Ca^{2+} ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างไอออนของหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระที่อยู่บนสายโซ่ LM สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะความเป็นกรดต่ำ ค่าความเป็นกรดต่ำเท่ากับ 6 [5]



รูปที่ 2.16 แบบจำลองกล่องไข่ (Egg-box model) แสดงกลไกการเกิดเจลของ เพคตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin : LM) [5]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Yu และคณะ ทำการศึกษาสมบัติของแป้งไดอัลดีไฮด์ โดยใช้แป้งมันฝรั่งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเปอร์ไอโอเดต ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเปอร์ไอโอเดตต่อแป้ง คือ 0.1 : 1.0, 0.3 : 1.0, 0.5 : 1.0, 0.7 : 1.0, 0.9 : 1.0 และ 1.1 : 1.0 ตามลำดับ ได้ร้อยละจำนวนหมู่แทนที่อัลดีไฮด์ (% Aldehyde content) มีค่า 14.80, 29.49, 47.15, 63.41, 81.46 และ 93.05 ตามลำดับ จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาฟิแลมโดยวิธีการเทหล่อโดยมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการทดสอบ FTIR พบว่าพบพีคที่สำคัญ คือ 1735 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ที่ตำแหน่ง C-2 และ C-3 และพบพีคที่ 1150 cm^{-1} มีความเข้มลดลง ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O ของหมู่ C-OH ในโครงสร้างของแป้ง เพราะเปอร์ไอโอเดตทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแป้งเกิดการแตกออกของพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง C-2 และ C-3 ที่หน่วยของแอนไฮโดรกลูโคสเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล จากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อร้อยละโดยโมลของเปอร์ไอโอเดตเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรอยยุบบริเวณผิวและที่ปริมาณของอัลดีไฮด์ (Aldehyde content) ร้อยละ 93.05 เป็นรูปบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้ง เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดแป้งที่มีส่วนที่เป็นผลึกอยู่บริเวณผิวด้านนอก ส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งอยู่ด้านในจึงถูกทำลายได้ง่าย จากผลของการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD) พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ NaIO_4 : แป้ง เท่ากับ 0.5 ความเป็นผลึกของแป้งลดลง เมื่อขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาฟิแลม พบว่าความเป็นผลึกของแป้งลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลและน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แทรกระหว่างโมเลกุลของแป้ง จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อปริมาณอัลดีไฮด์มีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาฟิแลม (TPDAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Elongation at break) และการดูดซับความชื้นลดน้อยลง [6]

S.D. Zhang และคณะได้ทำการศึกษาสมบัติของแป้งไดอัลดีไฮด์โดยใช้สารออกซิไดส์ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (NaIO_4) เซอริกแอมโมเนียมไนเตรด (CAN) และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) โดยพบว่า NaIO_4 มีประสิทธิภาพการออกซิไดส์ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลที่เท่ากัน โดยได้แป้งไดอัลดีไฮด์ที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl content) สูงที่สุดมีค่าร้อยละ 48.2 จากนั้นนำแป้งไดอัลดีไฮด์จากการออกซิไดส์โดย NaIO_4 ที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลร้อยละ 35.2 มาทำปฏิกิริยาต่อยด้วยสารประกอบแอลกอฮอล์ที่ต่างชนิดกัน คือ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) ไกลคอล (Glycol) และ ออกตะนอล (Octanol) เพื่อปรับปรุงสมบัติเกิดเป็นแป้งอะซีทัลไดอัลดีไฮด์ ที่คาร์บอนตำแหน่ง C-2 และ C-3 โดยพบว่าค่าองศาการเกิดหมู่อะซีทัล (Degree of acetal formation : DAF) ของแป้งไดอัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากมีความเกาะกะของโครงสร้างน้อยที่สุด จากการทดสอบ FT-IR พบว่าปรากฏพิกที่ 1735 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) แต่เมื่อนำแป้งไดอัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับสารประกอบแอลกอฮอล์พบว่าพิกดังกล่าวมีความเข้มลดลง และเกิดพิกที่ตำแหน่ง 1115 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ เมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า แป้งอะซีทัลไดอัลดีไฮด์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด $305\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้เมทานอลซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่มีค่า $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]

S.D. Zhang และคณะ เตรียมแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งถั่วลิสง (Pea starch) โดยมี NaIO_4 ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับไกลคอล (Glycol) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อน และขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (TPDAS) โดยใช้กลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของหมู่คาร์บอนิลสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแป้งต่อ NaIO_4 ถึง 1.0 และลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.5 และเมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับไกลคอลมีปริมาณของหมู่อะซีทัลอยู่ในช่วงร้อยละ 81-84 จากการทดสอบ FT-IR พบว่าปรากฏพิกที่ 1735 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ของอัลดีไฮด์ แต่พิกดังกล่าวไม่ปรากฏเมื่อนำแป้งอะซีทัลไปทดสอบ เนื่องจากไกลคอลเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง C-2 และ C-3 แทนที่หมู่อัลดีไฮด์ นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับไกลคอล เมื่อมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลสูงขึ้น ความหนืดของแป้งลดลง แสดงถึงมวลโมเลกุลที่ลดลง ทำให้คุณสมบัติของการสลายตัวของสารที่ร้อยละ 5 ($T_{5\%}$) มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง แต่เมื่อนำแป้งไดอัลดีไฮด์มาทำปฏิกิริยาต่อกับไกลคอลเกิดเป็นแป้งอะซีทัลไดอัลดีไฮด์ พบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากไกลคอลเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอัลดอล (Aldol condensation) จึงเกิดพันธะ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าหมู่อัลดีไฮด์ จากการทดสอบ XRD พบว่าแป้งที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากกว่าร้อยละ 30 ไม่มีความเป็นผลึก สำหรับสมบัติทางเชิงกล TPS ของแป้งอะซีทัลไดอัลดีไฮด์ที่มีปริมาณหมู่อะซีทัล (Acetal content) ร้อยละ 95 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile strength) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงสูงสุด (% Elongation at break) เท่ากับ 18.1 MPa และร้อยละ 5.3 ตามลำดับ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.R. Coffin และคณะ ศึกษาฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ระหว่างแป้งข้าวโพดชนิดอะมิโลสสูง กับเพคตินจากแหล่งที่มา 3 ชนิด คือ เพคตินจากพืชตระกูลส้มที่มีค่าองค์การเกิดหมู่เมทิลจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Degree of methyl esterification : DE) ร้อยละ 71 (DE71) หัวบีท (Sugar-beet pectin) และอัลมอนด์ (Almond pectin) ใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อ โดยการเตรียมสารละลายแป้งเจลาตินไนซ์ มาผสมกับสารละลายเพคตินที่ผสมกับกลีเซอริน โดยเตรียมอัตราส่วนของ DE71 ต่อแป้งข้าวโพดชนิดอะมิโลสสูง เท่ากับ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 65 : 35 และ 55 : 45 ตามลำดับ และใช้กลีเซอรินที่ร้อยละ 15, 30, 45, 60 และ 75 ตามลำดับ จากสมบัติเชิงกล พบว่า สูตร 90 : 10 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดลดลง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงสูงสุดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรินมากกว่าร้อยละ 45 ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดลดลง และที่ปริมาณกลีเซอรินร้อยละ 60 และ 75 ไม่สามารถทดสอบค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงสูงสุดได้ เมื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงกลทางไดนามิก (Dynamic mechanical analysis : DMA) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอริน ค่ามอดุลัสลดลงในทุก ๆ อุณหภูมิ ในสูตรที่มีปริมาณแป้งต่ำ คือ 100 : 0 และ 90 : 10 และสูตรที่มีปริมาณของแป้งมากกว่าร้อยละ 10 พบว่าปริมาณกลีเซอรินไม่มีผลต่อการลดลงของมอดุลัส เนื่องจากแป้งมีความเป็นผลึกมากกว่าเพคติน เมื่อเพิ่มปริมาณของแป้งจึงทำให้ผลของกลีเซอรินส่งผลต่อสมบัติน้อยลง ค่าแดมปีง (tan- δ) ของทุก ๆ สูตร มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แสดงถึงชิ้นงานมีความนิ่มขึ้น ฟิล์มจาก DE71 มีความทนทาน และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิถึง 180°C ฟิล์มจากเพคตินของหัวบีทมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับฟิล์มจาก DE71 นอกจากนี้ฟิล์มเพคตินจากอัลมอนด์มีสีน้ำตาล ในขณะที่ฟิล์มจากพืชตระกูลส้มและหัวบีทให้ฟิล์มที่ไม่มีสี [25]

M.L.Frushman และคณะ เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งข้าวโพดชนิดอะมิโลสสูงกับเพคตินที่มีค่าองค์การเกิดหมู่เมทิลจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Degree of methyl esterification : DE) ร้อยละ 71 เตรียมโดยเจลาตินไนซ์แป้ง 0.7 กรัม ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับสารละลายเพคตินเตรียมโดยใช้เพคติน 1.05 กรัม ในน้ำ 20 มิลลิลิตร และใช้กลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ 0.75 กรัม จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลทางไดนามิก พบว่า สูตรที่ไม่มีองค์ประกอบของแป้ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในช่วง -100 ถึง 180°C เมื่อใส่กลีเซอรอลปรากฏการเปลี่ยนสถานะ 3 ช่วง โดยขั้นแรกมีการเปลี่ยนสถานะที่ อุณหภูมิต่ำกว่า -50°C ขั้นที่สองสูงกว่าอุณหภูมิห้องแต่ต่ำกว่า 100°C และช่วงที่ 3 คือ ที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C และการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล ทำให้ค่ามอดุลัสต่ำลง จากฐานฐานวิทยาพบว่า พันผิวของเทอร์โมพลาสติกที่มีองค์ประกอบของเพคตินและกรีเซอรอล มีลักษณะไม่เรียบเป็นสันนูน คล้ายรอยแตกเรียงกันเป็นเส้นขนาน แต่เมื่อมีองค์ประกอบของแป้งพบว่า มีส่วนที่เป็นผิวเรียบของเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น แสดงถึงการยึดเกาะกันดีระหว่างเพคตินและแป้ง จากการทดสอบ FT-IR พบว่าปรากฏพิกัดการสั่นของไอออนคาร์บอกซิลเลท (Carboxylated ion : -COO⁻) อยู่ในช่วง 1609 – 1616 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพิกัดที่สำคัญของโครงสร้างของเพคติน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมที่สุด คือ ร้อยละ 30 [26]

R. Wongsagon และคณะ ศึกษาสมบัติแป้งไดอัสตีไลต์ จากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กรดเปอร์-ไอโอดีนิกที่เกิดจากโซเดียมเมตาเปอร์ไอโอดेट (Sodium metaperiodate) และกรดไฮโดรคลอริก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารออกซิไดซ์ที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.3 N ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ NaIO_4 เพิ่มมากขึ้น ปริมาณหมู่อัลดีไฮด์และหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มสูงขึ้น ผลึกของแป้งลดลง สมบัติทางความร้อนจากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter : DSC) พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งไดอัลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเฮมิอะซิทัล (Hemiacetal) ภายในโมเลกุล นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการเกิดเจลเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย จากการทดสอบสมบัติการบวมตัว พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C แป้งไดอัลดีไฮด์มีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร และที่อุณหภูมิเพิ่มสูงเป็น 80 และ 90°C ขึ้นกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิที่ 60°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิด เจลของแป้งมันสำปะหลัง เม็ดแป้งบางส่วนสามารถพองตัวได้ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพันธะเฮมิอะซิทัลมีความแข็งแรงลดลง ความเสถียรของเม็ดแป้งลดลง ทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเม็ดแป้งลดลง การพองตัวจึงลดน้อยลงและทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มสูงขึ้น และจากการทดสอบหาค่าองศาพอลิเมอร์ไรเซชันพบว่ามีความลดลงแสดงถึงโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินถูกทำลาย [18]

Y.L. Du และคณะ ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของ TPS และ TPDAS จากแป้งข้าวโพด โดยใช้ NaIO_4 เป็นสารออกซิไดซ์ และใช้กลีเซอรอลร้อยละ 25 เป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยขึ้นงานแต่ละสูตรมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลร้อยละ 6, 30, 50, 70 และ 95 ตามลำดับ โดยศึกษาการย่อยสลายตามมาตรฐาน ISO 14855 (1999) นำชิ้นงานตัวอย่างผสมกับสารย่อยสลายได้ทางอินทรีย์ที่ถูกใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ และบ่มโดยการให้อุณหภูมิ $58 \pm 2^\circ\text{C}$ ในสภาวะบรรยากาศออกซิเจนที่เป็นระบบปิดโดยวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นตัวดักจับ และทำการไทเทรตทำให้ได้ค่าร้อยละการย่อยสลาย พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 56 วัน ค่าร้อยละการย่อยสลายของ TPS, TPDAS6, TPDAS30, TPDAS50, TPDAS70 และ TPDAS75 มีค่า 73.1, 65.91, 55.52, 45.12, 25.60 และ 6.079 ตามลำดับ สามารถแบ่งระยะการย่อยสลายเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรก คือ ช่วงเวลาล่าช้า (Lag phase) เป็นช่วงที่มีอัตราการย่อยสลายช้า ช่วงที่สอง คือ ช่วงเวลาย่อยสลาย (Biodegradable phase) เป็นช่วงที่มีอัตราการย่อยสลายเร็ว และช่วงเวลาคงที่ (Plateau phase) ที่มีอัตราการย่อยสลายคงที่ โดย TPDAS90 มีช่วงเวลาย่อยสลาย อยู่ในช่วงวันที่ 37-52 แต่ TPS อยู่ในช่วงวันที่ 3-25 เนื่องจาก TPDAS มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในโครงสร้าง ทำให้ความมีชีวนะของแป้งลดลง จึงลดความไวต่อเชื้อจุลินทรีย์ทำให้ถูกย่อยสลายได้ช้า [21]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง ตราปลามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ไขมัน	0.25
ความชื้น	< 13
โปรตีน	6.50 – 7.50
คาร์โบไฮเดรต	87
-อะไมโลส	17
-อะไมโลเพคติน	83
เถ้า	0.23
ขนาด	< 160 ไมโครเมตร
ความเป็นกรดต่าง	6 - 7

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น

- 2. โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (Sodium periodate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba จำกัด
- 3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba จำกัด
- 4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba จำกัด
- 5. ไฮดรอกซิลลามีน ไฮดรอกลอไรด์ (Hydroxylamine Hydrochloride) เกรดวิเคราะห์จาก บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 6. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
- 7. อินดิเคเตอร์ เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) บริษัท Rankem
- 8. เอทานอล (Ethanol) เกรดการค้า จาก องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
- 9. เพคตินชนิดผง (Pectin) เกรดอาหาร จาก บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเพคตินชนิดผง

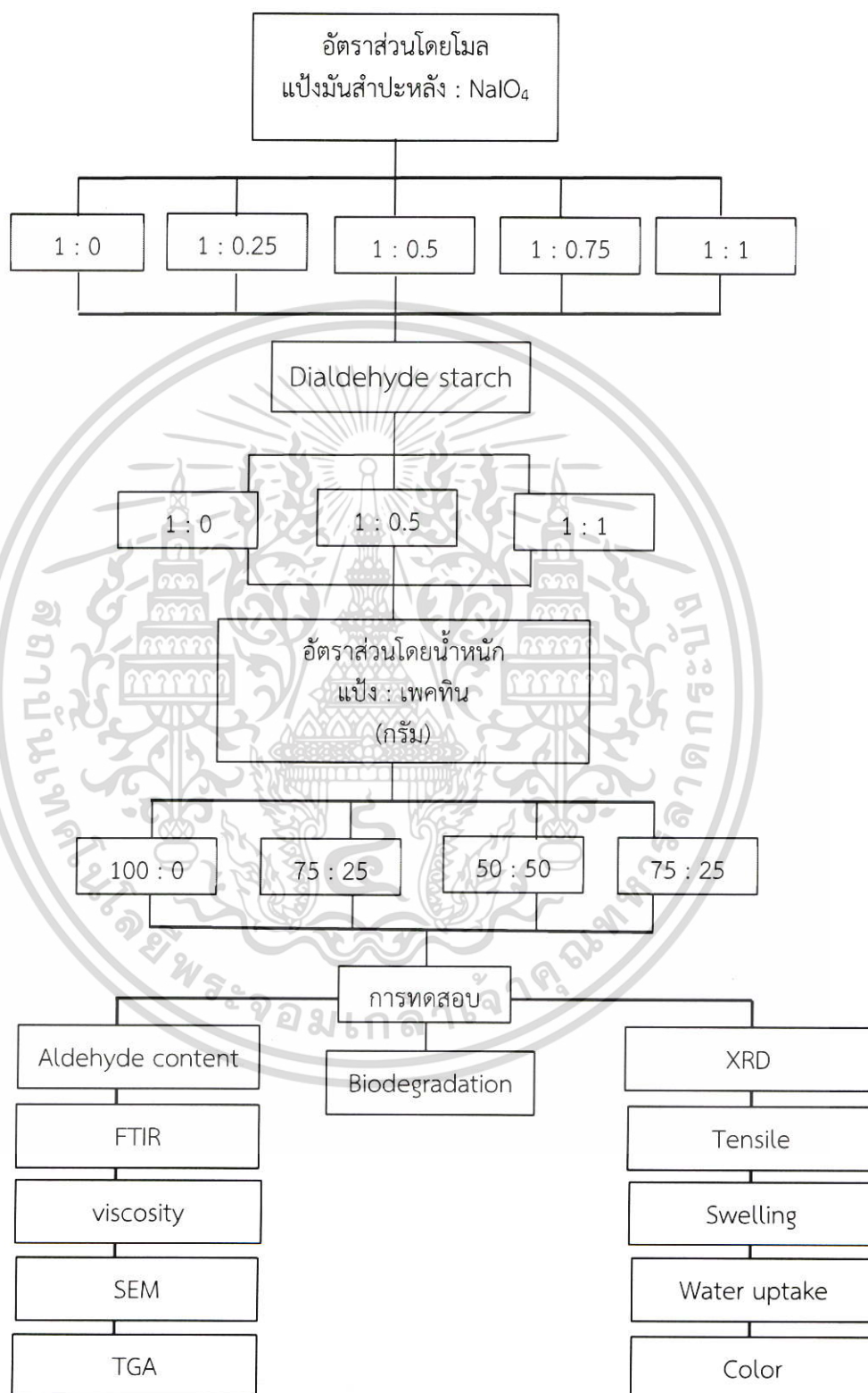
รายละเอียด	ผลวิเคราะห์
Degree of esterification (%)	71.1
Galacturonic acid content (%)	88
Loss on drying (2 h at 105°C) (%)	3.8
pH in a 2% solution unit	3.3

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น MS204TS บริษัท Mettler Toledo
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) รุ่น WNB 22 บริษัท Memmert
3. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
4. มอเตอร์ใบพัดปั่นกวน รุ่น RW 20D บริษัท IKA
5. เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) รุ่น C-MAG HS7 บริษัท IKA
6. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
7. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) รุ่น A-3S บริษัท Eyela
8. ตู้อบ รุ่น UF 110 บริษัท Memmert
9. เครื่องทดสอบแรงดึงประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น LR5k บริษัท LLOYD Instrument
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) LEO รุ่น 1455 VP/LEO
11. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น PYRIS Diamond, Perkin Elmer
12. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) รุ่น SPECTRUM GX, Perkin Elmer
13. เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer) รุ่น LV 2000, Cannan Instrument Company. Co.,Ltd
14. เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น D 8 Advance
15. ภาชนะพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน ขนาด กว้าง 19.4 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร สูง 1.9 เซนติเมตร

แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมแบ่งไดอัลไฮด์จากแบ่งมันสำปะหลัง โดยใช้โซเดียมเปอร์ไอโอเดตเป็นสารออกซิไดส์

1. ชั่งแบ่งมันสำปะหลัง และโซเดียมเปอร์ไอโอเดต โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของแบ่งมันสำปะหลัง : โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (NaIO_4) คือ 1:0, 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3 โดยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยโมลของ แบ่งมันสำปะหลังต่อโซเดียมเปอร์ไอโอเดต และปริมาณของมันสำปะหลัง (กรัม) กับ โซเดียมเปอร์ไอโอเดต (กรัม) ที่ใช้ในการเตรียมแบ่งไดอัลไฮด์

อัตราส่วนโดยโมล แบ่งมันสำปะหลัง : NaIO_4	แบ่ง มันสำปะหลัง (โมล)	NaIO_4 (โมล)	แบ่ง มันสำปะหลัง (กรัม)	NaIO_4 (กรัม)
1 : 1	0.7	0.7	28.35	37.27
1 : 0.75	0.7	0.52	28.35	27.95
1 : 0.50	0.7	0.35	28.35	18.63
1 : 0.25	0.7	0.17	28.35	9.31
1 : 0	0.7	0	28.35	0

2. เตรียมสารแขวนลอยแบ่งมันสำปะหลังทำได้โดยนำแบ่งมันสำปะหลังใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นจนบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเกิดเป็นสารแขวนลอย จากนั้นนำสารละลายแขวนลอยแบ่งมันสำปะหลังเทใส่ขวดปริมาตรโดยขนาด 250 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. สารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต เตรียมโดยนำโซเดียมเปอร์ไอโอเดตละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนสารละลายและปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก จนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นปรับปริมาตรโดยใช้น้ำกลั่นโดยใช้ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

4. นำสารแขวนลอยแบ่งมันสำปะหลังใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร จากนั้นใส่สารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต และผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนสารละลายและปั่นกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก จากนั้นปรับค่า pH เป็น 4 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

5. นำบีกเกอร์สารละลายผสมระหว่างแบ่งมันสำปะหลังและโซเดียมเปอร์ไอโอเดตในข้อที่ 4 หุ้มด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์เพื่อทำในสภาวะพ้นแสง [27] จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ $37 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พร้อมกับการปั่นกวนตลอดเวลา

6. เมื่อครบ 4 ชั่วโมง นำสารละลายแบ่งไดอัลไฮด์มากรองแบบลดความดัน โดยล้างด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร และเอทานอล 250 มิลลิลิตร ตามลำดับ

7. นำแบ่งไดอัลไฮด์อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การเตรียมฟิล์มจากเพคติน

1. ชั่งเพคตินอัตราส่วนของแป้งต่อเพคติน 0:100 แสดงดังตารางที่ 3.4 กลีเซอรอลร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแป้ง และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ดังตารางที่ 3.4
2. นำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อนโดยที่อุณหภูมิ 70°C โดยมีการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที (ระดับความเร็วเบอร์ 2) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำของผสมมาเทลงในภาตเพื่อทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ โดยเทของผสมลงให้ภาตให้ได้น้ำหนัก 70 ± 2 กรัม
4. นำไปอบในตู้อบ ที่สภาวะอุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง
5. ลอกฟิล์มที่ได้ออกจากภาตและนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อควบคุมความชื้น [28]

ตอนที่ 3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไม่ดัดแปรผสมเพคติน

1. ชั่งแป้งมันสำปะหลัง เพคติน และกลีเซอรอล ตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยปริมาณดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5
2. เตรียมสารละลายเพคติน โดยการใส่เพคติน และกลีเซอรอลที่ชั่งจากข้อที่ 1 ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 80 มิลลิลิตร ให้อุณหภูมิ 70°C และปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เพคตินละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและกลีเซอรอล
3. เตรียมสารแขวนลอยแป้ง โดยใช้ น้ำกลั่น 20 มิลลิลิตรผสมกับแป้งที่ชั่งมาจากข้อที่ 1 ที่อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ พร้อมปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
4. นำสารละลายในข้อที่ 3 เทลงในสารละลายเพคติน ผสมให้เข้ากันภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70°C และปั่นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 45 นาทีเพื่อให้สารแขวนลอยของแป้งเกิดการเจลาติไนซ์เป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายเพคติน จากนั้นเทลงบนภาตให้น้ำหนักของสารผสม 70 ± 2 กรัม
5. อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง
6. ลอกฟิล์มที่ได้ออกจากภาตและนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อควบคุมความชื้น

ตอนที่ 4 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไดอัลตีไฮด์ผสมเพคติน

1. ชั่งแป้งไดอัลตีไฮด์ เพคติน และกลีเซอรอลตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยปริมาณแสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5
2. เตรียมสารละลายแป้งโดยนำแป้งไดอัลตีไฮด์และกลีเซอรอลที่ชั่งจากข้อที่ 1 ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนและปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที จนได้ของผสมอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำเพคตินซึ่งมีลักษณะเป็นผง ใส่ลงในสารละลายแป้งไดอัลตีไฮด์ในข้อที่ 2 ในปริมาณเล็กน้อยจนกระทั่งเพคตินหมด เพื่อป้องกันการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของเพคตินในสารละลายแป้งไดอัลตีไฮด์ จากนั้นปั่นกวนอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน
4. นำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ โดยเทของผสมลงให้ภาตให้ได้น้ำหนักของสารผสม 70 ± 2 กรัม และอบที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ลอกฟิล์มที่ได้ออกจากถาดและนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อควบคุมความชื้น

ตารางที่ 3.4 ปริมาณขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติก

ชนิดของแป้ง	อัตราส่วน โดยโมล แป้ง : NaIO ₄	อัตราส่วน แป้ง : เพคติน (กรัม)	แป้ง (กรัม)	เพคติน (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
แป้งไม่ดัดแปร	1 : 0	100 : 0	6	0	2.4	100
แป้ง ไดอัลดีไฮด์	1 : 0.25	100 : 0	6	0	2.4	100
	1 : 0.5	100 : 0	6	0	2.4	100
	1 : 0.75	100 : 0	6	0	2.4	100
	1 : 1	100 : 0	6	0	2.4	100
เพคติน	-	0 : 100	0	6	2.4	100

ตารางที่ 3.5 ปริมาณขององค์ประกอบของแป้งไม่ดัดแปรและแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โม-พลาสติกผสมกับเพคตินในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ชนิดของแป้ง	อัตราส่วน โดยโมล แป้ง : NaIO ₄	อัตราส่วน แป้ง : เพคติน (กรัม)	แป้ง (กรัม)	เพคติน (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
แป้งไม่ดัดแปร	1 : 0	100 : 0	6	0	2.4	100
		75 : 25	4.5	1.5	2.4	100
		50 : 50	3	3	2.4	100
		25 : 75	1.5	4.5	2.4	100
แป้ง ไดอัลดีไฮด์	1 : 0.5	100 : 0	6	0	2.4	100
		75 : 25	4.5	1.5	2.4	100
		50 : 50	3	3	2.4	100
		25 : 75	1.5	4.5	2.4	100
	1 : 1	100 : 0	6	0	2.4	100
		75 : 25	4.5	1.5	2.4	100
		50 : 50	3	3	2.4	100
		25 : 75	1.5	4.5	2.4	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การหาปริมาณอัลดีไฮด์

วิเคราะห์โดยซังตัวอย่างแบ่ง 1.0 กรัม และน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายมาปรับ pH โดยกรดไฮโดรคลอริก 0.118 โมลาร์ และใส่ไฮดรอกซิลลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (เตรียมโดย ซังไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ 50 กรัม ใส่ลงในโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร) จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ไปใส่ในตูบ ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำมาไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.118 โมลาร์ โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ โดยเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดงที่จุดยุติ สามารถหาปริมาณอัลดีไฮด์ได้จากสมการดังแสดง [19]

$$\text{CHO (\%)} = 0.118 \times 0.028 \times (V_{\text{control}} - V_{\text{Sample}}) \times 100$$

โดยที่ V_{Sample} คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายตัวอย่าง
 V_{control} คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายมาตรฐาน

3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) โดยนำสารตัวอย่างอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ปริมาณ 2-5 มิลลิกรัม และนำไปเข้าเครื่องอัดเม็ด โดยใช้ความดัน 10^4 kg/cm^2 เวลา 5 นาที จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ได้ ไปวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

3.4.3 สัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) โดยการเตรียมตัวอย่างจากการนำชิ้นงานตัวอย่างหักภายใต้สภาวะแช่ไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำตัวอย่างที่หักเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อส่องดูสัณฐานวิทยา

3.4.4 การศึกษาความหนืด

ศึกษาความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer) ใช้ในการวัดความหนืด โดยเตรียมสารละลายแบ่งไดอัลดีไฮด์ 10 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดค่าความหนืดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส จนถึง 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เข็มเบอร์ 3 ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที

3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิเซอร์ (Thermogravimetric analyzer : TGA) ใช้สารตัวอย่างประมาณ 10-12 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิ 50 – 600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อทดสอบได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้ว จากนั้นนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้ DTA และหาร้อยละน้ำหนักที่หายไปของช่วงอุณหภูมิที่แบ่งไม่ได้รับการดัดแปรสลายตัว

3.4.6 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เตรียมชิ้นงานฟิล์มตัวอย่างขนาด 4 × 4 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก และร้อยละปริมาณผลึก ซึ่งใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer) โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ และมีขนาดของมุมตกกระทบ 5 – 60 องศา อัตราเร็ว 1 องศาต่อนาที และหาร้อยละปริมาณผลึกดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณผลึก} = (\text{Raw area} / \text{Net area}) \times 100$$

เมื่อ Raw area คือ พื้นที่ใต้กราฟ $2\theta = 14 - 35^\circ$
 Net area คือ พื้นที่ใต้กราฟ $2\theta = 5 - 60^\circ$

3.4.7 การศึกษาการบวมตัว

ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 นิ้ว 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่งและบันทึกผลน้ำหนัก แล้วนำฟิล์มตัวอย่างที่จะทดสอบไปวางไว้บนตะแกรงลวด 200 เมช (Mesh) เปลาที่ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง และบันทึกผล จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มวางบนตะแกรงและนำไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเมื่อครบ 72 ชั่วโมง

สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมตัวได้จากสมการ

$$\text{Swelling (\%)} = [(W - W_0) / W_0] \times 100$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น (กรัม)

W คือ น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น (กรัม)

3.4.8 การดูดความชื้น

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 โดยนำชิ้นงานตัวอย่างขนาด 1×1 นิ้ว 5 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักโดยละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นนำไปวางไว้ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) มีความชื้นสัมพัทธ์ $98 \pm 2\%$ บันทึกน้ำหนักของชิ้นงานหลังการดูดซับน้ำทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 วัน และนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_a (%) = [(W_f - W_i) / W_i] \times 100$$

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
 W_f คือ น้ำหนักของฟิล์มหลังการดูดซับน้ำ (กรัม)
 W_i คือ น้ำหนักของฟิล์มก่อนการดูดซับน้ำ (กรัม)

3.4.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกล ตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 882-02	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 882-02	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรง ดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 882-02	%

3.4.9.1 การทดสอบ ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 882-02 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบสามารถเตรียมได้โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 × 15 mm². โดยใช้จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตรที่ศึกษา ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบภายใต้สภาวะดังนี้

- ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) : 50 mm./min
- โหลดเซลล์ (Load cell) : 500 N.
- ระยะทดสอบ (Gauge length) : 50 mm.

โดยค่า ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด, มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การคำนวณสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกล	สมการการคำนวณ
ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	F/A
มอดุลัส (Young's modulus, E)	$[(F/A) / ((L-L_0)/L_0)]$
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	$((L-L_0)/L_0) \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm²)
L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)
L₀ คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดของตัวอย่างก่อนการดึงยึดที่มีความกว้างน้อยที่สุด และมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน

3.4.10 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 × 50 มิลลิเมตร โดยเตรียม 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร นำไปฝังในดินลึก 10 เซนติเมตร ภายใต้ความชื้นในดินอยู่ในช่วง 5 - 10% เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นนำชิ้นงานที่ฝังดินแล้วมาทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการฝังดิน

3.4.11 การวัดสี

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด 7 × 7 เซนติเมตร วัดสีด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) เพื่อวิเคราะห์สีที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานตามระบบของ CIE L*a*b*, CIE L* C* h° และวัดค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness Index : YI) ตามมาตรฐาน ASTM E313-96 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D 65/10° โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความหมายดังนี้ [29]

- L* : ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)
 - L = 0 สีของชิ้นงานไปในทิศทางมืด
 - L = 100 สีของชิ้นงานไปในทิศทางสว่าง
- a* : ใช้กำหนดค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (Red-green)
 - a = + สีของชิ้นงานไปในทิศทางสีแดง
 - a = - สีของชิ้นงานไปในทิศทางสีเขียว
- b* : ใช้กำหนดค่าความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellow-blue)
 - b = + สีของชิ้นงานไปในทิศทางสีเหลือง
 - b = - สีของชิ้นงานไปในทิศทางสีน้ำเงิน
- C* : ความสดใสของสี

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h° : ตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา

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

ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness Index : YI) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$YI = 100 (C_X X - C_Z Z) / Y$$

เมื่อ C_X มีค่า 1.3013

C_Z มีค่า 1.1498



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเทคนิคที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์จากแป้งมันสำปะหลัง โดยมีโซเดียมเมตาเพอร์ไอโอเดตเป็นสารออกซิไดส์ และกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นศึกษาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยสัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ODAS	แป้งที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ 1:0
0.25DAS	แป้งที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ 1:0.25
0.5DAS	แป้งที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ 1:0.5
0.75DAS	แป้งที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ 1:0.75
1DAS	แป้งที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ 1:1
100P	ผงเพคตินบริสุทธิ์
ODASF	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0 โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
ODAS25PF	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0 และใส่เพคตินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
ODAS50PF	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0 และใส่เพคตินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
ODAS75PF	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0 และใส่เพคตินร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
0.25DASF	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มไดอัลไธด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งมันสำปะหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.25 โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ต่าง ๆ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
0.5DASF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.5 โดยมีลิเชอร์รอลเป็น พลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
0.5DAS25PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.5 และใส่เพคตินรอล 25 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
0.5DAS50PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.5 และใส่เพคตินรอล 50 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
0.5DAS75PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.5 และใส่เพคตินรอล 75 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
0.75DASF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0.75 โดยมีลิเชอร์รอลเป็น พลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
1DASF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 1 โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์ รอล 40 โดยน้ำหนัก
1DAS25PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 1 และใส่เพคตินรอล 25 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
1DAS50PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 1 และใส่เพคตินรอล 50 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
1DAS75PF	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ฟิล์มไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ แอมินสำหรับหลังต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 1 และใส่เพคตินรอล 75 โดย น้ำหนัก โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดยน้ำหนัก
100PF	เทอร์โมพลาสติกฟิล์มเพคติน โดยมีลิเชอร์รอลเป็นพลาสติกไซเชอร์รอล 40 โดย น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

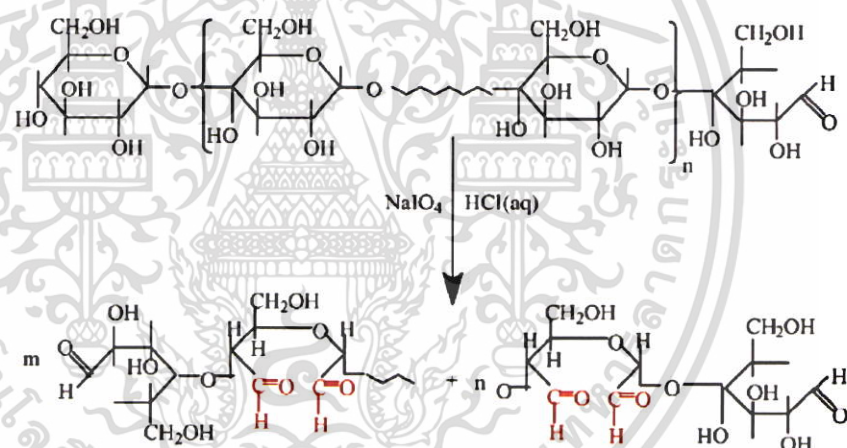
4.1 การศึกษาสมบัติของเม็ดแป้ง

จากอันตรกิริยาระหว่างแป้งและสารออกซิไดส์โซเดียมเมตาเปอร์ไอโอเดต ส่งผลให้เกิดแป้งไดอัลดีไฮด์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ส่วนของแป้งไดอัลดีไฮด์เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดการตัดสายโซ่ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 2. ส่วนของแป้งไดอัลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาพันธะเชื่อมโยระหว่างเม็ดแป้งได้ 3. ส่วนของแป้งที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ร่วมกับแป้งบางส่วนที่ไม่เกิดการตัดแปรรูป

จากนั้นศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแป้งตัดแปรรูปไดอัลดีไฮด์โดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแป้งต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0, 1 : 0.25, 1 : 0.5, 1 : 0.75 และ 1 : 1 ตามลำดับ แสดงผลดังหัวข้อการทดสอบต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบหาปริมาณหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde content)

แป้งไดอัลดีไฮด์เกิดจากกระบวนการออกซิไดส์โดยสารออกซิไดส์ก่อให้เกิดการแตกออกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่สุดของโครงสร้างของแป้งที่ตำแหน่ง C2 และ C3 เปลี่ยนจากหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์ แสดงดังรูปที่ 4.1



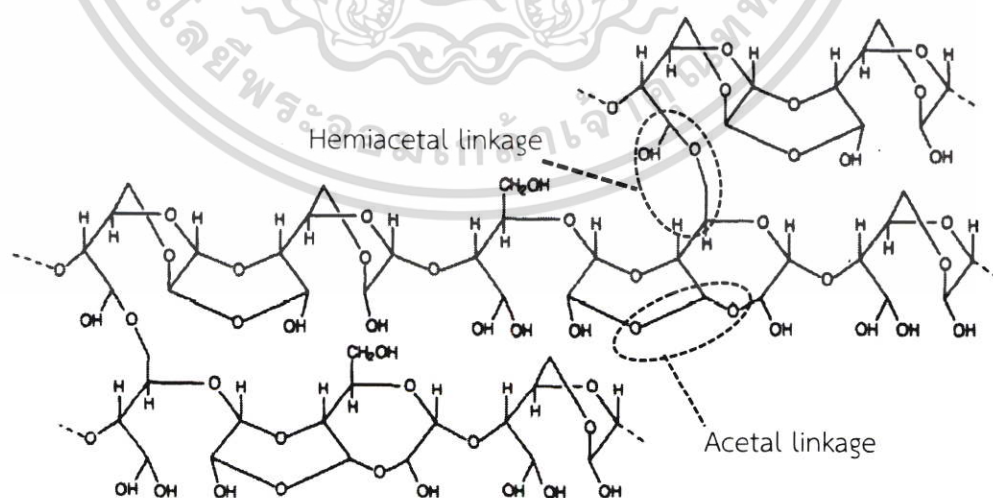
รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการเกิดแป้งไดอัลดีไฮด์ระหว่างสารออกซิไดส์โซเดียมเมตาเปอร์ไอโอเดตกับแป้ง [30]

การหาหมู่แทนที่อัลดีไฮด์เพื่อยืนยันการเกิดแป้งตัดแปรรูปไดอัลดีไฮด์ สามารถหาได้จากการทดสอบหาปริมาณหมู่อัลดีไฮด์ โดยวิธีการไทเทรตชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ พบปริมาณหมู่คาร์บอนิลแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณหมู่แทนที่อัลดีไฮด์ของแป้งที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแป้งและสารออกซิไดส์ที่ปริมาณต่างกัน

สูตร	ปริมาณหมู่อัลดีไฮด์ (%)
0DAS	0
0.25DAS	43.39 ± 3.20
0.5DAS	60.46 ± 2.05
0.75DAS	70.21 ± 3.54
1DAS	80.61 ± 2.01

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณหมู่อัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นมีค่า 0, 43.39, 60.46, 70.21 และ 80.61 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์มีค่า 1:0, 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 เพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารออกซิไดส์โซเดียมเมตาเปอร์ไอโอเดตและแป้งโดยสารออกซิไดส์ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณหมู่ไกลคอลเกิดการแตกพันธะออกที่บริเวณ C2 และ C3 ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) เปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ (COH group) 2 หมู่ในหนึ่งหน่วยกลูโคสเกิดเป็นแป้งไดอัลดีไฮด์ขึ้นดังรูปที่ 4.1 และส่งผลให้ปริมาณหมู่แทนที่คาร์บอนิลเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของสารออกซิไดส์มีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของปรารถนา คำใส [4] พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ 1:0.5 และ 1:1 มีปริมาณหมู่อัลดีไฮด์แทนที่เพิ่มขึ้นจาก 30.87 ไปยัง 69.32 ตามลำดับ นอกจากนี้หมู่ไดอัลดีไฮด์บางส่วนสามารถเกิดพันธะอะซิทัลและเฮมิอะซิทัล (Acetal and Hemiacetal linkage) ระหว่างกันดังรูปที่ 4.2 ซึ่งคาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการขจัดน้ำออกของแป้งไดอัลดีไฮด์ แสดงในงานวิจัยของ Veelaert S. และคณะ [27] จากผลการทดสอบปริมาณหมู่แทนที่อัลดีไฮด์ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าแป้งถูกออกซิไดส์โดยสาร ออกซิไดส์กลายเป็นแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ได้



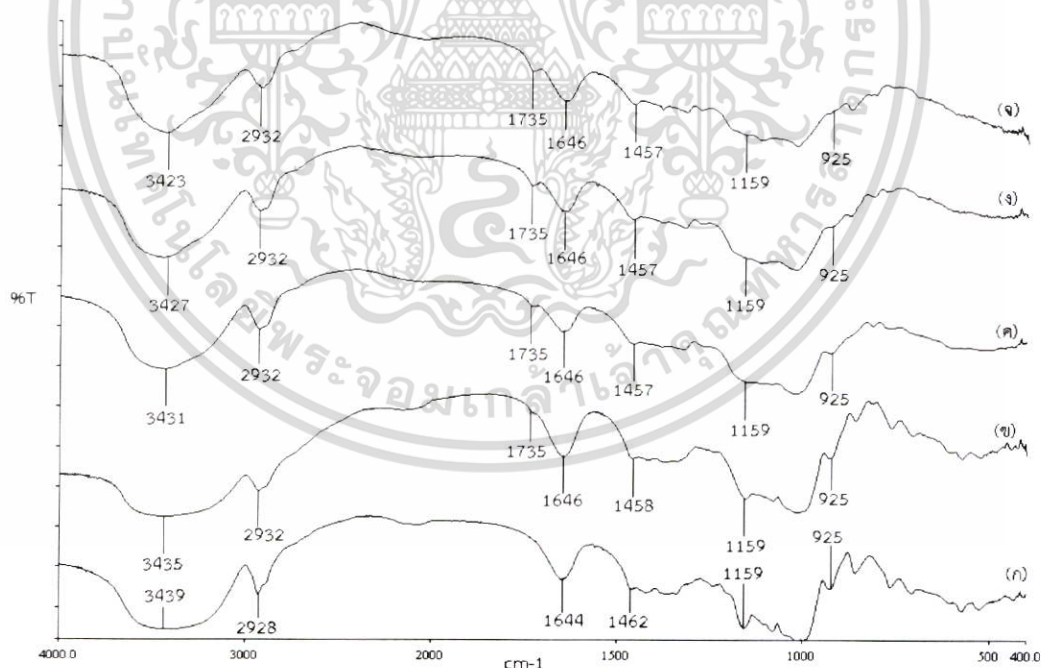
รูปที่ 4.2 โครงสร้างพันธะเชื่อมขวางของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ประกอบด้วยพันธะอะซิทัล และเฮมิอะซิทัล (Acetal and Hemiacetal linkage) [27]

4.1.2 การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

จากการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR) โดยพิจารณาเปรียบเทียบแบ่งได้อัลดีไฮด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแบ่งต่อสารออกซิไดส์ คือ 1 : 0, 1 : 0.25, 1 : 0.5, 1 : 0.75 และ 1 : 1 ตามลำดับ พิคปรากฏลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น [4, 30]

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3600 – 3200	O-H stretching
3000 – 2800	Alkane C-H stretching
1750 – 1730	Ester C=O stretching
1630 – 1600	Bounded water
1485 – 1420	O-H bending
1300 - 1100	C-O stretching
1200 - 1000	C-H bending



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแบ่งได้อัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแบ่งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกัน (ก) 0DAS (ข) 0.25DAS (ค) 0.5DAS (ง) 0.75DAS และ (จ) 1DAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของแป้งไดอัลดีไฮด์ ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกัน พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดทุกสูตรมีลักษณะใกล้เคียงกันเป็นโครงสร้างของแป้งที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างหลัก คือ อะมิโลสและอะมิโลเพคติน [32] พิกที่ช่วงความยาวคลื่น $3600 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบ O-H Stretching จากแป้ง พิกช่วงความยาวคลื่น $2928-2932 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบ C-H Stretching ของ CH_2 ของแป้ง ที่พิก 1646 cm^{-1} เกิดจากโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของแป้ง นอกจากนี้ยังพบพิกช่วง $1462-1458 \text{ cm}^{-1}$ และ 1159 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending และ C-O Stretching ในโมเลกุลของแป้ง [33-34]

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ใต้กราฟของพิกและสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพิกของแป้งสูตรต่าง ๆ

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพิก (A cm^{-1})			สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพิก*	
	1735 cm^{-1}	1159 cm^{-1}	860 cm^{-1}	1735 cm^{-1}	1159 cm^{-1}
ODAS	-	89.55	28.38	-	3.15
0.25DAS	16.87	46.76	43.05	0.39	1.08
0.5DAS	14.78	19.72	19.67	0.75	1.00
0.75DAS	22.50	17.00	18.49	1.21	0.92
1DAS	25.26	13.24	14.45	1.74	0.91

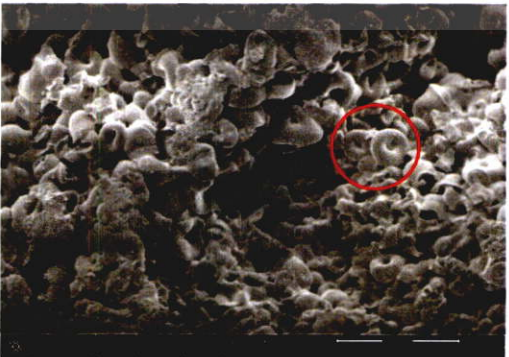
* หมายเหตุ สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ = พื้นที่ใต้กราฟของพิกที่สนใจ / พื้นที่ใต้กราฟของพิก 860 cm^{-1}

จากรูปที่ 4.3 (ข)-(จ) และตารางที่ 4.4 พบว่าปรากฏพิกที่ช่วงความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching มีความเข้มของพิกสูงขึ้นตามปริมาณของสารออกซิไดส์ โดยสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นมีค่า 0.39, 0.75, 1.21 และ 1.74 ในแป้งสูตร 0.25DAS, 0.5DAS, 0.75DAS และ 1DAS ตามลำดับ นอกจากนี้การสั่นแบบ C-O-H Stretching ที่ตำแหน่งพิก 1159 cm^{-1} มีความเข้มของพิกลดลงโดยมีสัดส่วนลดลงของพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 3.15, 1.08, 1.00, 0.92 และ 0.91 ตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณของสารออกซิไดส์ เกิดจากการออกซิไดส์ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะที่บริเวณ C2 และ C3 ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของแป้งเกิดเป็นแป้งไดอัลดีไฮด์ ดังรูปที่ 4.1แสดงผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yu J. และ Zhang S.D. [6-7] นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นของ O-H Stretching และ O-H bending จากแป้งเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างองค์ประกอบของแป้งที่ไม่ได้รับการดัดแปร และแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์

4.1.3 สัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของแป้งไดอัลทีไฮด์สูตรต่าง ๆ (ก) 0DAS (ข) 0.5DAS และ (ค) 1DAS

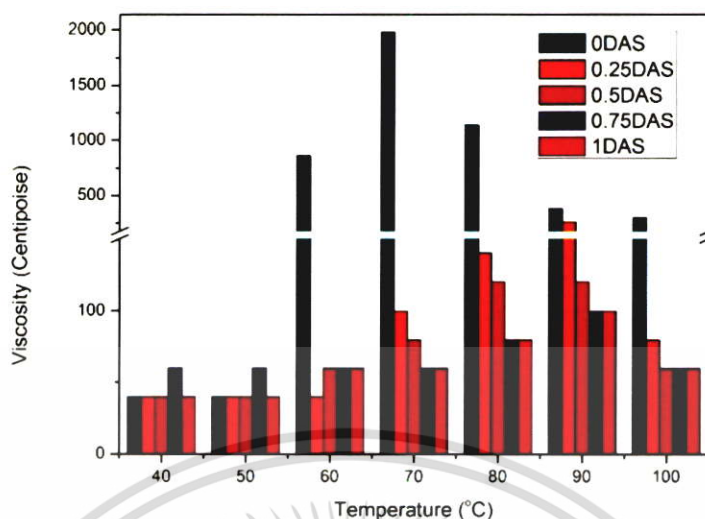
สูตร	(ก) 0DAS
ภาพ สัณฐานวิทยา ของเม็ดแป้งที่ กำลังขยาย 2000 เท่า	
สูตร 1	(ข) 0.5DAS
ภาพ สัณฐานวิทยา ของเม็ดแป้งที่ กำลังขยาย 2000 เท่า	
สูตร	(ค) 1DAS
ภาพ สัณฐานวิทยา ของเม็ดแป้งที่ กำลังขยาย 2000 เท่า	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 (ก) แสดงภาพสัณฐานวิทยาของแป้งสูตร ODAS พบว่ามีลักษณะรูปร่างกลม พื้นผิวเรียบ และมีการกระจายตัวที่ดีไม่รวมเป็นกลุ่มก้อน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งสูตร (ข) 0.5DAS และ (ค) 1DAS พบว่าเม็ดแป้งมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนไป และบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้งเกิดการยุบตัวของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัดและมีแนวโน้มการยุบตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารออกซิไดส์ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลักษณะของเม็ดแป้งที่ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นผลึกที่บริเวณรอบนอกและส่วนอสัณฐานบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้ง สารออกซิไดส์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นอสัณฐานได้มากกว่าส่วนผลึก ทำให้รูปร่างของเม็ดแป้งเปลี่ยนไปเกิดการยุบตัว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuo Y. และคณะ [30] จากการเตรียมแป้งไดอัลติไฮด์จากแป้งข้าวโพดโดยมีโซเดียมเปอร์ไอโอดेटเป็นสารออกซิไดส์และใช้กรดไฮโดรคลอริกในการสังเคราะห์ พบว่าเม็ดแป้งมีสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนรูปร่างไป และมีรอยยุบบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้ง จากงานวิจัยของ Sangseethong K. และคณะ [35] ทำการศึกษาสมบัติของแป้งออกซิไดส์ของแป้งมันสำปะหลังโดยใช้สารโซเดียมไฮโปคลอไรท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งมีรอยบุบและขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการออกซิไดส์เพิ่มสูงขึ้น และจากงานวิจัยของ Shujun S. และคณะ [36] ที่ศึกษาสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งเมื่อถูกไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าเม็ดแป้งมีรูปร่างที่เปลี่ยนไปเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดแป้งมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากขึ้นเมื่อเกิดการดัดแปร เนื่องจากเกิดพันธะอะซิทัลดและเฮมิอะซิทัลด ดังรูปที่ 4.2 ระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของปรารณา คำใส [4]

4.1.4 การศึกษาความหนืด

การศึกษาคความหนืดเปรียบเทียบระหว่างแป้งที่ไม่ได้รับการดัดแปรสูตร ODAS และแป้งดัดแปรไดอัลติไฮด์สูตร 0.25DAS, 0.5DAS, 0.75DAS และ 1DAS โดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield viscometer เข็มเบอร์ 3 ที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที ผลแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความหนืด (Centipoise) ของสารละลายแป้งดัดแปรโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความหนืดของแป้งสูตร ODAS ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นและมีความหนืดสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่า 1980 เซนติพอยส์ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการเกิดเจล (Gelatinization temperature) ของแป้ง และมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 80-100 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีความชอบน้ำ ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลถึงอุณหภูมิการเกิดเจลหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการบวมตัวและเกิดเจลขึ้นแต่เมื่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและมีการปั่นกวอย่างต่อเนื่องแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งถูกทำลายทำให้เม็ดแป้งแตกออกและส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง

จากรูปที่ 4.4 ค่าความหนืดของแป้งสูตร 0.25DAS, 0.5DAS, 0.75DAS และ 1DAS พบว่าค่าความหนืดของแป้งไดอัลติไฮต์มีค่าลดลงเมื่อใช้สารออกซิไดส์ปริมาณสูงขึ้น [37] เนื่องจากแป้งไดอัลติไฮต์ถูกตัดสายโซ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้มวลโมเลกุลของแป้งลดลง และผลจากแป้งไดอัลติไฮต์ส่วนที่เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น [4] ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนของแป้งกับน้ำ การบวมตัวและการละลายของเม็ดแป้งมีแนวโน้มลดน้อยลงจึงส่งผลให้ความหนืดมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสูตร ODAS โดยมีความหนืดสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่า 264, 120, 100 และ 100 เซนติพอยส์ เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ตามลำดับ และมีย่าน้อยกว่าแป้งสูตร ODAS ซึ่งมีค่า 380 เซนติพอยส์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าความหนืดมีแนวโน้มคงที่มากขึ้นตามปริมาณสารออกซิไดส์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสถียรภาพของเม็ดแป้งที่สูงขึ้นทำให้ทนต่อความร้อนและการปั่นกว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Veelaert S. และคณะ [20] จากการศึกษาสมบัติของ

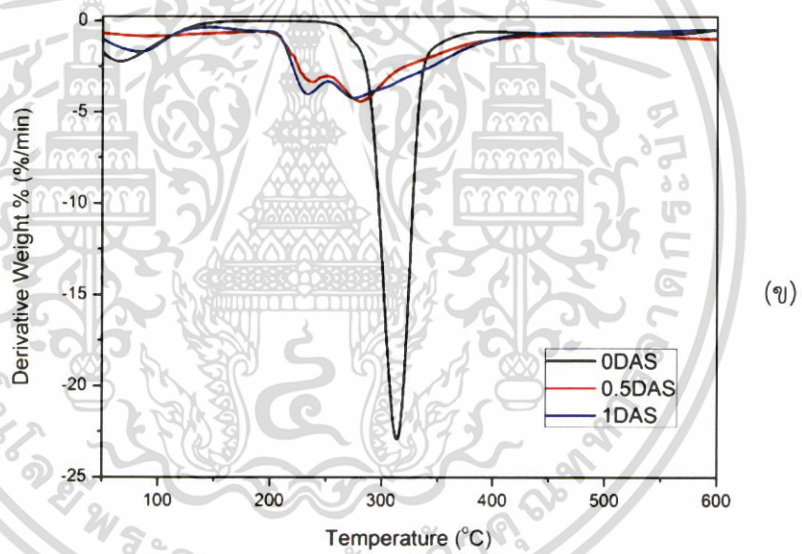
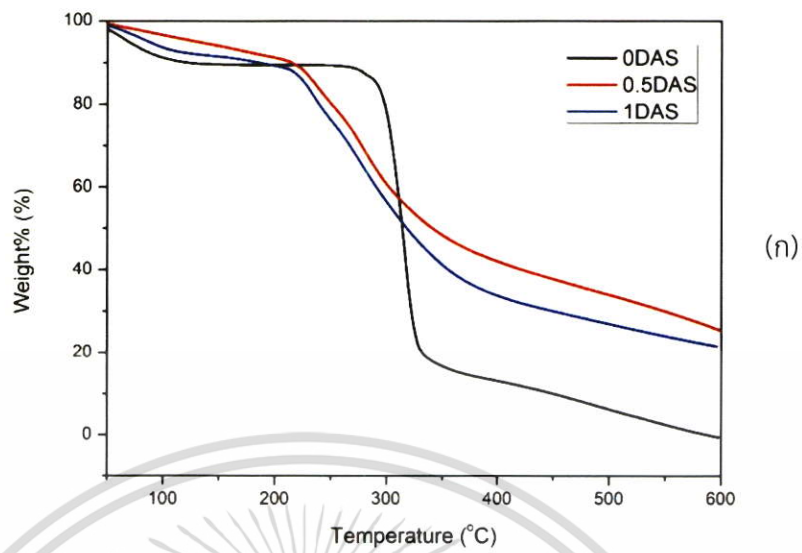
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายแป้งไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันฝรั่งโดยมีโซเดียมเปอร์ไอโอดेटทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์ พบว่า ความหนืดของสารละลายแป้งไดอัลดีไฮด์ลดลงเมื่อแป้งถูกออกซิไดส์เพิ่มมากขึ้น

4.1.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งสูตร 0DAS, 0.5DAS และ 1DAS ตามลำดับ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analysis) ช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อนของแป้งและน้ำหนักที่หายไป แสดงผลดังรูปที่ 4.5 และสามารถสรุปผลของอุณหภูมิการสลายตัวแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4.6





รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรได้อัลดีไฮด์ที่ใช้สารออกซิไดส์ปริมาณต่าง ๆ (ก) TG และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) และน้ำหนักที่หายไป (%) ของแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์สูตร ODAS, 0.5DAS และ 1DAS ตามลำดับ

สูตร	ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว (°C)				น้ำหนัก ที่หายไป ของช่วง ที่ 3 (%)	น้ำหนัก เถ้าถ่าน ที่ 600 °C	
	ช่วงที่ 1 น้ำ	ช่วงที่ 2 แป้งไดอัลดี ไฮด์ (ไฮโดรไล ซิส)	ช่วงที่ 3				ช่วงที่ 4 แป้งไดอัลดีไฮด์ (เกิดการ เชื่อมโยง)
			แป้ง ไดอัลดีไฮด์	แป้งที่ไม่เกิด การดัดแปร			
ODAS	65.17	-	-	313.60	-	89.39	0
0.5DAS	91.03	237.73	280.28		367.63	24.14	22.00
1DAS	83.19	233.25	275.25		358.11	22.65	17.00

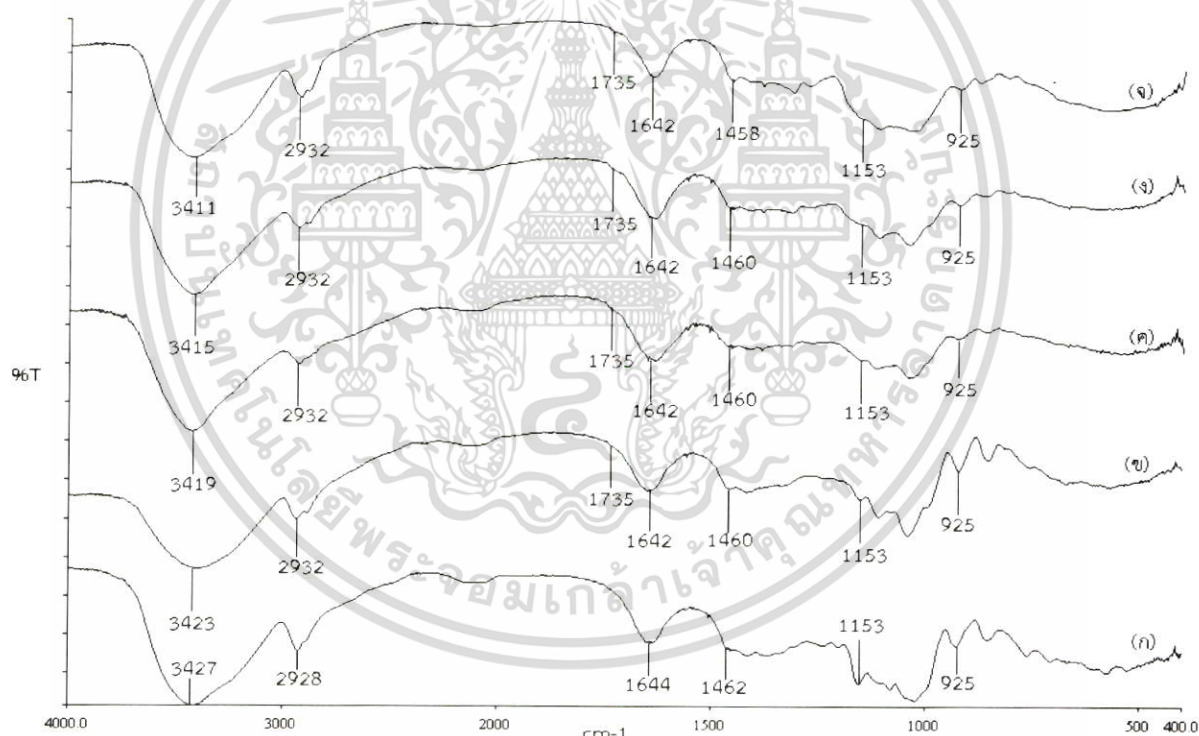
จากรูปที่ 4.5 (ก)-(ข) ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ แป้งสูตร ODAS, 0.5DAS และ 1DAS พบช่วงที่ 1 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 65–90 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในโครงสร้าง สูตร ODAS มีอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่อุณหภูมิ 313.6 องศาเซลเซียส [38] สูตร 0.5DAS และ 1DAS แบ่งการสลายตัวของแป้งเป็น 3 ช่วง คือ อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งไดอัลดีไฮด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการแตกออกของ C2 และ C3 เปลี่ยนจากหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์และเกิดการไฮโดรไลซิสที่บริเวณสายโซ่ของแป้งที่พันธะกลูโคซิติกชนิด แอลฟา-1,4 ในช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 237.73–233.25 องศาเซลเซียส [19] ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 275–313 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแป้งที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ร่วมกับแป้งบางส่วนที่ไม่เกิดการดัดแปร และช่วงที่ 4 อุณหภูมิ 358–367 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแป้งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดการเชื่อมโยงของพันธะอะซิทัลดและเฮมิอะซิทัลดระหว่างเม็ดแป้ง การเกิดช่วงอุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากเมื่อแป้งถูกออกซิไดส์เกิดการแตกออกที่พันธะ C2 และ C3 เกิดเป็นแป้งไดอัลดีไฮด์ สายโซ่ของแป้งถูกตัดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 4.1 มวลโมเลกุลของแป้งลดลง ส่งผลให้ทำให้อุณหภูมิการสลายของแป้งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ [39] ในขณะเดียวกันเม็ดแป้งที่เกิดการดัดแปรสามารถเกิดพันธะอะซิทัลดและเฮมิอะซิทัลดระหว่างกัน ดังรูปที่ 4.2 ทำให้แป้งบางส่วนต้องใช้อุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้นกว่าแป้งสูตร ODAS นอกจากนี้พบว่าแป้งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยแป้งสูตร ODAS, 0.5DAS และ 1DAS มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปของช่วงที่ 3 ลดลงเป็น 89.39, 24.14 และ 22.65 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 600 °C แป้งที่มีหมู่แทนที่ไดอัลดีไฮด์สูตร 0.5DAS และ 1DAS พบร้อยละน้ำหนักของถ่าน (% Char yield) หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คาดว่าเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเม็ดแป้งเนื่องจากเสถียรภาพของเม็ดแป้งดีขึ้นจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างกันของเม็ดแป้ง [4]

4.2 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน

ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ได้จากการดัดแปรแบ่งด้วยสารโซเดียมเมตาเปอร์ไอโอเดตในอัตราส่วนที่ต่างกันเป็นแบ่งไดอัลดีไฮด์ นำมาขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์ม และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่งด้วยวิธีการเทหล่อ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มแสดงผลดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR) โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF กับเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF และ (จ) 1DASF

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่สูตรต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.6 (ก)-(ง) พบว่า สเปกตรัมอินฟราเรดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จากโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่เป็นโครงสร้างของแป้ง โดยพบความยาวคลื่นช่วง $3600-3000\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบ O-H Stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พิกซ์ช่วงความยาวคลื่น $2928-2932\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงเอกซานนี้เป็นเอกซานที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

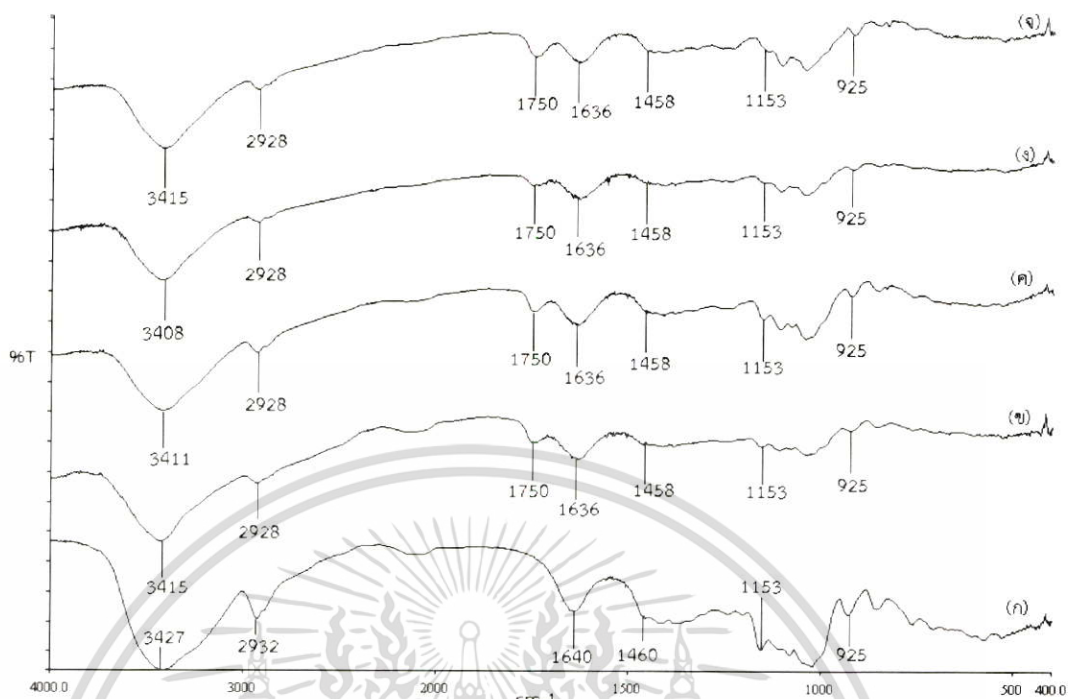
การสั่นแบบ C-H Stretching ของ CH_2 ของแบ้ง พบการสั่นโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของแบ้ง ในช่วงความยาวคลื่น 1640 cm^{-1} และลักษณะการสั่นแบบ O-H bending และ C-O-H Stretching ในโมเลกุลของแบ้งที่พิก 1462-1460 cm^{-1} และ 1153 cm^{-1} [34, 40]

ตารางที่ 4.7 พื้นที่ใต้กราฟของพิกและสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพิกของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

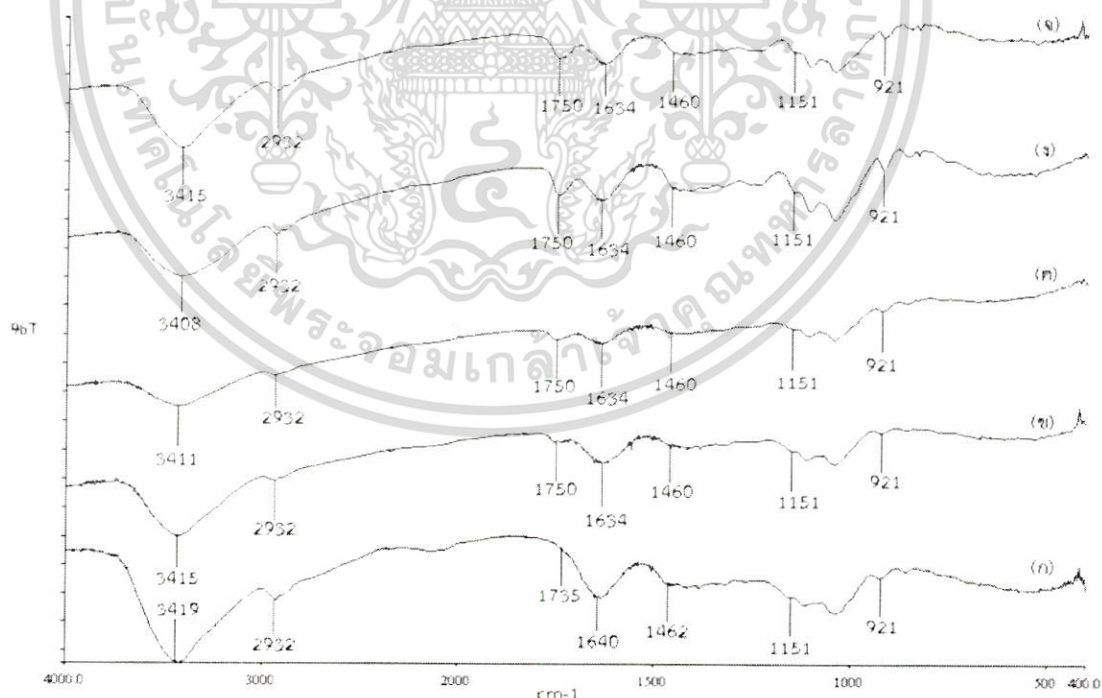
สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพิก (A cm^{-1})			สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพิก*	
	1735 cm^{-1}	1150 cm^{-1}	860 cm^{-1}	1735 cm^{-1}	1150 cm^{-1}
0DASF	-	16.71	13.80	-	1.21
0.25DASF	6.78	14.51	19.48	0.34	0.74
0.5DASF	8.47	12.73	17.98	0.47	0.70
0.75DASF	9.30	10.81	15.52	0.59	0.69
1DASF	11.14	5.31	11.67	0.95	0.45

* หมายเหตุ สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ = พื้นที่ใต้กราฟของพิกที่สนใจ / พื้นที่ใต้กราฟของพิก 860 cm^{-1}

จากรูปที่ 4.6 (ข)-(จ) และตารางที่ 4.7 พบว่าความเข้มที่พิกความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching ที่เพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นมีค่า 0.34, 0.47, 0.59 และ 0.95 ในสูตร 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASSF และ 1DASF ตามลำดับ ในขณะที่ลักษณะการสั่นแบบ C-O Stretching ที่ตำแหน่งพิก 1153 cm^{-1} ลดลง โดยมีสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟลดลงเท่ากับ 1.21, 0.74, 0.70, 0.69 และ 0.45 เมื่อปริมาณสารออกซิโดสเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากสารออกซิโดสทำปฏิกิริยากับหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของแบ้งที่ตำแหน่ง C2 และ C3 [4, 6] นอกจากนี้พบว่ามีเกิดการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างสององค์ประกอบจากการเคลื่อนที่ (Shift) ไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลงของการสั่นแบบ O-H Stretching และ O-H bending

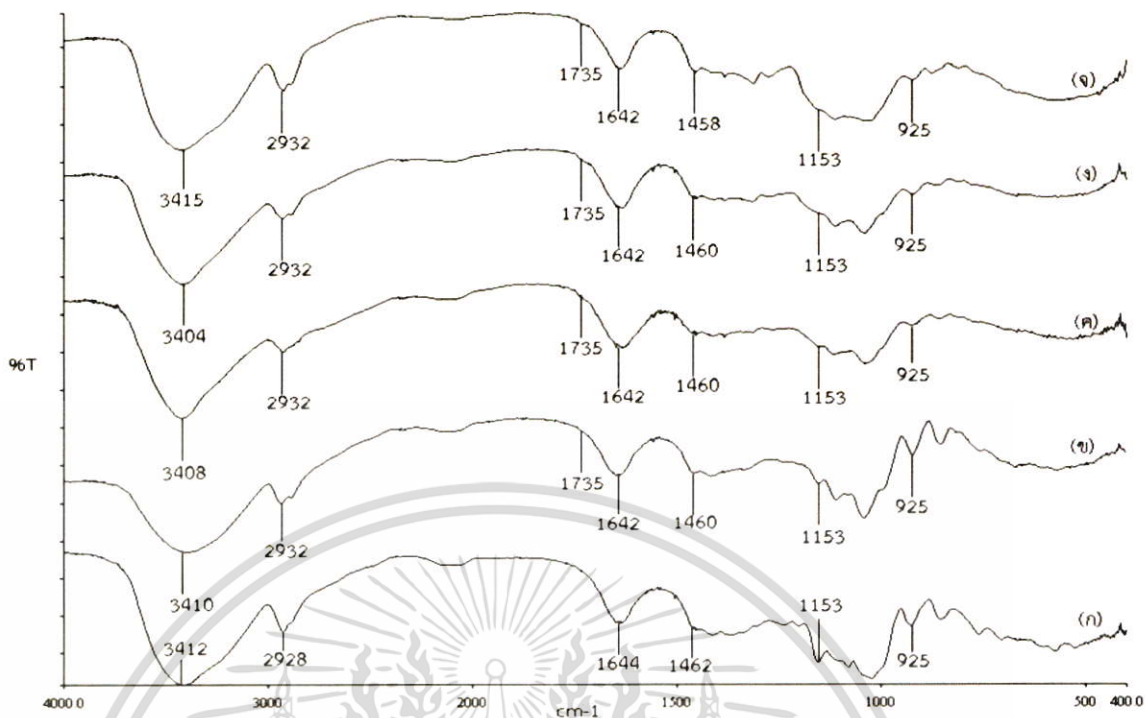


รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซฟิล์มสูตร ODASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) ODASF (ข) ODAS25PF (ค) ODAS50PF (ง) ODAS75PF และ (จ) 100PF



รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลไต์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0.5DASF ที่ปรับปรุง สมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) 0.5DASF (ข) 0.5DAS25PF (ค) 0.5DAS50PF (ง) 0.5DAS75PF และ (จ) 100PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) 1DASF (ข) 1DAS25PF (ค) 1DAS50PF (ง) 1DAS75PF และ (จ) 100PF

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ใต้กราฟของพีกและสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีกของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน

สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพีก (A cm ⁻¹)			สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของพีก*		
	1735 cm ⁻¹	1750 cm ⁻¹	1150 cm ⁻¹	1735 cm ⁻¹	1750 cm ⁻¹	1150cm ⁻¹
0DASF	-	-	16.71	-	-	1.21
0DASF25P	-	20.75	16.88	-	1.56	1.27
0DASF50P	-	24.72	17.41	-	1.83	1.29
0DASF75P	-	26.97	17.57	-	2.28	1.49
0.5DASF	8.47	-	12.73	0.47	-	0.7
0.5DAS25PF	-	31.3	16.26	-	1.98	1.02
0.5DAS50PF	-	40.36	17.85	-	2.33	1.03
0.5DAS75PF	-	40.84	20.48	-	2.35	1.18
1DASF	11.14	-	5.31	0.95	-	0.45
1DASF25P	19.32	-	6.82	2.09	-	0.73
1DASF50P	-	33.96	17.48	-	2.78	1.43
1DASF75P	-	40.62	22.81	-	2.93	1.64
100PF	-	42.59	17.68	-	3.09	1.28

* หมายเหตุ สัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ = พื้นที่ใต้กราฟของพีกที่สนใจ / พื้นที่ใต้กราฟของพีก 860 cm⁻¹

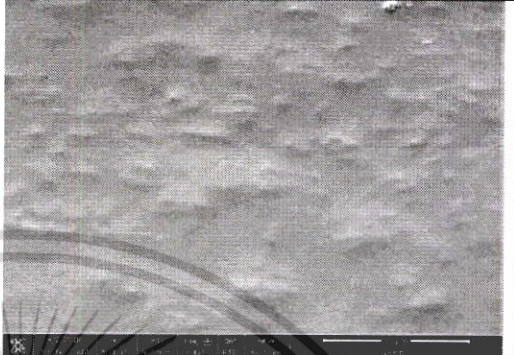
จากรูปที่ 4.7-4.9 และตารางที่ 4.8 เมื่อปรับปรุงฟิล์มด้วยเพคติน พบพิกที่สำคัญซึ่งมาจากองค์ประกอบของเพคตินโดยอินฟราเรดสเปกตรัมของเพคตินฟิล์มสูตร 100PF แสดงดังภาคผนวกฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีอินฟราเรดสเปกตรัมลักษณะใกล้เคียงกันดังนี้ พิกในช่วงความยาวคลื่น 1750 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ C=O Stretching จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของเพคติน มีสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพิกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มสูงขึ้น พิกช่วงความยาวคลื่น $1636\text{-}1634\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบ COO- Stretching และพบพิกช่วง $1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ C-O Stretching มีความเข้มของพิกและสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเพคติน [41]

เมื่อพิจารณาอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน พบว่า ฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF มีการเคลื่อนที่ของพิก 1735 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching จากแบ่งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งพิก 1750 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching ซึ่งพบในเพคติน และพบการเคลื่อนที่ของพิก 1640 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของแป้ง เคลื่อนที่ไปยังพิกช่วงความยาวคลื่น $1636\text{-}1634\text{ cm}^{-1}$ ของการสั่นแบบ C-O Stretching ของเพคติน เมื่อเพิ่มปริมาณของเพคติน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของพิกไปยังอินฟราเรดสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของเพคตินมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของการสั่นแบบ O-H Stretching และ O-H bending แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน ขององค์ประกอบเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มระหว่างแป้ง เพคติน และกลีเซอรอล เนื่องมาจากโครงสร้างของแป้งและเพคตินมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันโดยมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสเป็นหน่วยย่อยของโมเลกุลที่เหมือนกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ วรวรรณ พัฒนสิน [29] จากการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน

4.2.2 สันฐานวิทยา

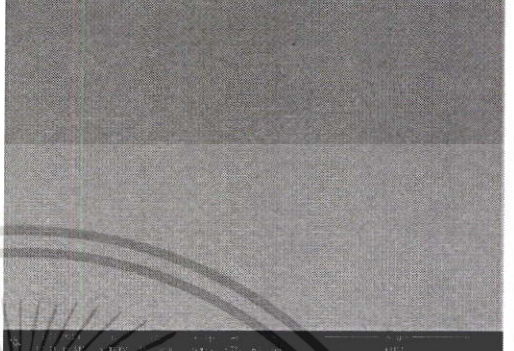
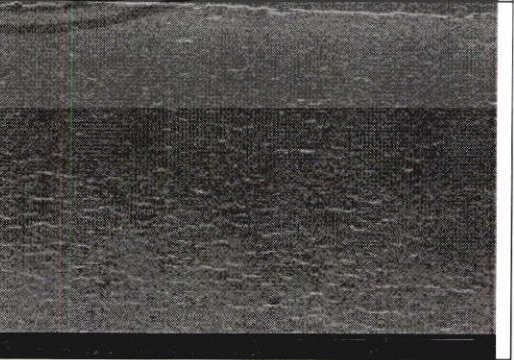
การศึกษาสันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์มและเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม สูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ และเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 3000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะภาคตัดขวาง (cross-section) ของฟิล์ม ผลแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม สูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF (จ) 1DASF (ฉ) 0DAS50PF (ช) 0.5DAS50PF และ (ซ) 1DAS50PF

สูตร	ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่า
(ก) 0DASF	
(ข) 0.25DASF	
(ค) 0.5DASF	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.25DASF (ค) 0.5DASF (ง) 0.75DASF (จ) 1DASF (ฉ) 0DAS50PF (ช) 0.5DAS50PF และ (ซ) 1DAS50PF

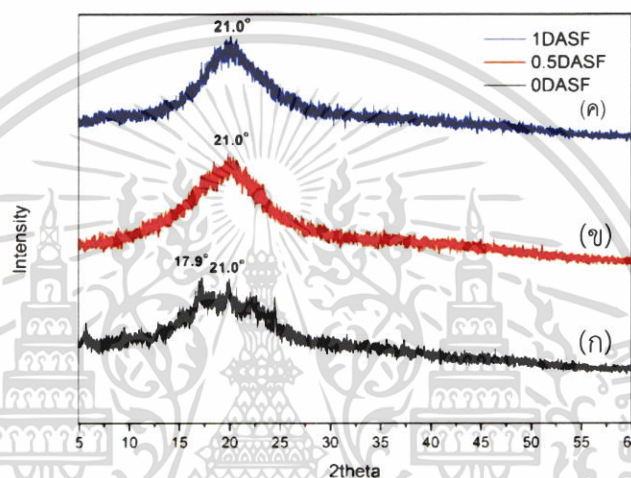
สูตร	ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 3000 เท่า
(ง) 0.75DASF	
(จ) 1DASF	
(ฉ) 0DAS50PF	
(ช) 0.5DAS50PF	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อเดียวกันได้ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ของแป้งไดอัลสไอด์และเพคตินเมื่อใช้แป้งดัดแปรไดอัลสไอด์ในการขึ้นรูป

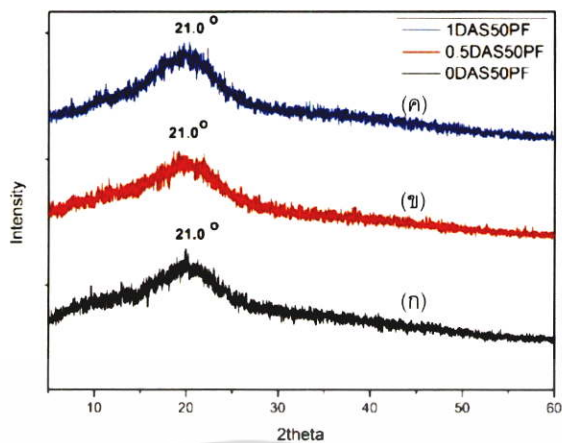
4.2.3 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)

ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลึกและร้อยละความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.10

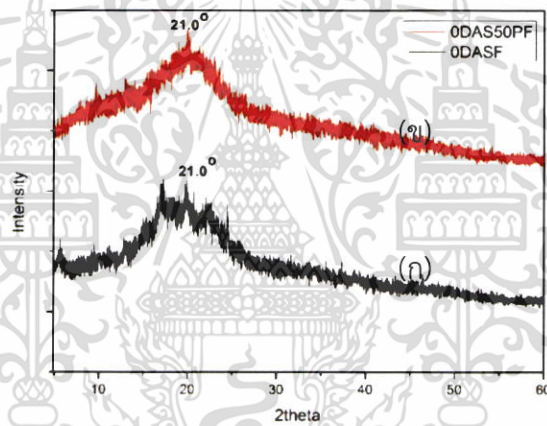


รูปที่ 4.10 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลสไอด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF

จากรูปที่ 4.10 (ก) แสดงดิฟแฟรกโทแกรมของสูตร 0DASF พบว่า มีการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.9° และ 21.0° ซึ่งเกิดจากการนำแป้งมาขึ้นรูปโดยเติมพลาสติกไซเซอร์และผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนและน้ำ ทำให้โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีเป็นโครงสร้างผลึกชนิด B-type ถูกทำลายเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งที่ไม่ผ่านการเจลาติไนเซชัน โดยที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 21.0° คือ ผลึกแบบ V_H -type เกิดจากการโครงสร้างซับซ้อน (Complex formation) ของอะมิโลสและกลีเซอรอล [43-45] ซึ่งพบว่าดิฟแฟรกโทแกรมของสูตร 0DASF หลังเหลือการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.9° และ 21.0° แสดงถึงการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ของเม็ดแป้ง ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งไม่เกิดการทำลายเป็นโครงสร้างใหม่โดยสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของสัญญาณวิทยาดารงที่ 4.9 (ก) ปรากฏว่าภาคต่อเนื่องที่มีความขรุขระ [46]



รูปที่ 4.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกซ์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) 0DAS50P, (ข) 0.5DAS50P และ (ค) 1DAS50P



รูปที่ 4.12 ดิฟแฟรกโทแกรมเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกซ์ฟิล์มสูตร (ก) 0DASF และ (ข) 0DAS50PF

ตารางที่ 4.10 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอกซ์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ

สูตร	ร้อยละปริมาณผลึก
0DASF	55.61
0.5DASF	57.27
1DASF	57.38
0DAS50PF	59.56
0.5DAS50PF	53.39
1DAS50PF	54.88

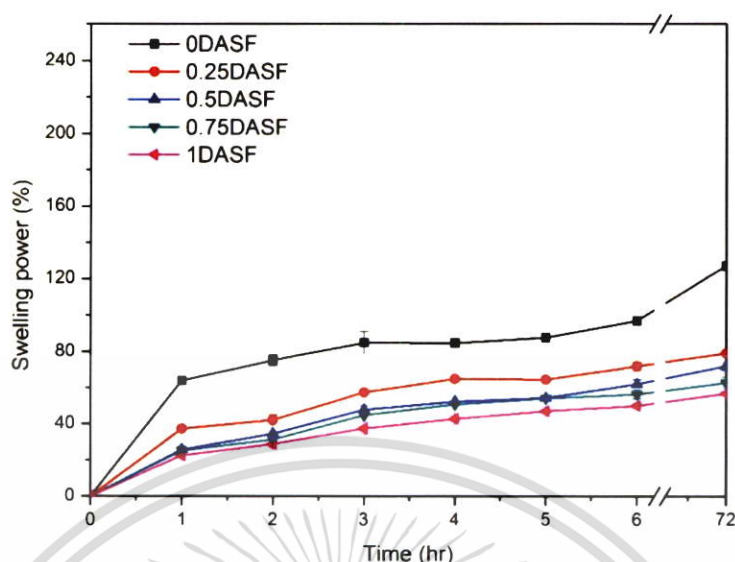
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 (ข)-(ค) และตารางที่ 4.10 พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มปรากฏการเลี้ยวเบน 2θ ที่ตำแหน่ง 21.0° มีความเข้มของพีคเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตำแหน่ง 17.0° มีความเข้มของพีคลดลง แสดงถึงการหลอมโดยสมบูรณ์ของแบ่งไดอัลดีไฮด์ เมื่อผ่านกระบวนการเจลาทีไนซ์เซชัน สอดคล้องกับผลของสัณฐานวิทยาตารางที่ 4.9 (ก)-(ค) ภาพตัดขวางมีความเรียบขึ้นเมื่อใช้แบ่งไดอัลดีไฮด์ โดยมีร้อยละปริมาณผลึก 57.27 และ 57.38 ในฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละปริมาณผลึกของฟิล์มสูตร 0DASF

จากรูปที่ 4.11 (ก)-(ค) และตารางที่ 4.10 ฟิล์มที่ปรับปรุงด้วยเพคติน พบพีคคล้ายคลึงกับสูตร 0DASF และพบพีคที่ประมาณ 12.0° และ 21.0° แสดงลักษณะสัณฐานซึ่งมีปริมาณมากในเพคติน ซึ่งเพคตินจากธรรมชาติมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 9.3° 12.7° 18.6° 20.6° 28.4° และ 40.3° โดยแสดงโครงผลึกแบบ β -Helix [29, 47] โดยลักษณะของดิฟแฟร็กโทแกรมเกิดจากพีคของแบ่งและเพคตินรวมกันทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 4.12 จากการหาร้อยละปริมาณผลึก พบว่าฟิล์มสูตร 0DAS50PF มีผลึกมากกว่าฟิล์มสูตร 0DASF เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่างตำแหน่ง 2θ ของแบ่งและเพคติน ทำให้ความเข้มของพีคสูงขึ้น แสดงแนวโน้มความเป็นผลึกที่สูงขึ้นกว่าฟิล์มสูตร 0DASF สอดคล้องกับงานวิจัยของ วรวรรณ พัฒนสิน [29] ที่ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีแนวโน้มของปริมาณผลึกที่สูงขึ้นเมื่อปรับปรุงด้วยเพคตินร้อยละ 6 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF และ 1DAS50PF พบว่ามีผลึกน้อยกว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ตามลำดับ จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 2θ ที่ตำแหน่ง 21.0° มีความเข้มของพีคลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร 0DAS50PF อาจเกิดจากเพคตินเป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอสัณฐานสามารถเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของแบ่งออกซิไดส์ที่เกิดการไฮโดรไลซิสได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาโรซฟิล์มมีค่าลดลง

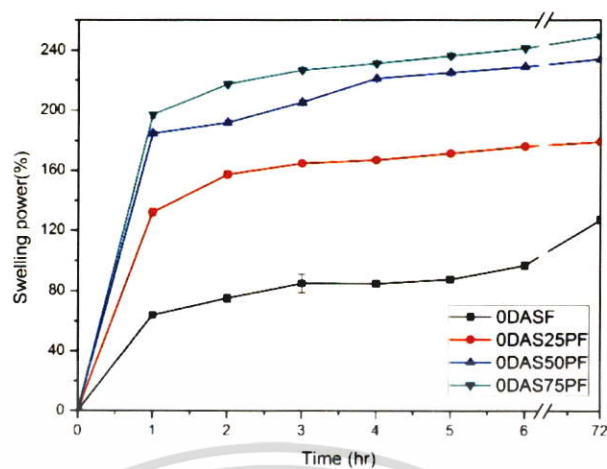
4.2.4 การศึกษาสมบัติการบวมตัว (Swelling power)

ศึกษาการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาโรซฟิล์มสูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ โดยการแช่ฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง และนำฟิล์มมาคำนวณหาร้อยละการบวมตัว แสดงผลดังรูปที่ 4.13

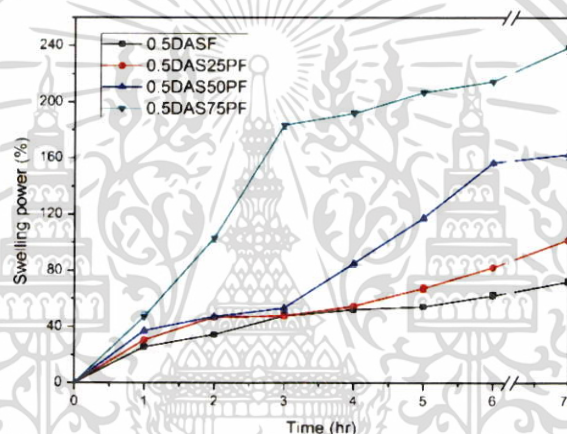


รูปที่ 4.13 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง

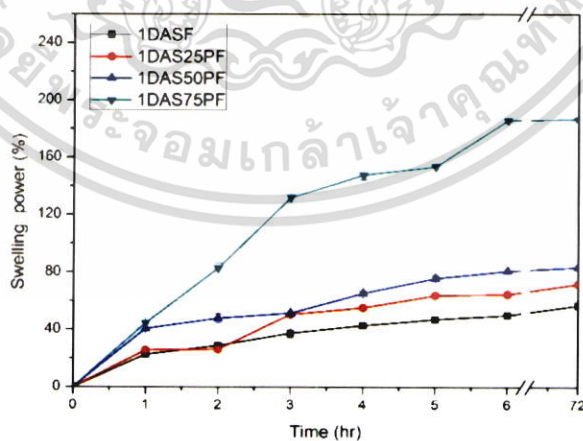
จากการทดสอบสมบัติการบวมตัว จากรูปที่ 4.13 แสดงการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ชฟิล์ม สูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ พบว่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มลดลงตามปริมาณของสารออกซิไดส์ที่สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีค่าร้อยละการบวมตัว เท่ากับ 84.89, 57.31, 47.73, 44.67 และ 37.32 ตามลำดับ ที่ชั่วโมงที่ 3 ของการทดสอบ อัตราการเพิ่มขึ้นของร้อยละการบวมตัวสูงในระยะเวลาเริ่มต้นถึงชั่วโมงที่ 3 ของการทดสอบ และอัตราร้อยละการบวมตัวลดลงและคงที่ในชั่วโมงที่ 4 ถึง 72 เนื่องจากฟิล์มสูตร 0DASF มีความชอบน้ำสูงจากหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโครงสร้าง เมื่อตัดแปรเป็นแป้งไดอัลติไฮด์ทำให้แป้งมีความชอบน้ำลดลงจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิล และการเกิดพันธะเชื่อมโยงภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของหมู่เอมีอะซิไทล์และหมู่อะซิไทล์ที่เกิดขึ้น ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำลดลง ความสามารถในการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ชฟิล์มจึงลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของปรารถนา คำใส [4]



(n)



(ข)

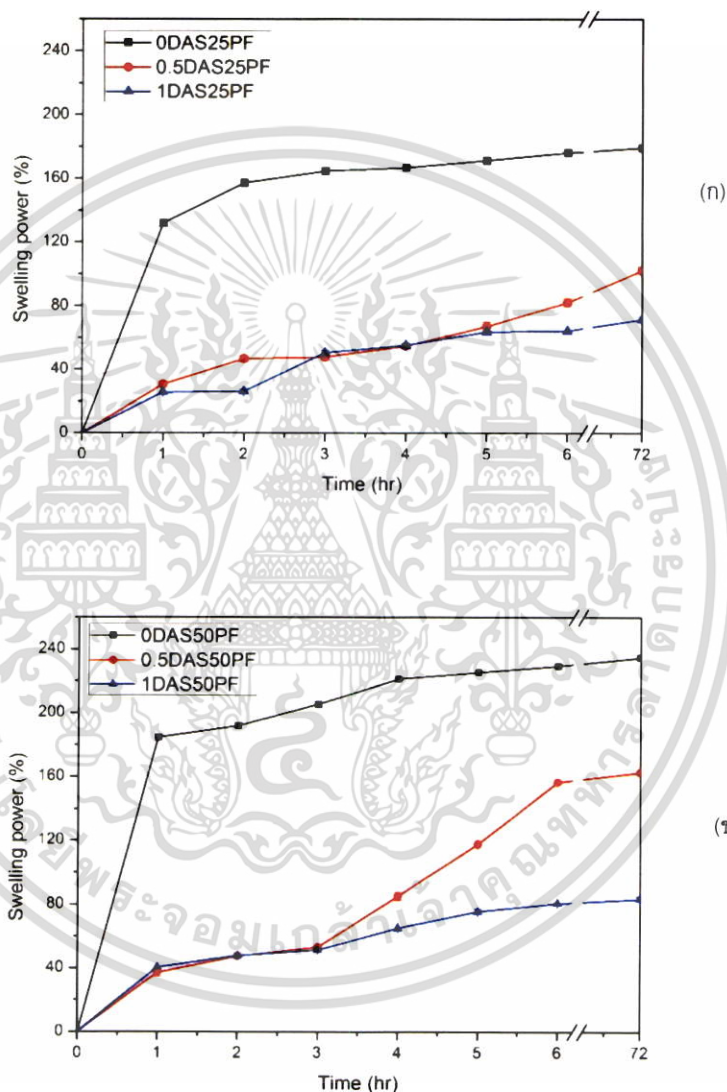


(ค)

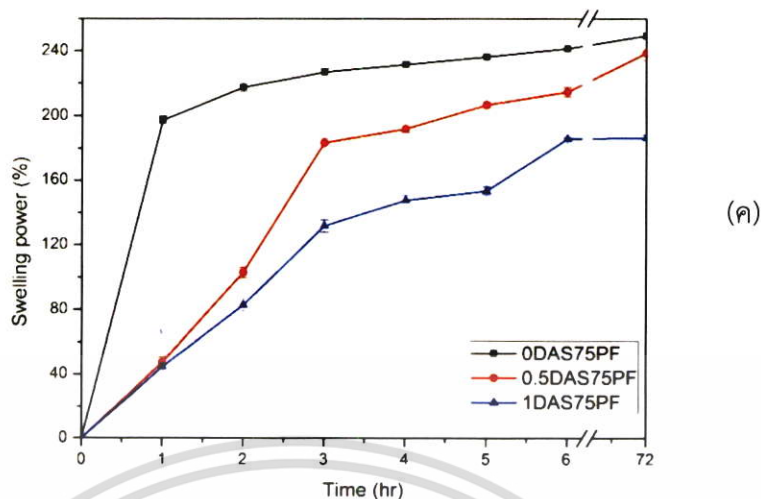
รูปที่ 4.14 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณเพคติน ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาร้อยละการบวมตัวของฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF เมื่อเพิ่มปริมาณเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 (ก)-(ค) พบว่าร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลไคไฮดรอสตาร์ซฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเพคตินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเพคตินมีโครงสร้างคล้ายกับแป้ง มีความชอบน้ำจากลักษณะโครงสร้างที่มีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้นอกจากนี้เพคตินยังมีสมบัติในการเกิดเจล [29] ทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ส่งผลให้ร้อยละการบวมตัวสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

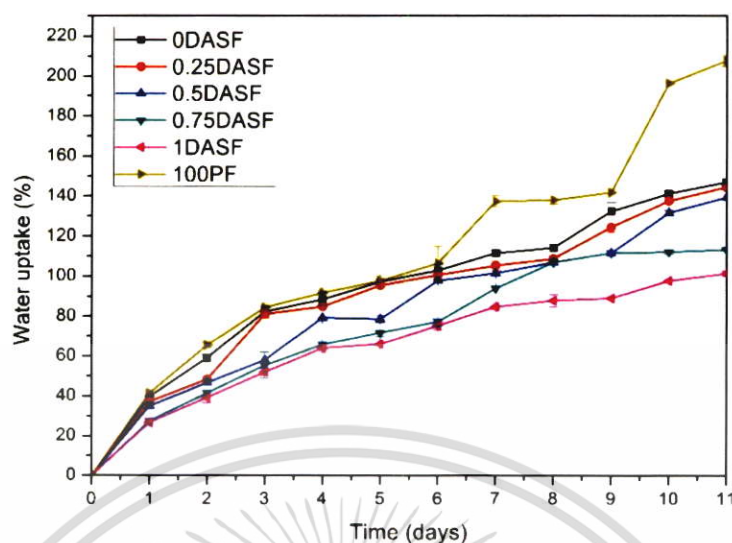


รูปที่ 4.15 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และปริมาณเพคตินคงที่ (ก) 25P (ข) 50P และ (ค) 75P

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 (ก)-(ค) แสดงร้อยละการบวมตัวของฟิล์มเมื่อปริมาณเพคตินคงที่ ร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มจากแป้งดัดแปรสูตร 1DAS มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเพคตินเท่ากัน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งลดน้อยลง ความชอบน้ำของแป้งลดลงเมื่อถูกดัดแปรเป็นแป้งไดอัลดีไฮด์ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำลดลง และฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินมีร้อยละการบวมตัวที่น้อยกว่าฟิล์มสูตร 0DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน ดังนั้นการดัดแปรแป้งไดอัลดีไฮด์ส่งผลให้ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มลดลง

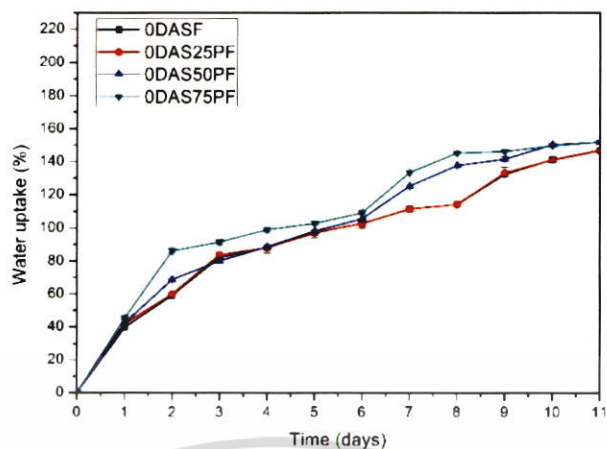
4.2.5 การทดสอบการดูดความชื้น

จากการนำชิ้นงานตัวอย่างนำไปวางไว้ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) มีความชื้นสัมพัทธ์ $98 \pm 2\%$ บันทึกน้ำหนักของชิ้นงานหลังการดูดซับน้ำทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 11 วัน และนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ผลแสดงดังรูปที่ 4.16

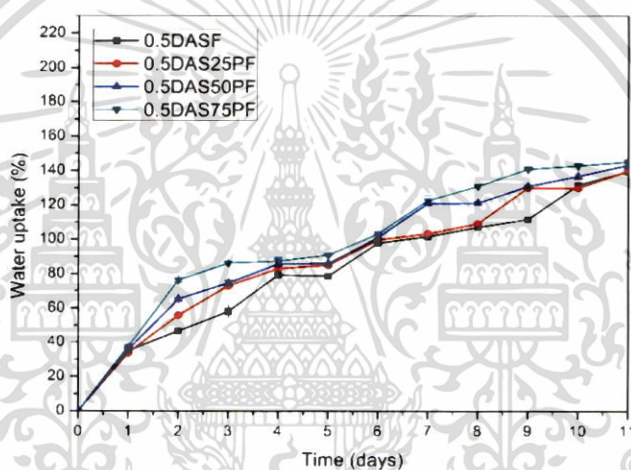


รูปที่ 4.16 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ และฟิล์มเพคติน

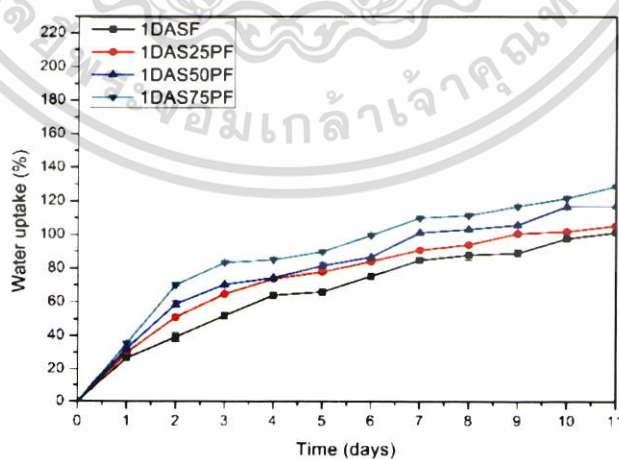
จากรูปที่ 4.16 แสดงร้อยละการดูดความชื้นที่ระยะเวลา 0 ถึง 11 วัน พบว่า ร้อยละการดูดความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละโดยโมลของแป้งต่อสารออกซิไดส์ และมีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงในช่วง 0 ถึง 5 วันของการทดสอบและคงที่ในวันที่ 6 ถึง 11 สูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF มีร้อยละการดูดความชื้นของวันที่ 3 ของการทดสอบเท่ากับ 82.36, 81.06, 58.03, 55.35 และ 51.96 ตามลำดับ เนื่องจากแป้งไดออกไซด์มีความชอบน้ำลดลง เกิดจากการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C2 และ C3 ของแป้งเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณสารออกซิไดส์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำลดลง ร้อยละการดูดความชื้นของฟิล์มจึงลดลง [4] นอกจากนี้พบว่าฟิล์มสูตรที่มีร้อยละการแทนที่ของหมู่ไดออกไซด์ที่มากขึ้นพบการเกิดเชื้อราที่ลดลง เนื่องจากแป้งถูกฟอกขาวโดยสารออกซิไดส์ [1] เมื่อพิจารณาสูตร 100PF พบว่ามีร้อยละการดูดความชื้นที่สูงกว่าฟิล์มสูตร 0DASF เนื่องจากเพคตินมีสมบัติการเกิดเจลและความชอบน้ำที่สูงกว่าแป้งจากหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโครงสร้างที่มากกว่าทำให้เพคตินสามารถเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีกว่าแป้ง



(ก)



(ข)

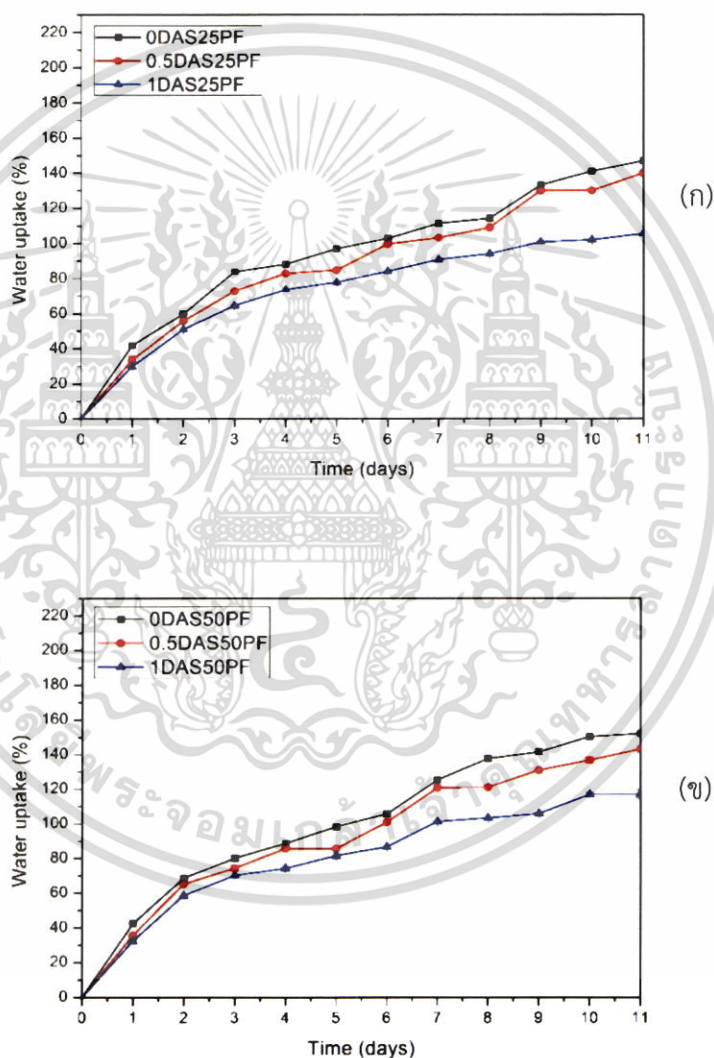


(ค)

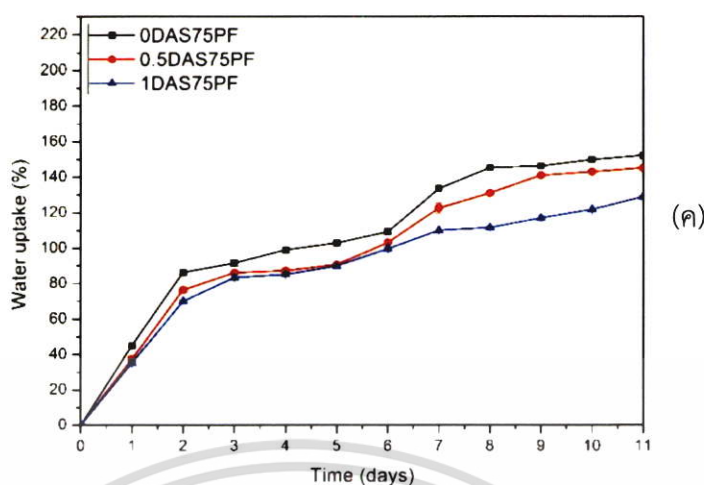
รูปที่ 4.17 ร้อยละการดูดความชื้นตัวของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่เพิ่มปริมาณเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ (ก) 0DASF (ข) 0.5DASF และ (ค) 1DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 (ก)-(ค) พบว่า ฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF มีร้อยละการดูดความชื้นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเพคติน โดยฟิล์มสูตร 1DASF, 1DAS25PF, 1DAS50PF และ 1DAS75PF มีร้อยละการดูดความชื้นในวันที่ 3 ของการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 51.96, 64.64, 70.25 และ 83.37 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าฟิล์มสูตร 0DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน โดยฟิล์มสูตร 0DASF, 0DAS25PF, 0DAS50PF และ 0DAS75PF มีค่าร้อยละการดูดความชื้นเท่ากับ 82.36, 83.43, 80.16 และ 91.55 ตามลำดับ เนื่องจากเพคตินมีความชอบน้ำมากกว่าแป้งไดอัลตีไฮด์ และสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างจากสมบัติการเกิดเจลทำให้ฟิล์มดูดความชื้นในบรรยากาศได้สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

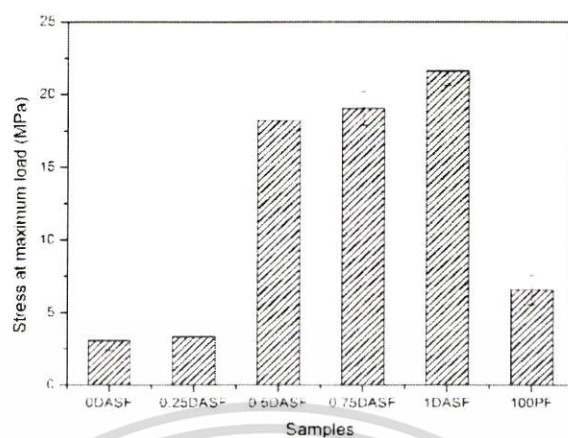


รูปที่ 4.18 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และปริมาณเพคตินคงที่ (ก) 25P (ข) 50P และ (ค) 75P

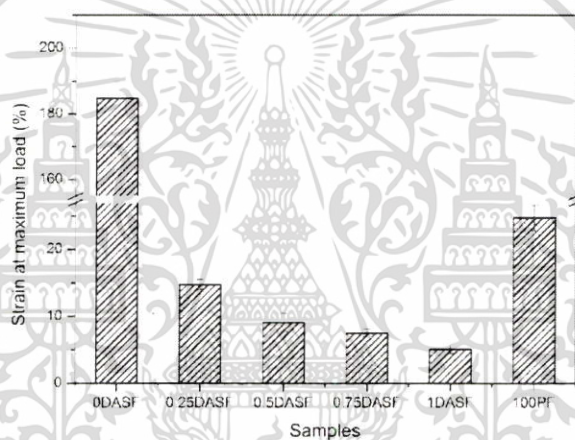
จากรูปที่ 4.18 (ก)-(ค) พิจารณาฟิล์มที่ปรับปรุงด้วยเพคตินปริมาณคงที่ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ พบว่าร้อยละการดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ โดยฟิล์มสูตร 0DAS75PF, 0.5DAS75PF และ 1DAS75PF มีค่าร้อยละการดูดความชื้นในวันที่ 3 ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ มีค่าเท่ากับ 91.55, 86.07 และ 83.37 ลดลงตามลำดับ เนื่องจากฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF มีความชอบน้ำลดลงจากการแทนที่หมู่คาร์บอกซิลด้วยหมู่อัลดีไฮด์ ของแป้งได้อัลดีไฮด์ส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการไฮโดรไลซิส รวมถึงความเสถียรของเม็ดแป้งที่สูงขึ้นจากการเชื่อมโยงระหว่างเม็ดแป้ง สอดคล้องกับผลของร้อยละการบวมตัว และสัณฐานวิทยา ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำลดลง เมื่อเพคตินผสมอยู่กับแป้งได้อัลดีไฮด์ ส่งผลให้ความชอบน้ำของระบบลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร 0DASF จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF มีร้อยละการดูดความชื้นของฟิล์มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ การใส่เพคตินส่งผลให้ร้อยละการดูดความชื้นสูงขึ้น และฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีร้อยละการดูดความชื้นที่ต่ำกว่าสูตร 0DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน

4.2.6 สมบัติเชิงกล

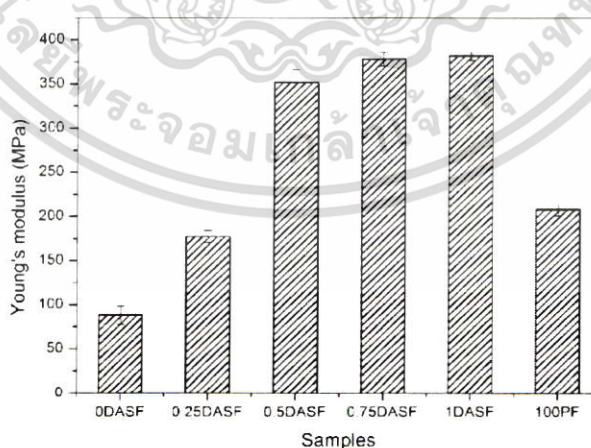
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยทำการศึกษาค่าแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่มีอัตราส่วนของแป้งต่อสารออกซิไดส์ 1:0, 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19



(ก)



(ข)



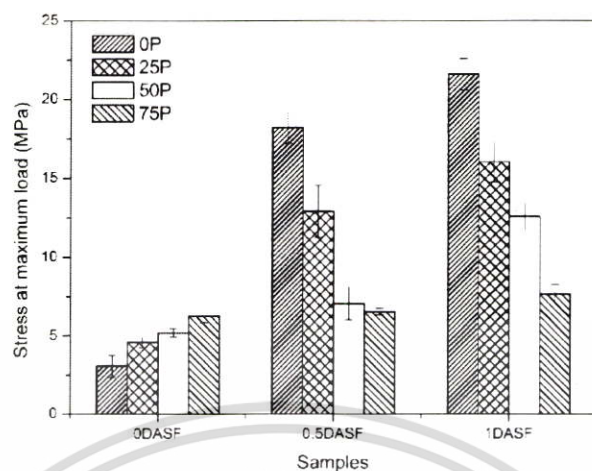
(ค)

รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF (ก) ความแข็งแรงถึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) โมดูลัส

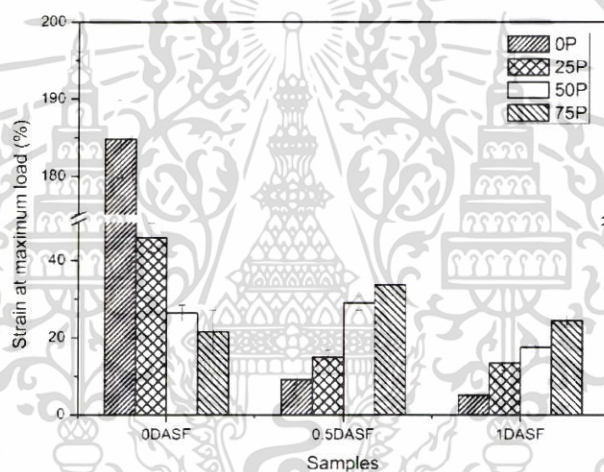
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) และค่ามอดุลัส (Modulus) ของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load) มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ โดยสูตร 1DASF มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงสุด คือ 21.59 MPa และ 382 MPa และมีร้อยละการดึงยืดที่ต่ำที่สุด มีค่า 5.15 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร ODASF ที่มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสที่ต่ำกว่าโดยมีค่า 3.07 และ 88.1 MPa ตามลำดับ ในขณะที่มีร้อยละความชอบน้ำและดูดความชื้นสูงซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซอร์ส่งผลให้การดึงยืดมากที่สุด มีค่า 184.81 เนื่องจากความมีขั้วของหมู่ไฮดรอกซิลของฟิล์มสูตร ODASF ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความนิ่ม สามารถในการรับแรงดึงได้น้อยลงและดึงยืดได้สูงขึ้น จากภาคผนวก จ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบร้อยละสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างฟิล์มสูตร ODASF และ 1DASF พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัส มีค่าร้อยละเพิ่มขึ้น 603.25 และ 333.59 ตามลำดับ ในขณะที่การร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลงลงร้อยละ 97.21

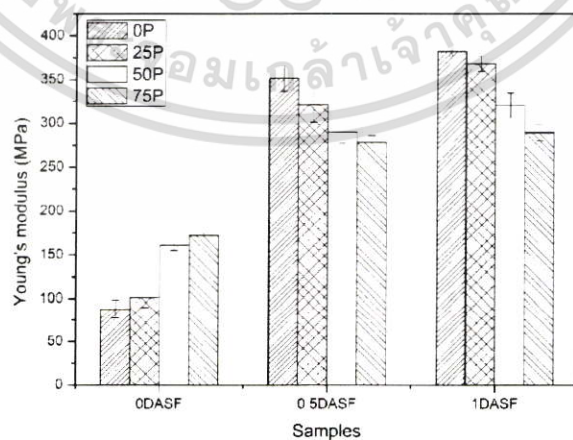
เมื่อแบ่งถูกตัดแปรเป็นแบ่งไดอัลดีไฮด์จากฐานฐานวิทยาในหัวข้อ 4.2.2 แสดงให้เห็นถึงภาคตัดขวางที่เรียบมากขึ้น ปริมาณผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงดังตารางที่ 4.10 รวมถึงพันธะเชื่อมโยงระหว่างแบ่งตัดแปรไดอัลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.2 ส่งผลให้ฟิล์มแข็งและเปราะ มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละการดึงยืดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปรารณา คำใส [4] ที่ได้ทำการศึกษาฟิล์มผสมจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรไดอัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลร้อยละ 20 พบว่าฟิล์มที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของแบ่งตัดแปรไดอัลดีไฮด์ และร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของแบ่งตัดแปรที่ร้อยละ 0, 15, 30, 50 และ 70 ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Yu. J. และคณะ [6] ที่ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มของแป้งมันฝรั่งโดยใช้ไซโตเดียมเมตาเปอร์ไฮโอเดตเป็นสารออกซิไดส์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแบ่งต่อสารออกซิไดส์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) โมดูลัส

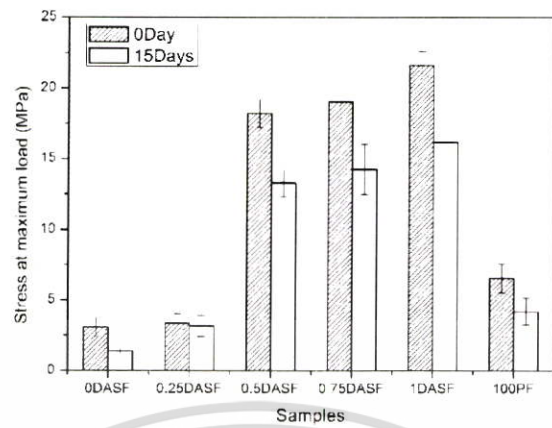
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 (ก)-(ค) และภาคผนวก จ พิจารณาฟิล์มสูตร ODASF ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นร้อยละ 102.93 และ 95.23 ในขณะที่ร้อยละการดึงยืดมีค่าลดลงร้อยละ 88.36 เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง เนื่องจากเพคตินมีความเข้ากันได้กับแป้ง สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ ยืนยันได้จากผลของ FT-IR และการใส่เพคตินไปในฟิล์มสูตร ODASF ทำให้ปริมาณผลึกมีค่าสูงขึ้น รวมถึงสมบัติของฟิล์มเพคตินสูตร 100PF ที่แสดงถึงความสามารถในการรับแรงที่มากกว่าและดึงยืดได้น้อยกว่าฟิล์มสูตร ODASF แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก)-(ค) ส่งผลให้ฟิล์มสูตร ODASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสที่มากกว่าแต่มีร้อยละการดึงยืดที่น้อยกว่าฟิล์มสูตร ODASF

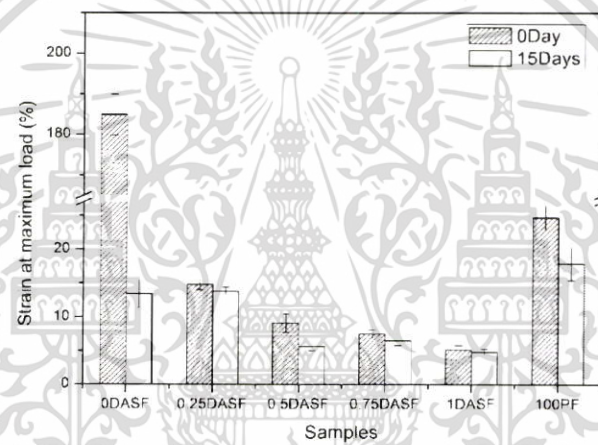
จากรูปที่ 4.20 (ก)-(ค) และภาคผนวก จ เมื่อฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ปรับปรุงด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง พบว่าในฟิล์มสูตร 1DAS75PF มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสมีค่าลดลงร้อยละ 64.65 และ 24.29 ในขณะที่ร้อยละการดึงยืดเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 373.78 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร 1DASF โดยฟิล์มสูตร 1DAS75PF มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 7.63 MPa ค่ามอดูลัสเท่ากับ 289.2 MPa และร้อยละการดึงยืดเท่ากับ 24.4 ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดการค้าโดยมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 7.85 MPa และ 160 MPa ตามลำดับ [48] เนื่องจากฟิล์มแป้งไดอัลดีไฮด์ซึ่งมีความแข็งแรง และเปราะก่อนนำมาปรับปรุงด้วยเพคติน สามารถเข้ากันได้กับเพคตินที่เป็นเอเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ ดังแสดงจากผลของสัณฐานวิทยา ฟิล์มมีปริมาณความเป็นผลึกลดลงจากการปรับปรุงด้วยเพคตินและเนื่องจากเพคตินมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน มีสมบัติการเกิดเจล สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ ซึ่งน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลให้สายโซ่ของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรง นอกจากนี้ฟิล์มเพคตินสูตร 100PF มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสที่มากกว่า ในขณะที่มีร้อยละการดึงยืดที่น้อยกว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ทำให้ฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีความสามารถในการรับแรงลดลงแต่สามารถดึงยืดได้มากขึ้น

4.2.7 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

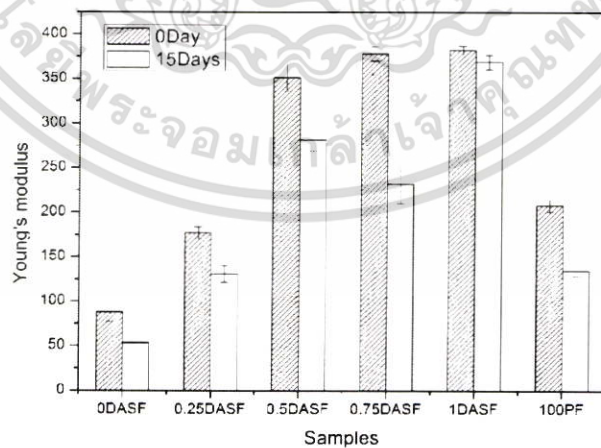
การทดสอบย่อยสลายโดยการฝังดิน ที่มีความชื้นในดิน 5-10% เป็นระยะเวลา 15 วัน และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับรับแรงดึงสูงสุด ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ผลแสดงดังรูปที่ 4.21



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ระยะเวลา 0 และ 10 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) โมดูลัส

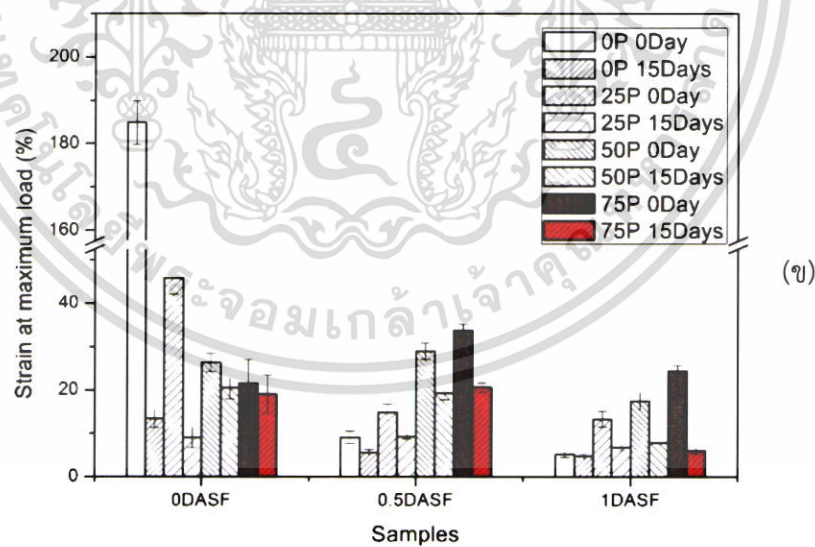
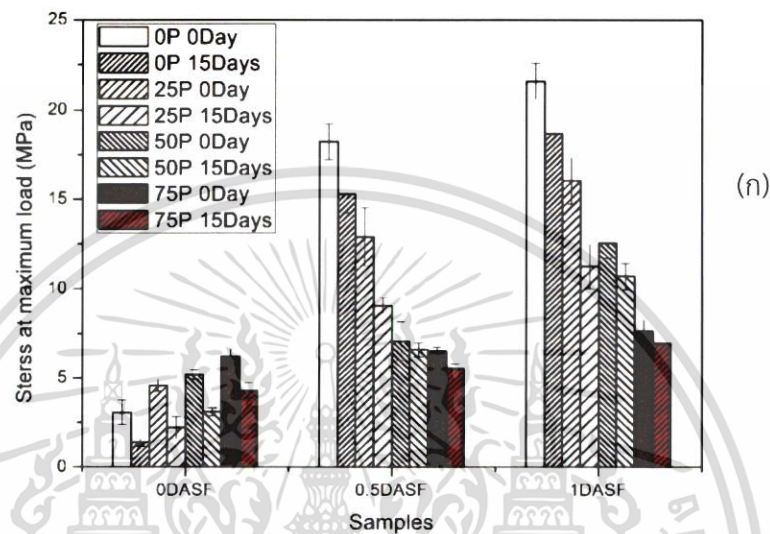
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ร้อยละการลดลงของสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโอสตีไฮด์สตาร์ชสูตรต่าง ๆ

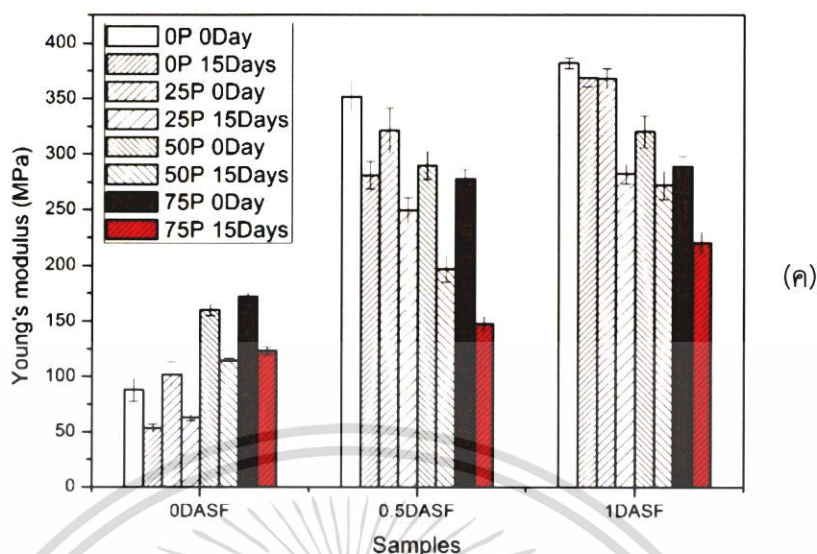
สูตร	ร้อยละการลดลงของสมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส
0DASF	55.13	92.72	39.38
0DAS25PF	51.71	80.2	38.32
0DAS50PF	40.53	22.16	28.61
0DAS75PF	31.26	11.55	28.48
0.25DASF	6.65	8.20	25.98
0.5DASF	16.19	37.88	20.23
0.5DAS25PF	29.78	37.83	22.43
0.5DAS50PF	6.84	33.6	32.10
0.5DAS75PF	15.50	39.12	46.77
0.75DASF	25.20	13.71	38.78
1DASF	13.60	7.61	3.45
1DAS25PF	29.91	48.73	23.24
1DAS50PF	15.02	54.60	14.98
1DAS75PF	9.02	75.36	23.68
100PF	35.87	27.75	32.18

จากการทดสอบย่อยสลายโดยการฝังดิน ที่มีความชื้นในดิน 5-10% และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล จากรูปที่ 4.21 (ก)-(ค) และตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ของเทอร์โมพลาสติกโอสตีไฮด์สตาร์ชฟิล์มหลังฝังดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนฝังดิน และร้อยละการสลายตัวของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อใช้แป้งดัดแปรโอสตีไฮด์ในการขึ้นรูปโดยฟิล์มสูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF มีค่าความแข็งแรงดึงลดลงร้อยละ 55.13, 6.65, 16.19, 25.2, 13.6 ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มสูตร 100PF มีร้อยละการลดลงของค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 35.87 เนื่องจากโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้วทำให้สามารถดูดความชื้นในดิน น้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแป้งสายโซ่ของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรง ส่งผลให้ชิ้นงานหลังฝังดินมีความนิ่มและทนต่อแรงดึงได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนฝังดินที่มีลักษณะที่แข็งและเปราะ การลดลงของร้อยละการย่อยสลายเมื่อใช้ปริมาณสารออกซิโดส์มากขึ้น เกิดขึ้นเนื่องจากแป้งโอสตีไฮด์มีความมีขั้วที่ลดลง จากการแทนที่ของหมู่โอสตีไฮด์ ทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำจากความชื้นที่มีอยู่ในดินไว้ในโครงสร้างลดน้อยลง สายโซ่ของแป้งโอสตีไฮด์ถูกไฮโดรไลซิสด้วยความชื้นต่ำ ทำให้ร้อยละการย่อยสลายลดลง [4, 29] ซึ่งสอดคล้องกับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Du Y.L. และคณะ [21] ที่ได้ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาซาร์ และเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ซ จากแป้งข้าวโพดภายใต้สภาวะควบคุมพบว่าเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ซที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลร้อยละ 95 เริ่มย่อยสลาย ณ วันที่ 37 ของระยะเวลาการทดสอบ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกสตาซาร์เริ่มย่อยสลาย ณ วันที่ 3 ของการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



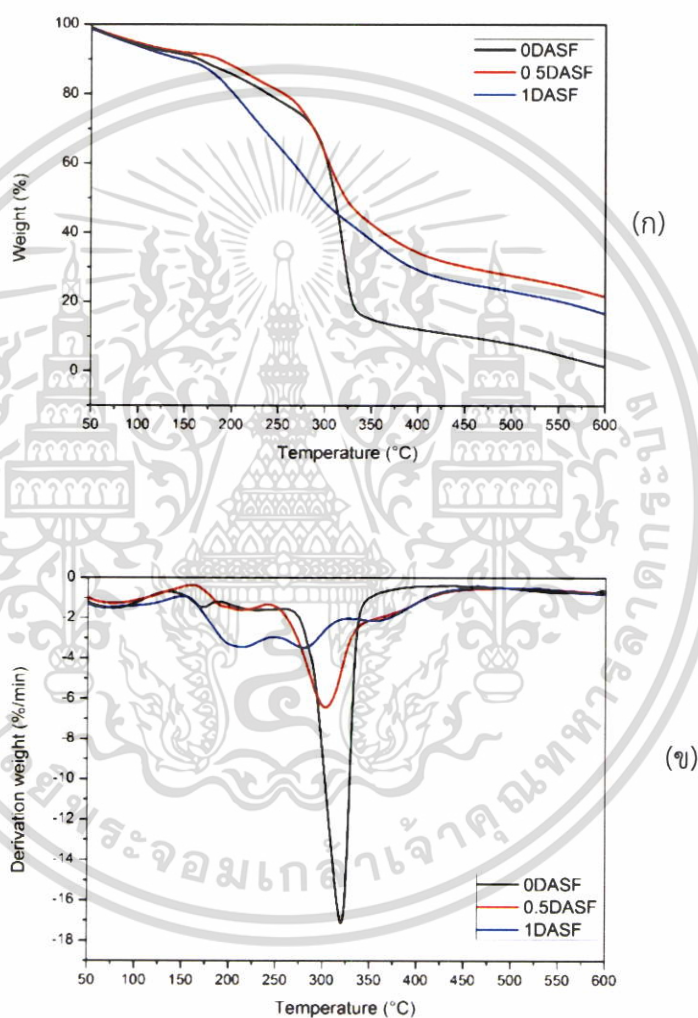
รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง ที่ระยะเวลา 0 และ 10 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ (ค) มอดุลัส

เมื่อพิจารณาฟิล์มหลังฝังดิน ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่ง จากรูปที่ 4.22 (ก)-(ค) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับรับแรงดึงสูงสุด ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนฝังดิน เนื่องจากเพคตินประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้ว สามารถดูดความชื้นที่มีอยู่ในดินซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับผลของการดูดความชื้นทำให้ชิ้นงานมีความนิ่มหนืดต่อแรงดึงได้น้อยกว่าชิ้นงานก่อนฝังดินซึ่งมีลักษณะที่แข็งซึ่งสามารถรับแรงดึงและยืดได้มากกว่า

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน มีการย่อยสลายที่ช้ากว่าฟิล์มสูตร 0DASF ที่ปริมาณเพคตินที่เท่ากันโดยฟิล์มสูตร 0DASF75PF, 0.5DASF75PF และ 1DASF75PF มีร้อยละการย่อยสลายของค่าความแข็งแรงดึงลดลง โดยมีค่า 31.26, 15.50 และ 9.02 ตามลำดับ เนื่องจากความมีขั้วที่ลดลงของแป้งไดออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นลดลง

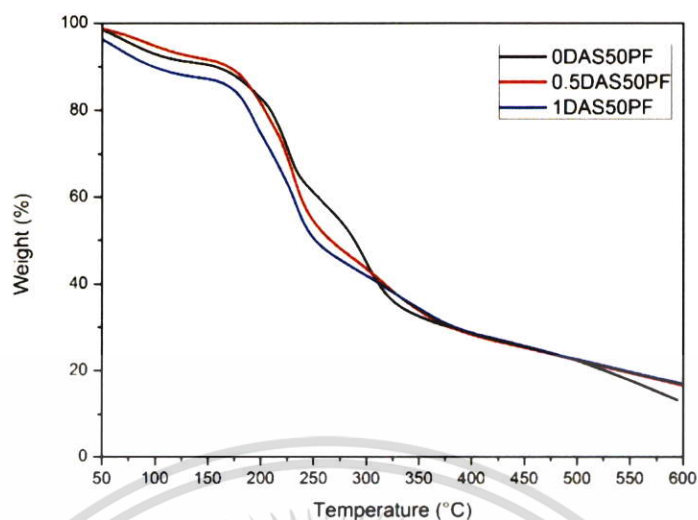
4.2.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis : TGA)

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ฟิล์มสูตร 0DAS, 0.5DAS และ 1DAS ตามลำดับ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) ช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อนของแข็งและน้ำหนักที่หายไป แสดงผลดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 และสามารถสรุปผลของอุณหภูมิการสลายตัวแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4.12

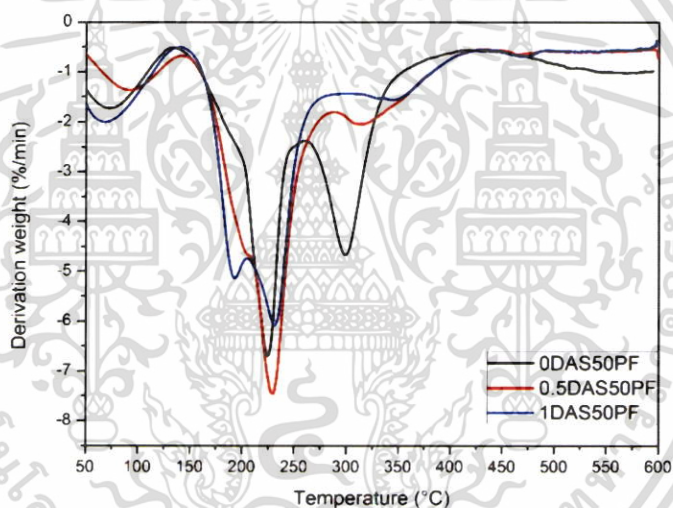


รูปที่ 4.23 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สไตร์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ก) TG และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรได้อัลดีไฮด์ที่ใช้สารออกซิไดส์ปริมาณต่าง ๆ และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินสูตร 0DAS50PF, 0.5DAS50PF และ 1DAS50PF โดย (ก) TG และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) และน้ำหนักที่หายไป (%) ของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODAS, 0.5DAS, 1DAS, ODAS50P, 0.5DAS50P และ 1DAS50P ตามลำดับ

สูตร	ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว (°C)								น้ำหนักที่หายไปช่วงที่ 3 (%)
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2			ช่วงที่ 3			ช่วงที่ 4	
	น้ำ	กลีเซอรอล	เพคติน	แป้งไดอัลดีไฮด์ (ไฮโดรไลซิส)	แป้งไดอัลดีไฮด์ (ไฮโดรไลซิส)	แป้งไดอัลดีไฮด์	แป้งไม่ได้รับการดัดแปร	แป้งไดอัลดีไฮด์ (พันธะเชื่อมโยง)	
(ก) ODASF	79.13	171.8	-	-	-	-	320.86	-	79.02
(ข) 0.5DASF	77.31	212.58	-	212.58	-	302.75		361.2	38.34
(ค) 1DASF	68.07	213.65	-	213.65	-	279.72		354.19	23.08
(ง) ODAS50P	72.3	175.28	224.8	-	-	-	299.41	-	45.12
(จ) 0.5DAS50P	92.16	204.27	-	-	228.7			314.17	31.22
(ฉ) 1DAS50P	67.51	193.5	-	-	231.57			344.12	29.28

จากรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.12 (ก)-(ค) แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มสูตร ODASF, 0.5DASF และ 1DASF จากผลการทดลอง พบว่าฟิล์มแบ่งอุณหภูมิการสลายตัวเป็น 4 ช่วงได้แก่ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 68–79 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 171–213 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ [29] และแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการแตกออกของ C2 และ C3 เปลี่ยนจากหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์และเกิดการไฮโดรไลซิสที่บริเวณสายโซ่ของแบ่งที่พันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4 ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 279–320 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแบ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ร่วมกับแบ่งบางส่วนที่ไม่เกิดการดัดแปร ฟิล์มสูตรที่ใช้แบ่งดัดแปรมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มสูตร ODASF เนื่องจากแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสามารถถูกตัดสายโซ่จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากกว่าผลของการเกิดพันธะเชื่อมโยงส่งผลให้มวลโมเลกุลของแบ่งลดลง [30, 37] ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่ 3 ลดลงเมื่อใช้แบ่งไดอัลดีไฮด์ และช่วงที่ 4 อุณหภูมิ 354–361 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดการเชื่อมโยง [49] ซึ่งปรากฏในฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF แสดงถึงแบ่งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ส่วนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยง หลังจากหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสเปลี่ยนจากหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์ ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของช่วงที่ 4 มีค่ามากกว่าการสลายตัวของแบ่งไม่ดัดแปรในฟิล์มสูตร ODASF นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของช่วงที่ 3 ลดลง โดยมีค่า 79.02, 38.34 และ 23.03 ตามลำดับ เนื่องจากหมูไดอัลดีไฮด์สามารถเกิดเป็นพันธะระหว่างโมเลกุลและพันธะภายในโมเลกุลของหมู่เอมิอะซิทัลและหมู่อะซิทัล เป็นผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นจากการเชื่อมโยง ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของแบ่งดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปรรธนา คำใส [4] ที่ได้ทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ฟิล์มผสมระหว่างแบ่งและแบ่งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของแบ่งไดอัลดีไฮด์ส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของแบ่งลดลง

จากรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.12 (ง)-(ฉ) แสดงข้อมูลผลการวิเคราะห์ของฟิล์มสูตร ODAS50PF, 0.5DAS50PF และ 1DAS50PF จากผลการทดลอง พบว่าฟิล์มมีอุณหภูมิการสลายตัวเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 67–72 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของกลีเซอรอลและเพคตินซึ่งถูกพลาสติกไซส์ด้วยกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 175–224 องศาเซลเซียส [50] ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 228–231 เป็นการสลายตัวของแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการแตกออกของ C2 และ C3 เปลี่ยนจากหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์และเกิดการไฮโดรไลซิสที่บริเวณสายโซ่ของแบ่งที่พันธะกลูโคซิดิกชนิด แอลฟา-1,4 และส่วนของแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ที่อยู่ร่วมกับแบ่งบางส่วนที่ไม่เกิดการดัดแปร ช่วงที่ 4 อุณหภูมิ 314–344 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแบ่งไดอัลดีไฮด์ที่เกิดการเชื่อมโยงร้อยละน้ำหนักที่หายไปของช่วงที่ 3 ลดลงจาก 45.12, 31.22 และ 29.28 เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์แสดงถึงเสถียรภาพที่ดีขึ้นของแบ่งจากแบ่งไดอัลดีไฮด์ส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง และการปรับปรุงฟิล์มด้วยเพคตินส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแบ่งช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร ODASF เนื่องจากเพคตินมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าแบ่งซึ่งเพคตินมีการสลายตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และสามารถสลายตัวได้ต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 230 องศาเซลเซียส [51] เมื่อมีการใส่เพคตินลงไปในระบบ ขณะที่แบ่งซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่ามีปริมาณลดลงส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของทั้งระบบลดลง ส่งผลให้ฟิล์มสูตร ODAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5DAS50PF และ 1DAS50PF มีอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในช่วงที่ 3 และ 4 ที่ต่ำกว่าฟิล์มสูตร 0DASF 0.5DASF และ 1DASF ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ วิจารณ์ พิตรพิศุทธิ์กุล [50] ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ของแป้งมันสำปะหลังและ เพคตินพบว่าเมื่อมีการใส่เพคตินร้อยละ 20 ทำให้อุณหภูมิของแป้งลดลงจาก 307.00 องศาเซลเซียส ไปยัง 300.50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าฟิล์มสูตร 1DAS50PF มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF คาดว่าเกิดจากเมื่อแป้งถูกตัดแปรเป็นแป้งไดอัลดีไฮด์หมู่คาร์บอกซิลเปลี่ยนเป็นหมู่แทนที่อัลดีไฮด์โครงสร้างของแป้งไดอัลดีไฮด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเพคติน สอดคล้องกับผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่มีการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของ O-H stretching ทำให้อุณหภูมิของการสลายตัวของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน

4.2.9. การวัดสี

การทดสอบการวัดสีโดยเครื่องวัดสี (Colorimeter) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกฟิล์มไดอัลดีไฮด์สตาร์ และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน เพื่อวัดค่าตามมาตรฐาน CIE L^* a^* b^* C^* H^* และค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness Index : YI) ตามมาตรฐาน ASTM E313-96 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D 65/10° ผลแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ และเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักแบ่งตามลำดับ

สูตร	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี					
	L*	a*	b*	C*	h°	YI
0DASF	36.63	-0.68	-0.91	1.13	53.23	-3.61
0DAS25PF	31.18	-0.45	1.56	1.49	73.9	5.3
0DAS50PF	30.51	0.57	5.02	5.05	83.52	27.1
0DAS75PF	29.72	0.43	7.11	7.12	86.53	31.58
0.25DASF	21.21	-1.94	-0.15	1.93	4.42	-2.11
0.5DASF	32.94	-1.52	0.79	1.29	27.46	-1.57
0.5DAS25PF	28.08	-1.36	6.4	6.25	78	23.43
0.5DAS50PF	27.77	-0.03	10.42	10.41	89.83	50.88
0.5DAS75PF	27.3	1.62	17.12	17.19	84.59	66.97
0.75DASF	27.09	-1.54	0.06	1.53	2.23	2.26
1DASF	31.28	-1.19	0.72	0.94	31.17	-0.65
1DAS25PF	29.48	-0.67	6.74	6.7	84.32	28.31
1DAS50PF	28.04	-0.47	9.27	9.25	87.09	49.69
1DAS75PF	27.38	0.25	13.44	13.44	88.93	59.79
100PF	29.12	1.21	9.45	9.45	82.7	38.81

(ก) ค่าสีตามระบบของ CIE L*a*b* และ CIE L* C* h°

เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกฟิล์มไดอัลดีไฮด์สตาร์ช พบว่าค่าความสว่าง (L*) ฟิล์มสูตร 0DASF มีค่าความสว่างสูงที่สุด และค่าความสว่างมีค่าลดลงเมื่อแบ่งถูกออกซิไดส์ โดยมีค่า 21.21, 32.94, 27.09 และ 31.28 ในสูตร 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณสารออกซิไดส์อัตราส่วนโดยโมล 1 : 0.25 แบ่งมีความสว่างน้อยที่สุด และฟิล์มที่ได้มีสีออกปาทางสีเขียว (a*) เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร 0DASF โดยมีค่า -0.68, -1.94, -1.52, -1.54 และ -1.19 เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าฟิล์มมีสีออกเหลือง (b*) เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณสารออกซิไดส์เพิ่มสูงขึ้น โดยสูตร 0.5DASF และ 1DASF มีค่าสีออกทางเหลืองที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.79 และ 0.72 ตามลำดับ ค่าความสดสี (C*) ของฟิล์มที่มีการตัดแปรงเป็นแบ่งไดอัลดีไฮด์มีค่าอยู่ในช่วง 0–2 มีค่าใกล้เคียงฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยแบ่งที่ไม่ได้รับการตัดแปรงซึ่งมีค่า 1.13 โดยฟิล์มสูตร 0.5DASF มีค่าความสดสีใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร 0DASF มากที่สุด และตำแหน่งของสี (h°) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร 0DASF มีค่าลดลง เมื่อแบ่งถูกตัดแปรงเป็นแบ่งไดอัลดีไฮด์ โดยพบว่าฟิล์มสูตร 0DASF มีตำแหน่งของสี 53.23° มีค่าไปทิศทางเหลือง ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มสูตร 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF และ 1DASF มีตำแหน่งของสีไปทิศทางสีแดง โดยพบว่า ฟิล์มสูตร 1DASF มีตำแหน่งสีใกล้เคียงกับสูตร ODAS มากที่สุด โดยมีตำแหน่งสีเท่ากับ 31.17°

เมื่อปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกฟิล์มไดอัลไธด์สตาร์ซสูตร ODASF, 0.5DASF และ 1DASF ด้วยเทคนิคที่ปริมาณร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ จากตารางที่ 4.10 พบว่า ความสว่าง (L^*) ของฟิล์มมีค่าน้อยกว่าฟิล์มสูตร ODASF โดยค่าความสว่างมีค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาณเทคนิคต่าง ๆ ฟิล์มมีสีไปทางสีเหลือง (b^*) เพิ่มมากขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเทคนิคในปริมาณสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Galus S. และคณะ [52] ที่ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มบริโภคได้ผสมระหว่างอัลจินต และเทคนิค พบว่าที่ปริมาณเทคนิคเพิ่มขึ้นค่าความสว่างของฟิล์มมีค่าลดลง ในขณะที่ฟิล์มมีสีไปทางสีแดงและเหลืองเพิ่มมากขึ้น

(ข) ค่าดัชนีความเหลือง (YI)

จากค่าดัชนีความเหลือง (Yellow Index) พบว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF มีดัชนีความเหลืองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเทคนิคร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร ODASF มีค่าดัชนีความเหลือง -3.61 เนื่องจากเทคนิคก่อนนำมาขึ้นรูปมีลักษณะเป็นผงมีสีออกทางน้ำตาล ส่งผลให้สีโดยรวมของชิ้นงานออกไปทางสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใส่เทคนิค โดยสูตร 0.5DASF75PF มีค่าดัชนีความเหลืองสูงสุด โดยมีค่า 66.97 สอดคล้องกับงานวิจัยของ วรวรรณ พัฒนสิน [29] ที่พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซมีสีออกไปทางสีเหลืองเพิ่มมากขึ้นโดยมีค่าไปทางสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 16.6 เมื่อมีปริมาณเทคนิคร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเทคนิคที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ต่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรฟิล์มไดอัลดีไฮด์จากแป้งมันสำปะหลัง หลังจากทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ สรุปผลการวิจัยดังนี้

5.1.1 การศึกษาสมบัติของเม็ดแป้ง

5.1.1.1 จากการทดสอบหาปริมาณหมู่อัลดีไฮด์ พบว่า แป้งไดอัลดีไฮด์สูตร 0DAS, 0.25DAS, 0.5DAS, 0.75DAS และ 1DAS มีปริมาณหมู่แทนที่อัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นจาก 0, 43.39 ± 3.20 , 60.46 ± 2.05 , 70.21 ± 3.54 และ 80.61 ± 2.01 ตามลำดับ

5.1.1.2 จากการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) พบว่า แป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์ปรากฏพีกที่ช่วงความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching มีความเข้มของพีกสูงขึ้นตามปริมาณของสารออกซิไดส์ และมีการสั่นแบบ C-O-H Stretching ที่ตำแหน่งพีก 1159 cm^{-1} มีความเข้มของพีกลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นของ O-H Stretching จากแป้งเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง

5.1.1.3 จากการทดสอบสัณฐานวิทยาที่กล้องขยาย 2000 เท่า พบว่า เม็ดแป้งในสูตร 0.5DAS และ 1DAS มีลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณตรงกลางของเม็ดแป้งเกิดการยุบตัวของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัดและมีแนวโน้มการยุบตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารออกซิไดส์ที่เพิ่มสูงขึ้น

5.1.1.4 จากการศึกษาความหนืด พบว่า ค่าความหนืดของแป้งสูตร 0.25DAS, 0.5DAS, 0.75DAS และ 1DAS พบว่าค่าความหนืดของแป้งไดอัลดีไฮด์มีค่าลดลงเมื่อใช้สารออกซิไดส์ปริมาณสูงขึ้นและมีค่าน้อยกว่าสูตร 0DAS โดยมีความหนืดสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 90°C

5.1.1.5 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าแป้งมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ลดลง และแป้งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยแป้งสูตร 0DAS, 0.5DAS และ 1DAS มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปลดลงจาก 89.39, 24.14 และ 22.65 ตามลำดับ

5.1.2 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาโรฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเทคนิค

5.1.2.1 จากการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) พบว่าแป้งไดอัลดีไฮด์มีส่วนพื้นที่ได้กราฟของพีก 1735 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารออกซิไดส์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สัดส่วนพื้นที่ได้กราฟของพีก 1159 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C-O Stretching ลดลง เมื่อปรับปรุงด้วยเทคนิคการเคลื่อนที่ของพีกในช่วงความยาวคลื่น 1735 cm^{-1} เคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่น 1750 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของเทคนิค และมีสัดส่วนพื้นที่ได้กราฟของพีกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเทคนิค นอกจากนี้ พบว่ามีการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงของการสั่นแบบ O-H Stretching และ O-H Bending แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มจากแบงัดดแปรไดอัลทีไฮด์มีภาพตัดขวางที่เรียบมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ เมื่อปรับปรุงด้วยเพคติน พบว่าเพคตินสามารถเข้ากันได้กับแบงัดดแปรไดอัลทีไฮด์ และมีภาพตัดขวางที่เรียบขึ้น

5.1.2.3 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF และ 1DASF มีร้อยละปริมาณผลึกเท่ากับ 57.27 และ 57.38 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร ODASF เมื่อใส่เพคติน พบว่าฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF และ 1DAS50PF มีร้อยละความเป็นผลึกที่ลดลง โดยมีค่า 53.39 และ 54.88 ตามลำดับ

5.1.2.4 จากการศึกษาสมบัติการบวมตัว พบว่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อใช้แบงัดที่ถูกดัดแปรด้วยสารออกซิไดส์ในอัตราส่วนโดยโมลสูงขึ้น เมื่อใส่เพคตินร้อยละการบวมตัวของฟิล์มมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของเพคตินที่เพิ่มขึ้น และฟิล์มสูตร 1DASF มีร้อยละการบวมตัวต่ำที่สุดในขณะที่ฟิล์มสูตร ODAS75PF มีร้อยละการบวมตัวสูงที่สุด

5.1.2.5 จากการศึกษาการดูดความชื้น พบว่า ร้อยละการดูดความชื้นและการเกิดเชื้อราลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละโดยโมลของแบงัดต่อสารออกซิไดส์ เมื่อใส่เพคตินแสดงให้เห็นว่าร้อยละการดูดความชื้นสูงขึ้นเมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มมากขึ้น และฟิล์มสูตร 1DASF มีการดูดความชื้นน้อยที่สุดในขณะที่ฟิล์มสูตร 100PF มีการดูดความชื้นมากที่สุด

5.1.2.6 จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า จากการดัดแปรแบงัดเป็นแบงัดไดอัลทีไฮด์ ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยสูตร 1DASF มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสสูงที่สุด หลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินกับแบงัดไดอัลทีไฮด์พบว่าฟิล์มมีความนิ่มและสามารถยืดได้มากขึ้น โดยฟิล์มไดอัลทีไฮด์ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน สูตร 0.5DAS75PF มีค่าร้อยละการดึงยืดสูงที่สุด และฟิล์มสูตร 1DASF ดึงยืดได้น้อยที่สุด ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่า 6.59 ± 0.39 และ 18.66 ± 1.16 MPa ตามลำดับ

5.1.2.7 จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด คามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ของฟิล์มจากแบงัดไดอัลทีไฮด์หลังฝังดินมีแนวโน้มลดลง มีร้อยละการย่อยสลายที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ใช้แบงัดที่ไม่ได้รับการดัดแปร แต่สามารถย่อยสลายได้ เมื่อปรับปรุงด้วยเพคติน พบว่ามีร้อยละการย่อยสลายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคติน โดยฟิล์มจากแบงัดไดอัลทีไฮด์สูตร 0.5DAS และ 1DASF ที่ใส่เพคตินมีการย่อยสลายที่น้อยกว่าฟิล์มจากแบงัดสูตร ODASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน

5.1.2.8 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดส์ เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแบงัดลดลง และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยฟิล์มสูตร 1DAS50PF มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปของแบงัดน้อยที่สุด ในขณะที่ฟิล์มสูตร ODASF มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปสูงที่สุด

5.1.2.9 จากการศึกษาการวัดสี พบว่าฟิล์มจากแบงัดดัดแปรไดอัลทีไฮด์และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน มีค่าความสว่างลดลง ฟิล์มที่ได้มีสีออกปาทาสีเขียวและเหลืองเพิ่มมากขึ้น ค่าตำแหน่งสีของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงฟิล์มสูตร ODASF และตำแหน่งของสีมีค่าไปทิศทางสีแดง เมื่อปรับปรุงด้วย

เพคติน พบว่าฟิล์มมีดัชนีความเหลืองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเพคติน โดยฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF มีค่าดัชนีความเหลืองมากที่สุด

5.1.2.9 ฟิล์มสูตร 0.5DAS75PF เป็นสูตรที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกลที่มีค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสมีค่าอยู่ในช่วงของฟิล์มเกรดการค้า นอกจากนี้ค่าร้อยละการบวมตัวและร้อยละการดูดความชื้นน้อยกว่าฟิล์มสูตร 0DASF ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน และสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าฟิล์มสูตร 0.5DASF คาดว่าสามารถนำฟิล์มสูตร 0.5DAS75PF ไปต่อยอดพัฒนาเป็นฟิล์มใช้งานภายในสำนักงานเพื่อลดปัญหาปริมาณขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงสมบัติได้โดย

5.2.1 ศึกษาการดัดแปรแบบสองครั้ง (Dual modification) เพื่อปรับปรุงสมบัติ เช่น สมบัติเชิงกล โดยนำแป้งไดอัลดีไฮด์ที่ได้ไปทำการดัดแปรเป็นแป้งอีเทอร์ (Etherification Starch) เพื่อเพิ่มสมบัติการดึงยืดของฟิล์ม ตลอดจนศึกษาถึงลำดับ วิธีการและระยะเวลาในการสังเคราะห์แป้ง

5.2.2 ศึกษาการดัดแปรเพคตินเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางด้านการบวมตัว การดูดความชื้นที่เกิดจากความชื้นของเพคติน เช่น การดัดแปรเพคตินด้วยวิธีการทำเป็นเพคตินไดอัลดีไฮด์

5.2.3 ศึกษาการนำสารพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่น เช่น ไคโตซาน คาราจีแนน อัลจิเนต ซึ่งคาดว่าจะมีความเข้ากันได้กับแป้งมาผสมกับแป้งไดอัลดีไฮด์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านอื่น ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กล้านรงค์ ศิริโรต และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์.
- [2] Zhang, S.D. Wang, X.L. Zhang, Y.R. . Yang, K.K. and Wang, Y.Z. 2010. "Preparation of a new dialdehyde starch derivative and investigation of its thermoplastic properties." *Journal of Polymer Research*. 17 : 439-446.
- [3] ไพโรจน์ ใบตาเฮ. 2555. "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โม-พลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์." วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [4] ปรรณนา คำใส. 2559. "ฟิล์มผสมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไดอัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลัง." วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Imeson, A. 2010. **Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents** (1st ed). United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd.
- [6] Yu, J. Chang, P.R. and Ma X. 2010. "The preparation and properties of dialdehyde starch and thermoplastic dialdehyde starch." *Carbohydrate Polymers*. 79 : 296-300.
- [7] Zhang, S.D. Zhang, Y.R. Zhu, J. Wang, X.L. Yang, K.K. and Wang, Y.Z. 2007. "Modified corn starches with improved comprehensive properties for preparing thermoplastics." *Starch-Stärke*. 59 : 258-268.
- [8] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์, 2546. "เคมีพอลิเมอร์". พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [10] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. ม.ป.ป. "ปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์." หน้า 190. เอกสารประกอบการเรียนคณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [11] สุกัลยา พลเดช, (ผู้รวบรวม). 2556. แป้ง (Flour) และ สตาร์ช (Starch)... ต่างกันอย่างไร. กรุงเทพฯ.
- [12] กล้านรงค์ ศิริโรต. ม.ป.ป. การแปรรูปและการใช้ประโยชน์แป้งมันสำปะหลัง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [13] สถาบันอาหาร. ม.ป.ป. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง(มอก. 274-2521). กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- [14] สถาบันอาหาร. ม.ป.ป. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร (มอก. 1073-2535). กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] ลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์. 2550. “การดัดแปรข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [16] ณัฐยา พุนสุพรรณ, ปาณิสรา จางศิริกุล, นิภาวัลย์ นีระมนต์, และกาญจนา ละม้ายศรี. 2557. “อิทธิพลของสภาวะในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และความหนืด.” วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 7 (1) : 57-64
- [17] โรสลาวาตี โต๊ะแอะ, ปฐมา จาตกานนท์, รุ่งทิวา วันสุขศรี, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. ม.ป.ป. “การเตรียมแป้งข้าวละลายน้ำเย็นจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน.” ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [18] Wongsakorn, R. Shobsngob, S. and Varavinit, S. 2005. “Preparation and physicochemical properties of dialdehyde tapioca starch.” *Starch-Stärke* . 57 : 166-172.
- [19] Zhang, S.D. Wang, X.L. Zhang, Y.R. Yang, K.K. and Wang, Y.Z. 2010. “Preparation of a new dialdehyde starch derivative and investigation of its thermoplastic properties.” *Journal of Polymer Research*. 17 : 439-446.
- [20] Veelaert, S. Wit, D.D. Gotlieb, K.F. and Verhe, R. 2010. “The gelation of dialdehyde starch.” *Carbohydrate Polymers*. 32 : 131-139.
- [21] Du, Y.L. Cao, Y. Lu, F. Li, F. Cao, Y. Wang, X.L. and Wang, Y.Z. 2008. “Biodegradation behaviors of thermoplastic starch (TPS) and thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) under controlled composting conditions.” *Polymer Testing*. 27 : 924-930.
- [22] Roberts, J.C. 1996. **Paper chemistry**. (2nded). United Kingdom: Chapman & Hall.
- [23] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2560. **เพกทิน**.
 [online].Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/เพกทิน> สืบค้นข้อมูลวันที่ 10/10/60
- [24] Imeson, A. 1992. **Thickening and gelling agents for food** (1st ed). United Kingdom : Chapman & hall.
- [25] Coffin, D.R. And Fishman, M.L. 1994. “Physical and mechanical properties of highly plasticized pectin/starch film.” *Journal of Applied Polymer Science*. 54 : 1311-1320.
- [26] Fishman, M.L. Coffin, D.R. Unruh, J.J. and Ly, T. 1996. “Pectin/starch/glycerol film : blend or composites.” *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*. A33(5) : 639-654.
- [27] Veelaert, S. Wit D.D. Gotlieb, K.F. and Verb, R. 1997. “Chemical and physical transitions of periodate oxidized potato starch in water.” *Carbohydrate Polymers*. 33 : 153-162.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Galus, S. and Lenart, A. 2013. "Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin." *Journal of Food Engineering*. 115 : 459-465.
- [29] วรวรรณ พัฒนสิน. 2556. "การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังด้วย เพคติน, ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย." วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] Zuo, Y. Liu, W. Xiao, J. Zhao, X. Zhu, Y. and Wu, Y. 2007. "Preparation and characterization of dialdehyde starch by one-step acid hydrolysis and oxidation." *International Journal of Biological Macromolecules*. 103 : 1257-1264.
- [31] Chung, C. Lee, M. and Choe, E.K. 2004. "Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy." *Carbohydrate Polymers*. 58 : 417-420.
- [32] Edhirej, A. Sapuan, S.M. Jawaid, M. and Zahari, N.I. 2017. "Cassava/sugar palm fiber reinforced cassava starch hybrid composites: Physical, thermal and structural properties." *International Journal of Biological Macromolecules*. 101 : 75-83.
- [33] Marques, P.T. Lima, A.M.F. Bianco, G. Laurindo, J.B. Borsali, R. Le Meins, J.F. and Soldi, V. 2006. "Thermal properties and stability of cassava starch films cross-linked with tetraethylene glycol diacrylate." *Polymer Degradation and Stability*. 91 : 726-732.
- [34] Irudayaraj, J. and Yang, H. 2002. "Depth profiling of a heterogeneous food-packaging model using step-scan Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy." *Journal of Food Engineering*. 55 : 25-33.
- [35] Sangseethong, K. Termvejsayanon, N. and Sriroth, K. 2010. "Characterization of physicochemical properties of hypochlorite- and peroxide-oxidized cassava starches." *Carbohydrate Polymers*. 82 : 446-453.
- [36] Shujun, W. Jinglin, Y. Wenyuan, G. Jiping, P. Hongyan, L. and Jiugao, Y. 2007. "Granule structural changes in native Chinese Yam (*Dioscorea oppositifolia* Thunb var. *Anguo*) starch during acid hydrolysis." *Carbohydrate Polymers*. 69 : 286-292.
- [37] Levine, S. Driffin, H.L. and Sexti, F.R. 1959. "Solution Properties of Dialdehyde Starch." *Journal of Polymer science*. 35 : 31-42.
- [38] Cyras, V.P. Manfredi, L.B. Ton-That, M. and Vázquez, A. 2008. "Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films." *Carbohydrate Polymers*. 73 : 55-63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] Zhang, L. Liu, P. Wang, Y. and Gao, W. 2011. "Study on physico-chemical properties of dialdehyde yam starch with different aldehyde group contents." *Thermochimica Acta*. 512 : 196-201.
- [40] Jiugao, Y. Ning, W. Xiaofei, M. 2005. "The Effects of Citric Acid on the Properties of Thermoplastic Starch Plasticized by Glycerol." *Starch-Stärke*. 57 : 494-504.
- [41] Umoren, S.A. Obot, I.B. Madhankumar, A. and Gaseṃ, Z.M. 2015. "Performance evaluation of pectin as ecofriendly corrosion inhibitor for X60 pipeline steel in acid medium: Experimental and theoretical approaches." *Carbohydrate Polymers*. 124 : 280-291.
- [42] Prachayawarakorn, J. and Pattanasin, W. 2016. "Effect of pectin particles and cotton fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites" *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 38 : 129-136.
- [43] Bangyekan, C. Aht-Ong, D. and Srikulki, K. 2006. "Preparation and properties evaluation of chitosan-coated cassava starch films." *Carbohydrate Polymers*. 63 : 61-71.
- [44] ยศธร ธเนศรุ่งโรจน์. 2557. "ผลของชนิดแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ." วิทยาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [45] Teixeira, E.M. Curvelo, A.A. Corrêa, A.C. Marconcini, J.M. Glenn, G.M. and Mattoso, L.H. 2012. "Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid)." *Industrial Crops and Products*. 37 : 61-68.
- [46] จินตภา แต้มสีคราม. 2558. "สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแล็กติก และกรดมาลิก." วิทยาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [47] Tripathi, S. Mehrotra, G.K. and Dutta, P.K. 2010. "Preparation and physicochemical evaluation of chitosan/poly(vinyl alcohol)/pectin ternary film for food-packaging applications." *Carbohydrate Polymers*. 79 : 711-716
- [48] Matweb material property data. 2018. Overview of materials for Low Density Polyethylene (LDPE), Film Grade. [online] Available : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ff98d958a714b2a8a00990a929d6f14>
- [49] Zhu, J. Wang, Z. Ni, H. Liu, X. Ma, J. and Du, J. 2016. "A Long-Chain Alkylation of Dialdehyde Starch to Improve Its Thermal Stability and Hydrophobicity." *Journal of Chemistry*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] วิภาวรรณ พิตรพิศุทธิกุล. 2558. “การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [51] Ghaffari, A. Navaee, K. Oskoui, M. Bayati, K. and Rafiee-Tehrani, M. 2007. “Preparation and characterization of free mixed-film of pectin/chitosan/ Eudragit ® RS intended for sigmoidal drug delivery.” *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* . 67 : 175–186.
- [52] Galus, S and Lenart, A. 2013. “Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin.” *Journal of Food Engineering*. 115 : 459–465.

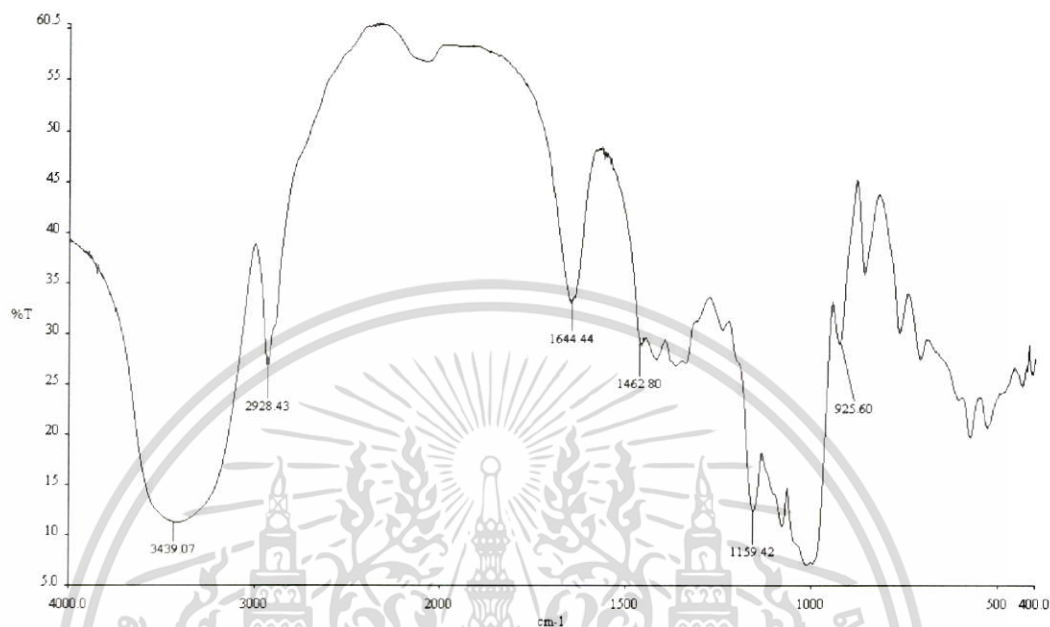




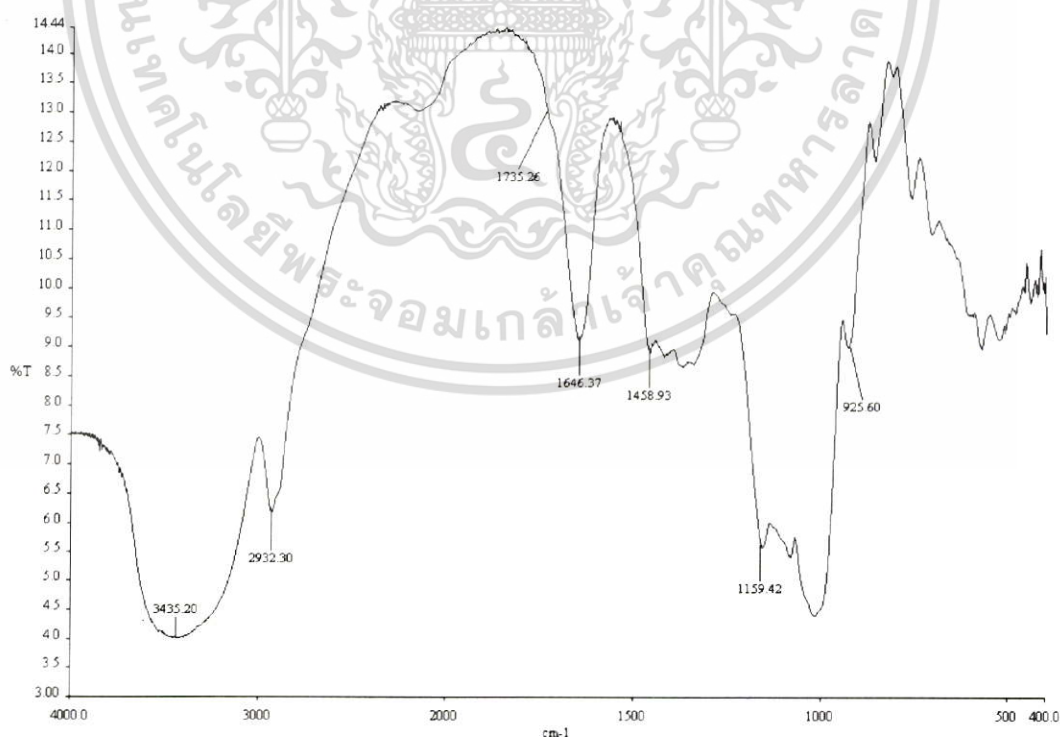
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบหมัพังก์ชัน (FT-IR)

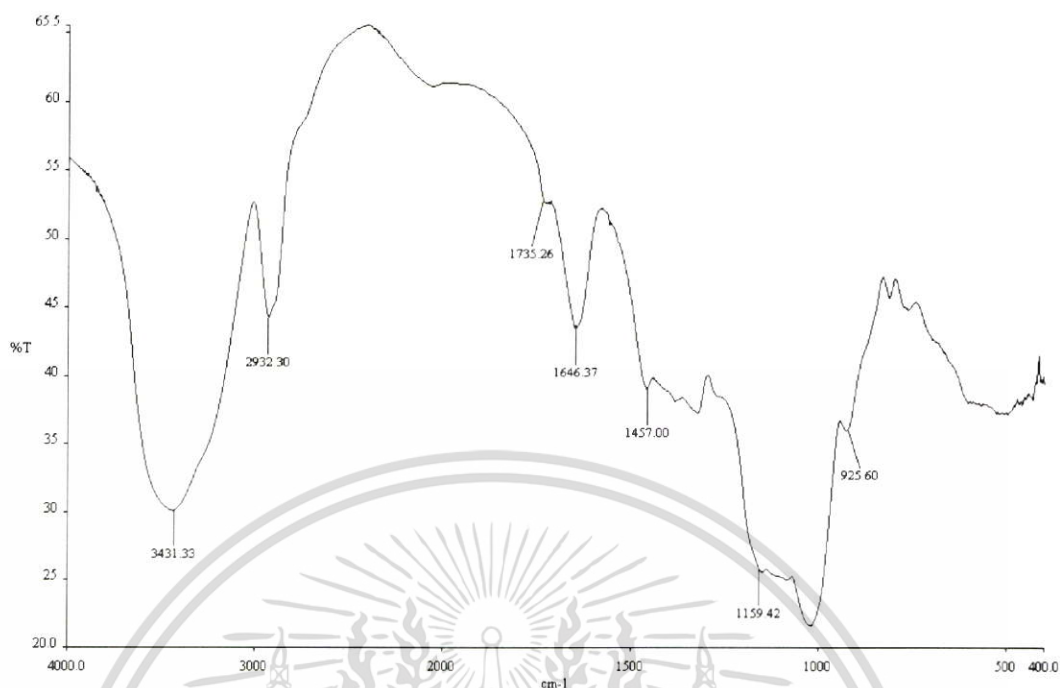


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบงไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเบงต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0

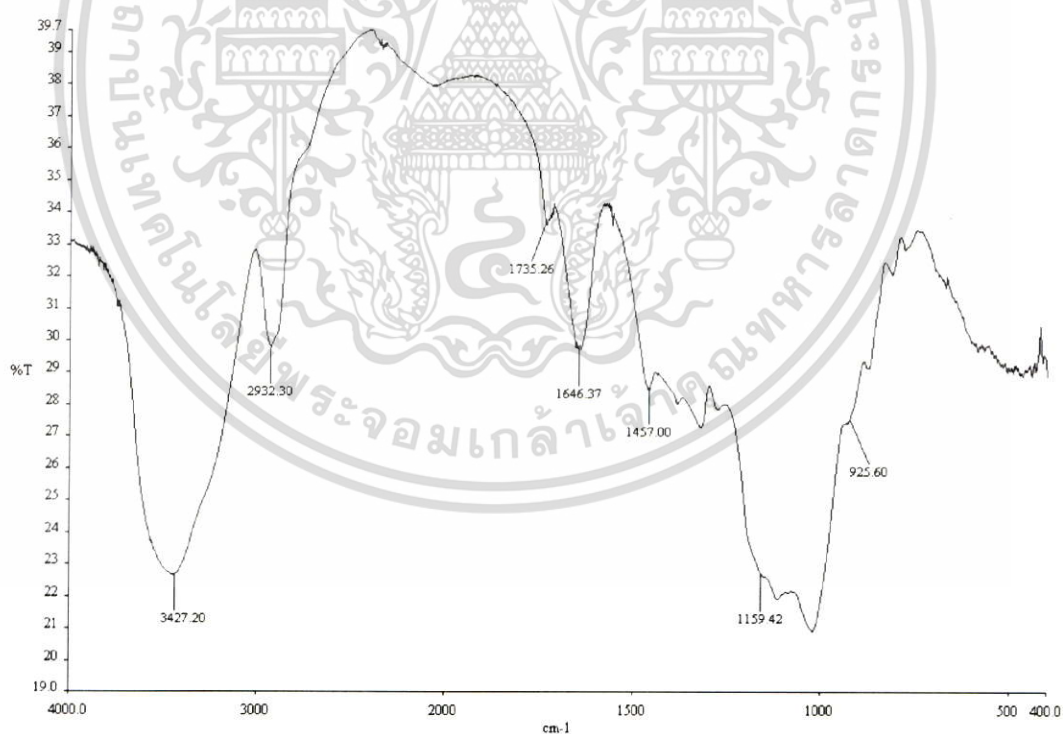


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบงไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเบงต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

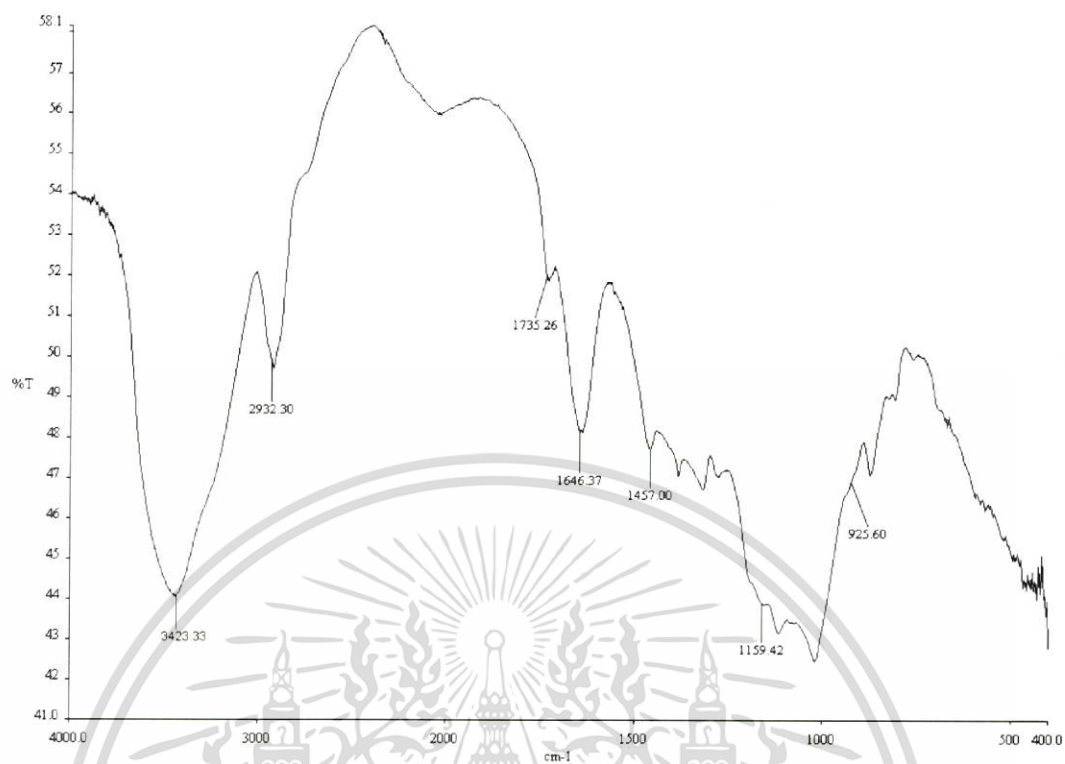


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแอ่งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอ่งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.5

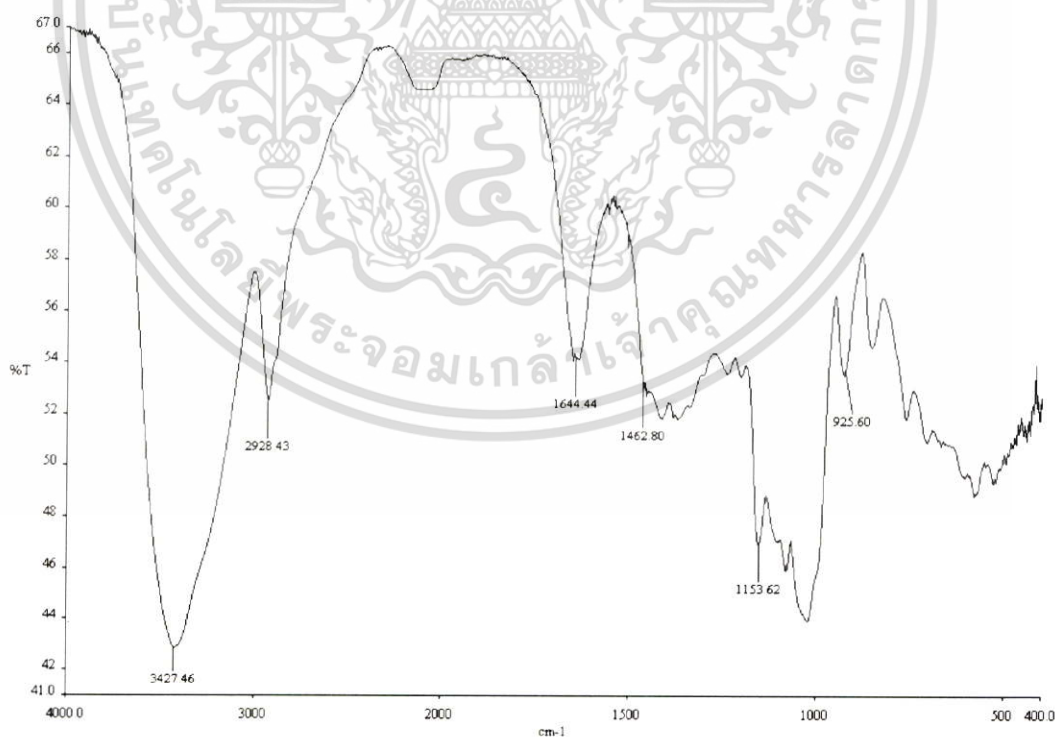


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแอ่งไดอัลดีไฮด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอ่งต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

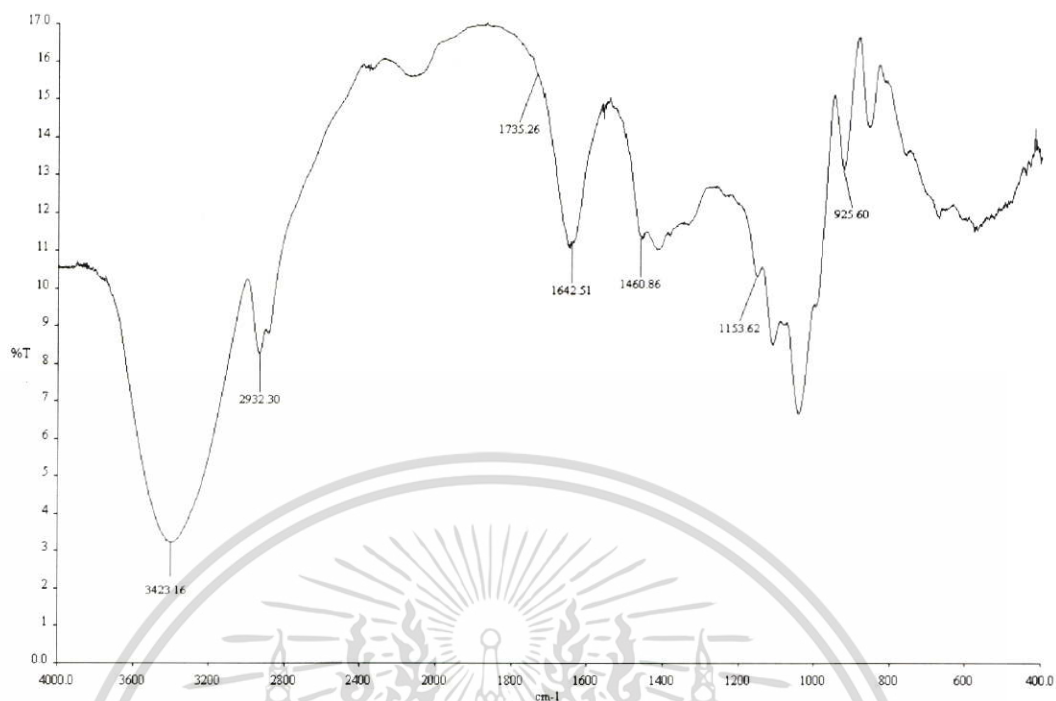


รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแก๊สไดออกไซด์ที่ปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สต่อสารออกซิไดส์ที่อัตราส่วน 1 : 1

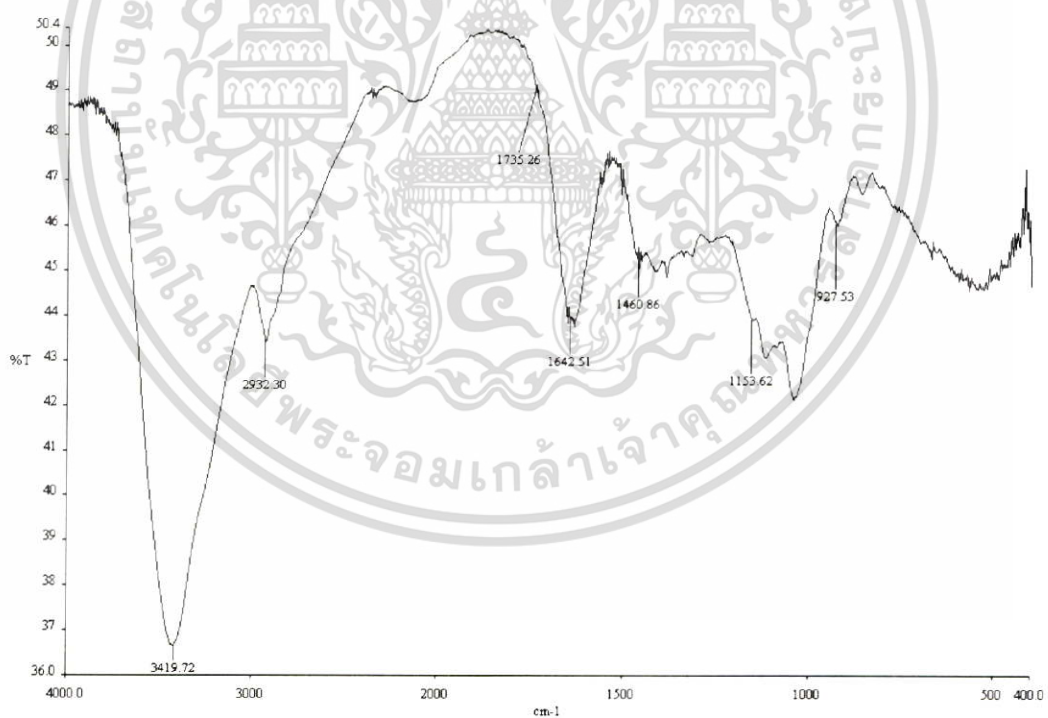


รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

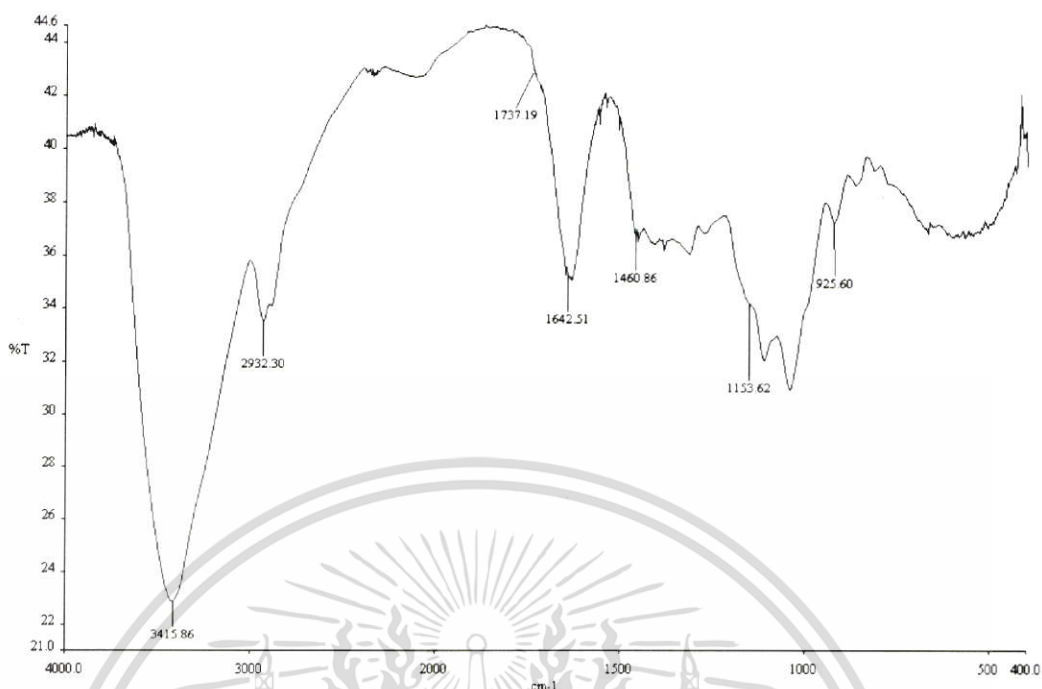


รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.25DASF

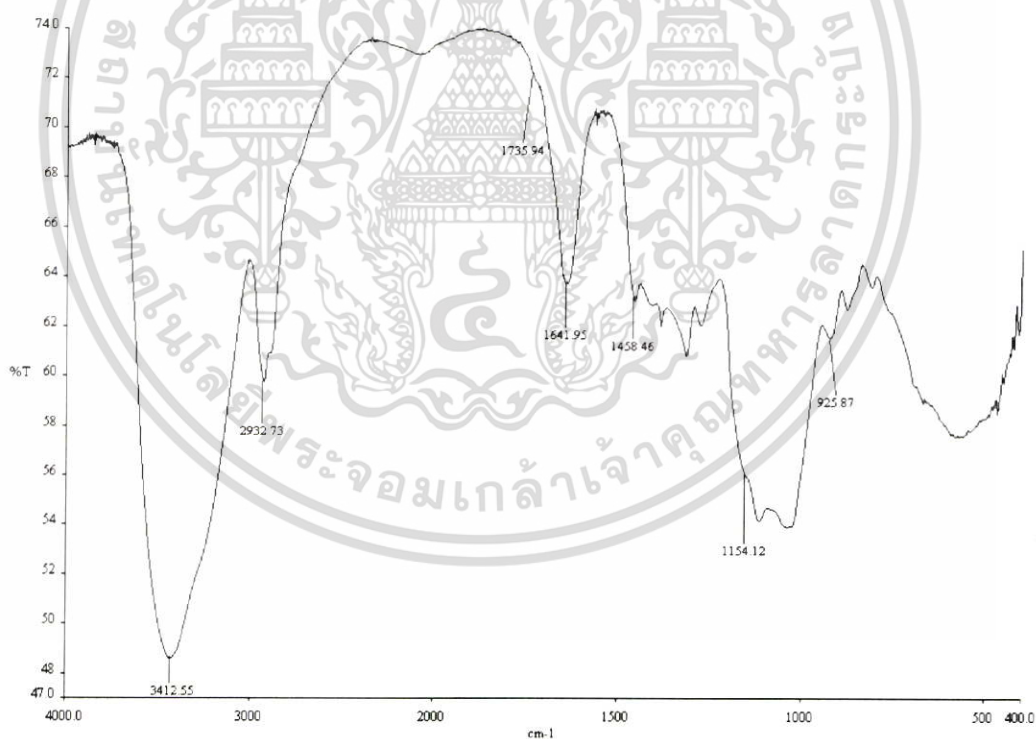


รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.5DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

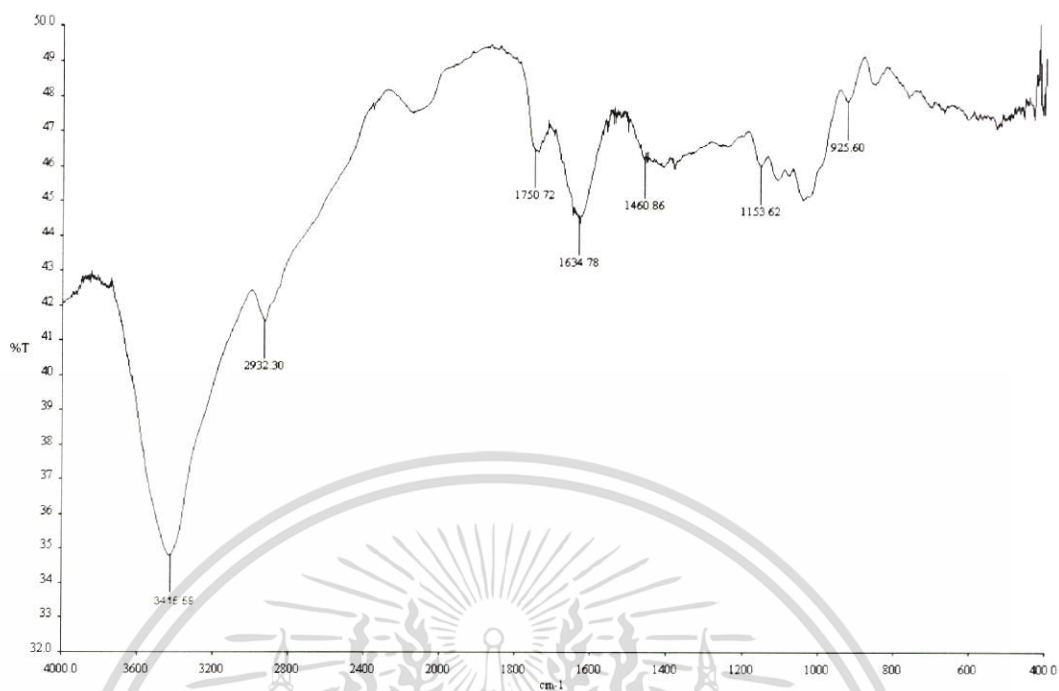


รูปที่ ก.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลทิลไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.75DASF

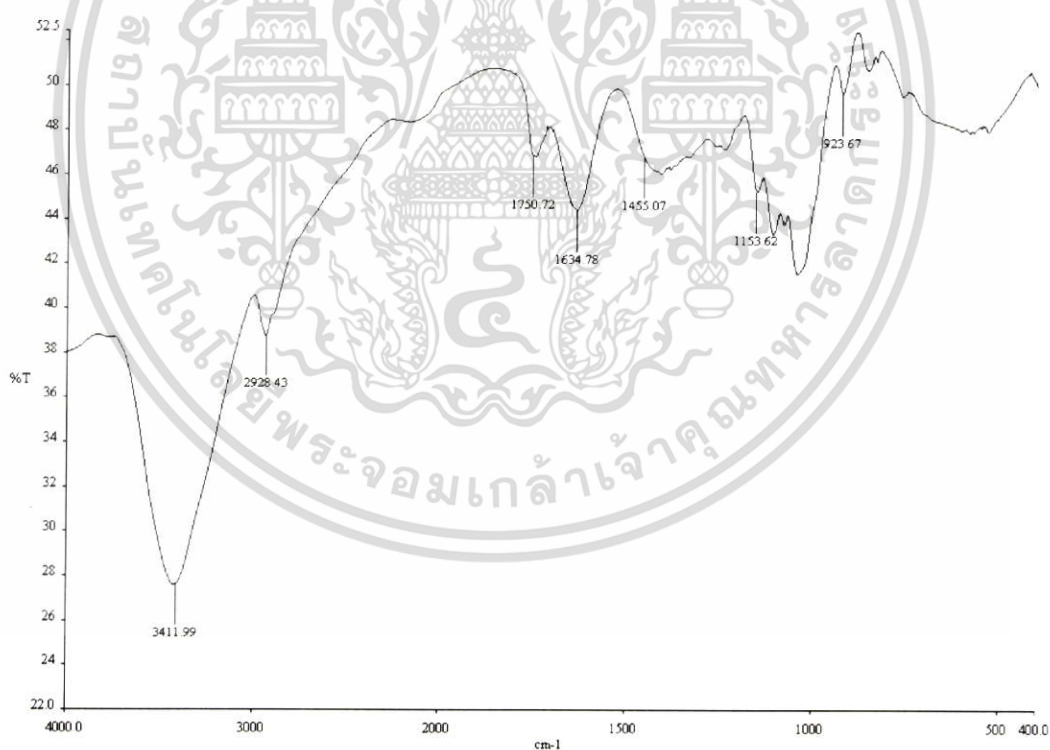


รูปที่ ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลทิลไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 1DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

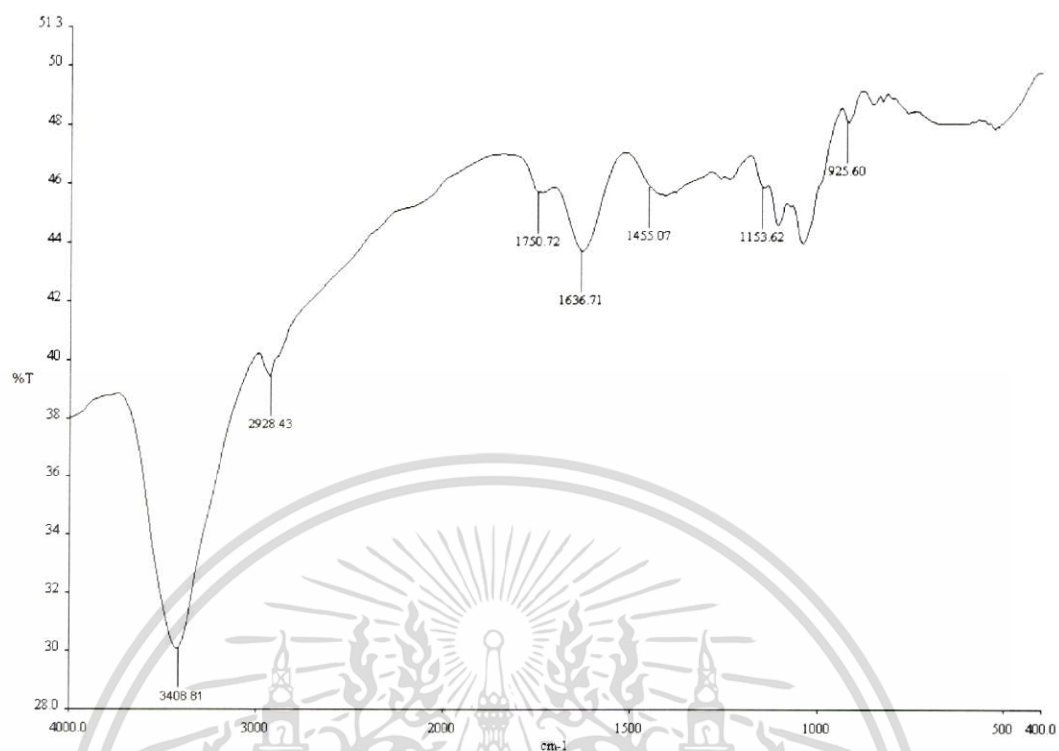


รูปที่ ก.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์พอลิเมอร์ ODAS25PF

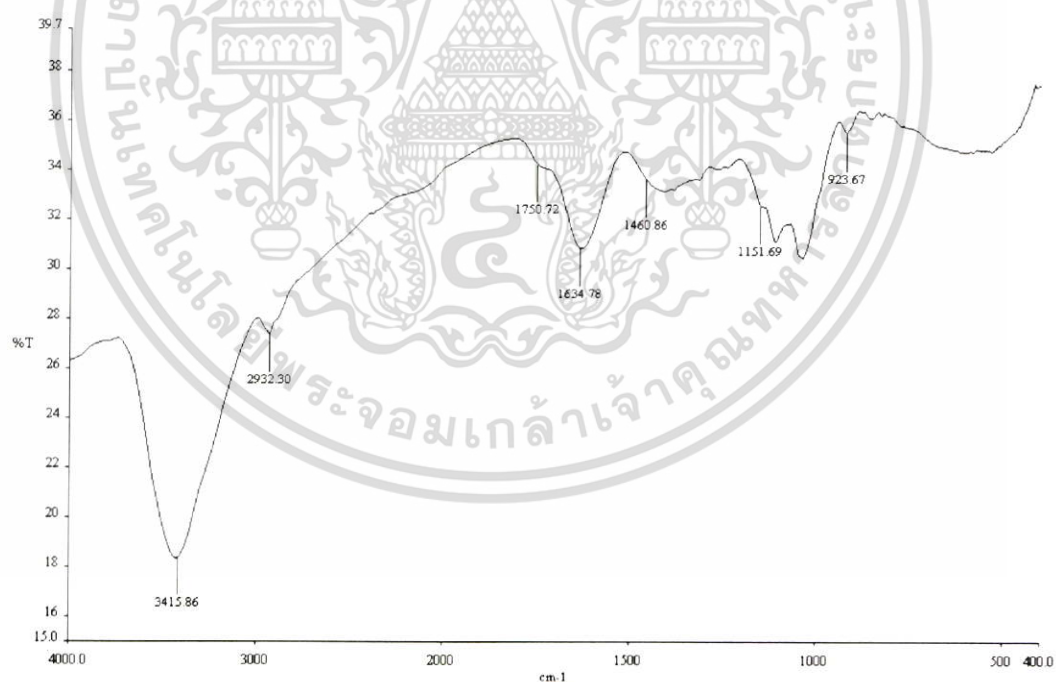


รูปที่ ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์พอลิเมอร์ ODAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

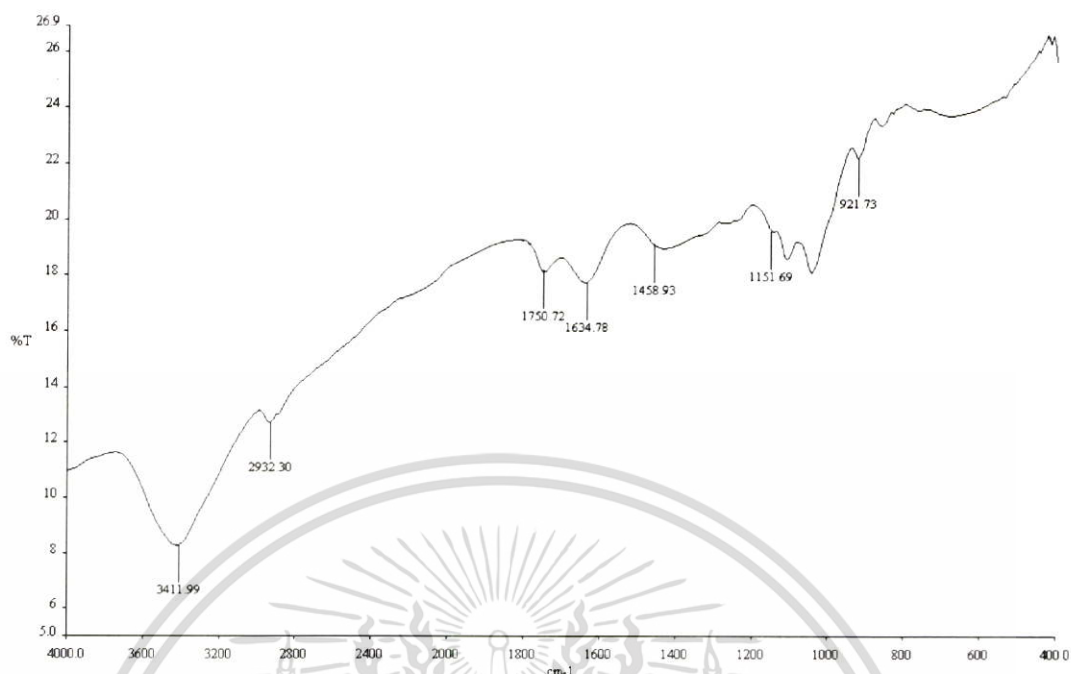


รูปที่ ก.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชฟิล์มสูตร 0DAS75PF

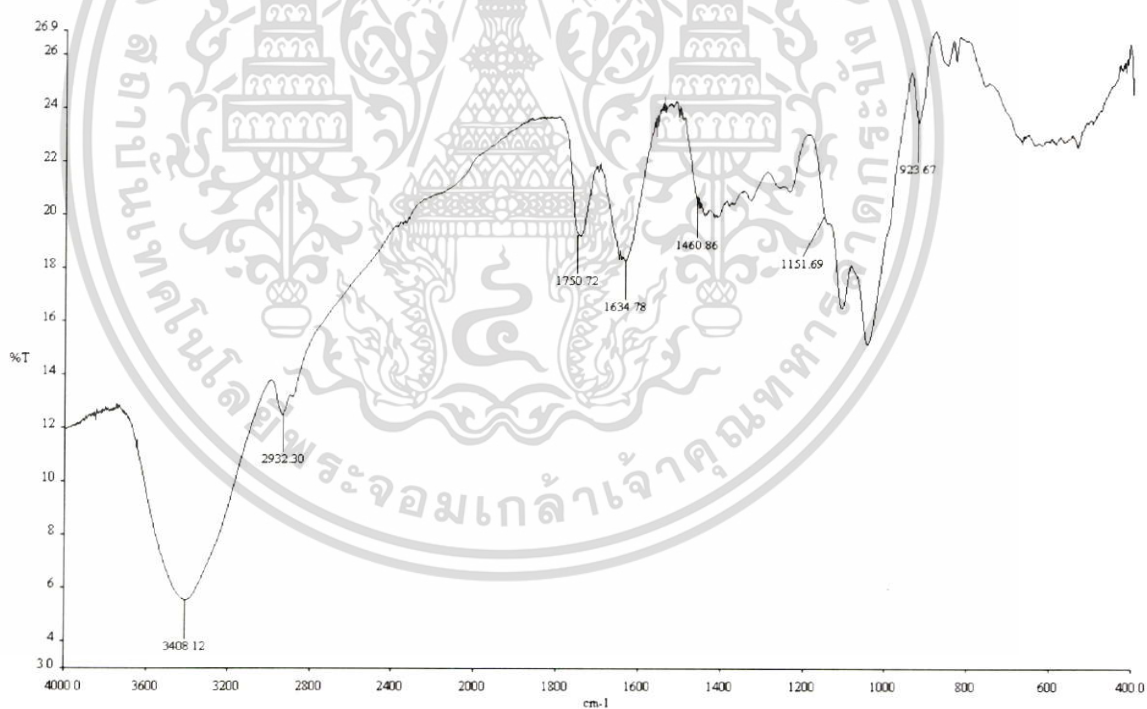


รูปที่ ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชฟิล์มสูตร 0.5DAS25PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

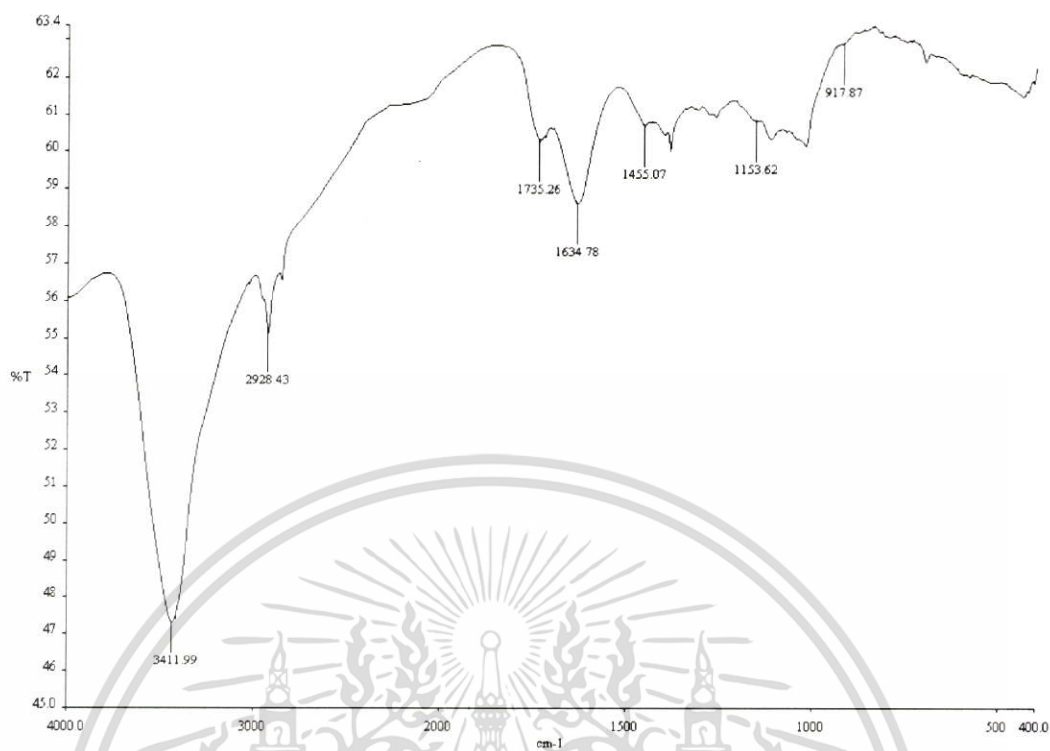


รูปที่ ก.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาซฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF

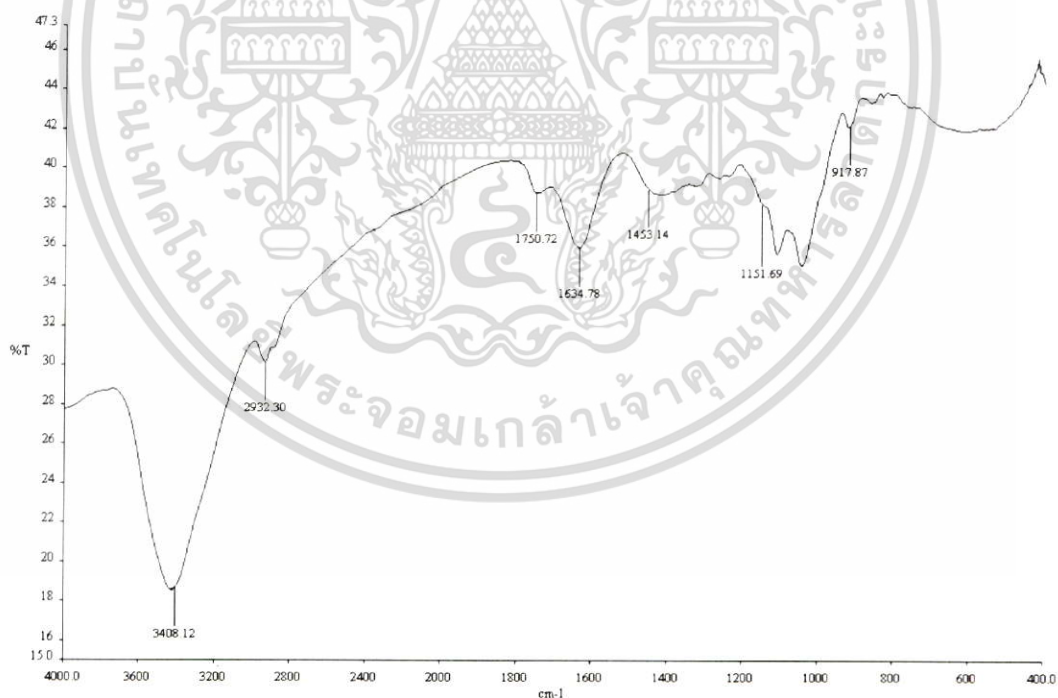


รูปที่ ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาซฟิล์มสูตร 0.5DAS75PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

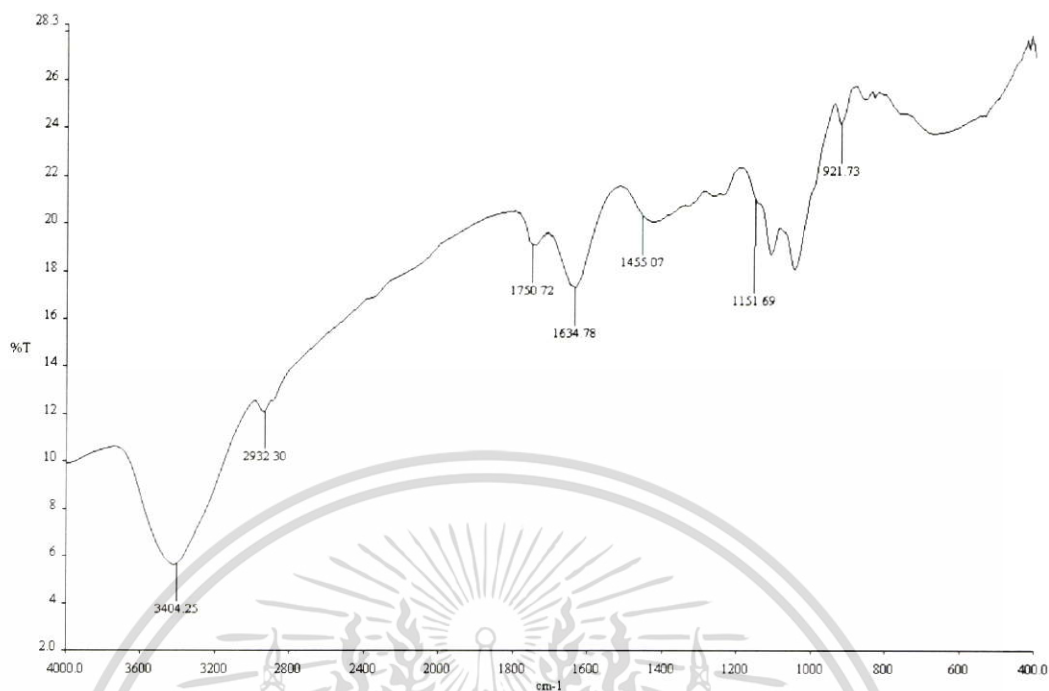


รูปที่ ก.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซฟิล์มสูตร 1DAS25PF

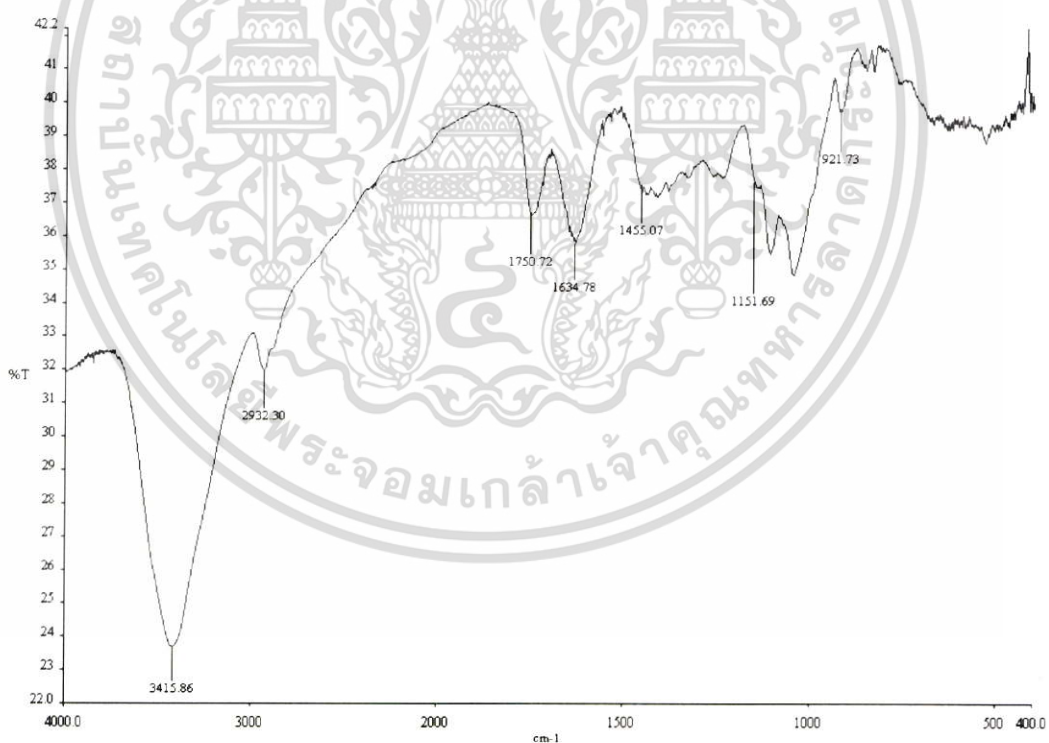


รูปที่ ก.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซฟิล์มสูตร 1DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ฟิล์มสูตร 1DAS75PF



รูปที่ ก.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ฟิล์มสูตร 100PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

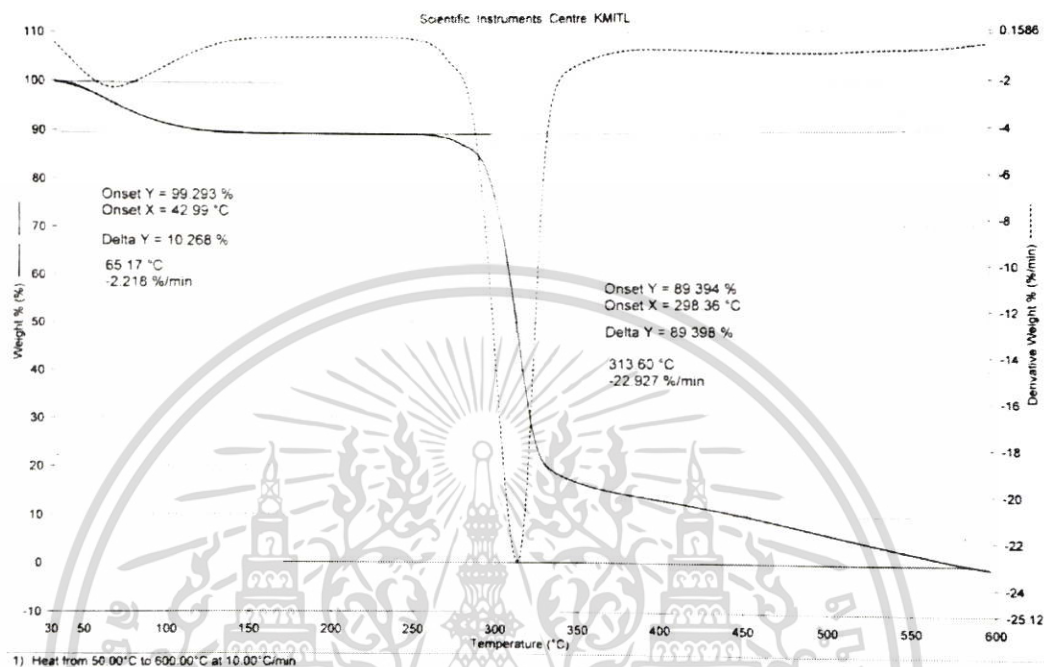
การศึกษาความหนืด

ตารางที่ ข.1 ค่าความหนืด (Centipoise) ของสารละลายแป้งตัดแปรโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส

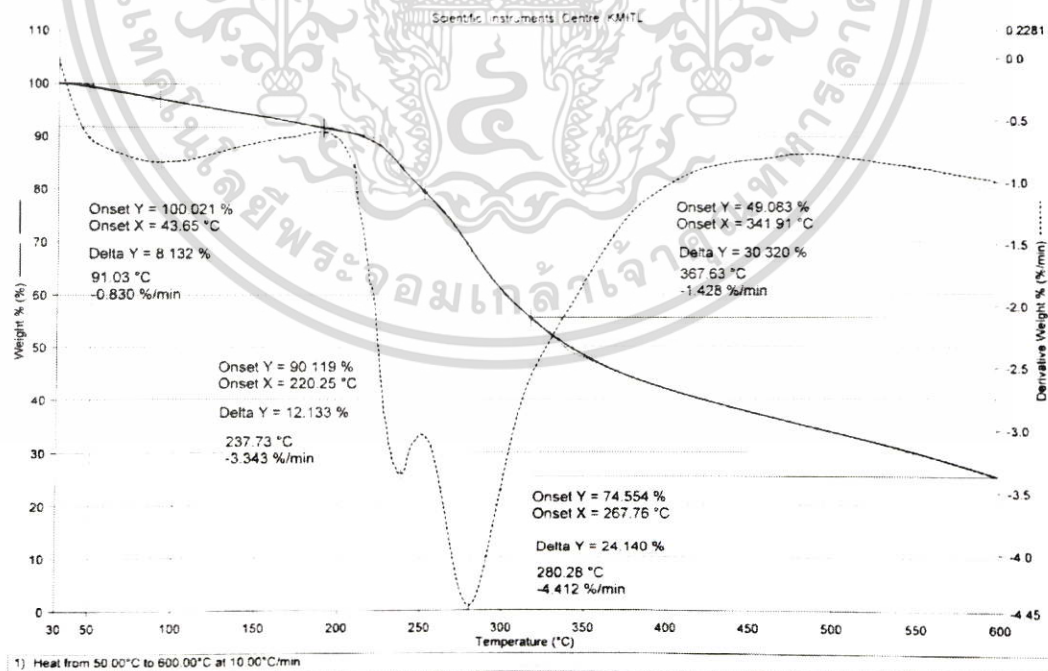
สูตร	ค่าความหนืด (Centipoise) ที่อุณหภูมิ (°C)						
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
0DAS	40	40	860	1980	1140	380	300
0.25DAS	40	40	40	100	140	264	80
0.5DAS	40	40	60	80	120	100	60
0.75DAS	60	60	60	60	100	60	60
1DAS	40	40	60	60	80	120	80
100P	873	986	1000	693	693	306	280

ภาคผนวก ค

การศึกษาสมบัติทางความร้อน

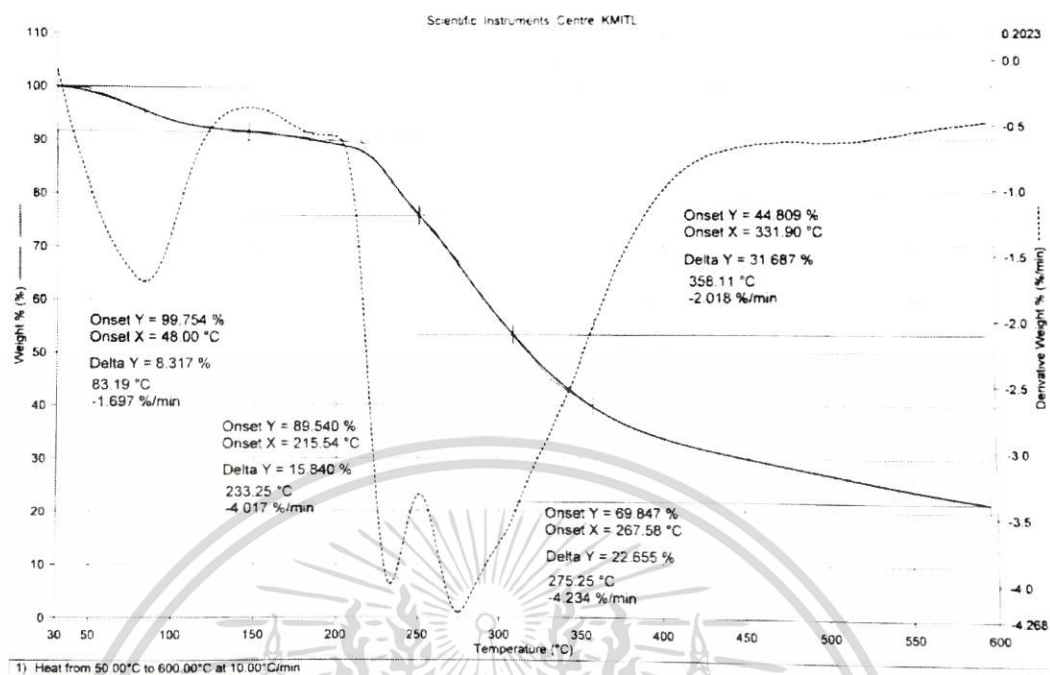


รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของแป้งตัดแปรไดอัลทีไฮด์สูตร ODAS

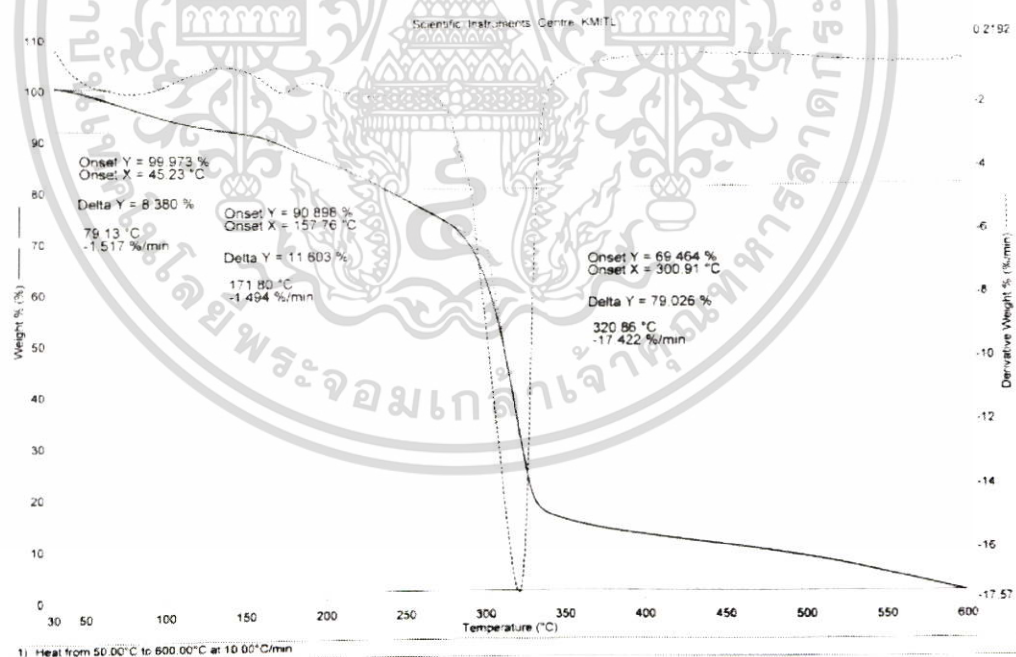


รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรมของแป้งตัดแปรไดอัลทีไฮด์สูตร 0.5DAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

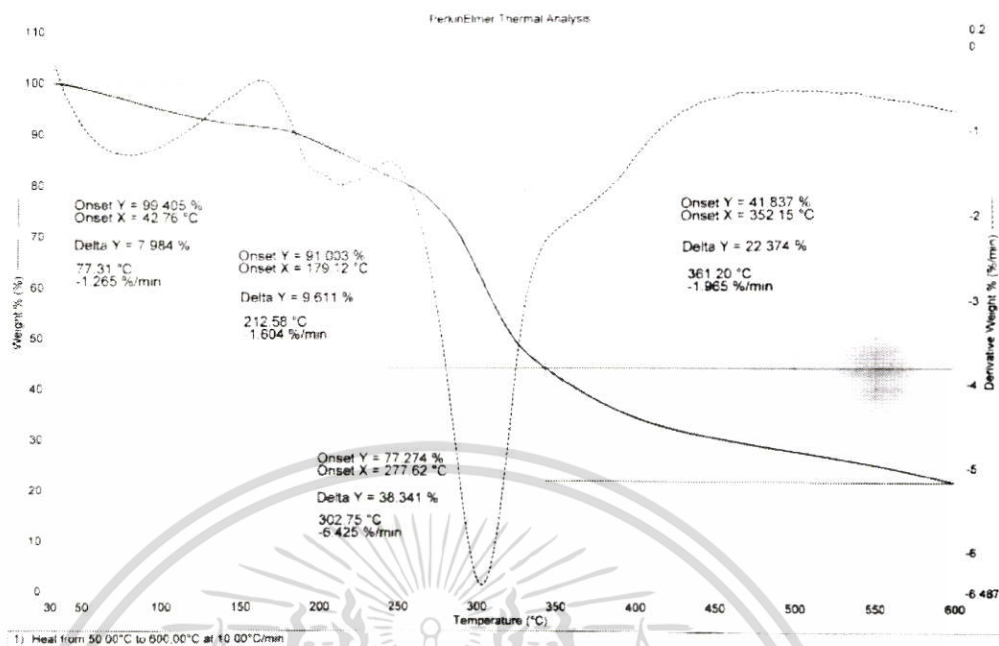


รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรไดอัลดีไฮด์สูตร 1DAS

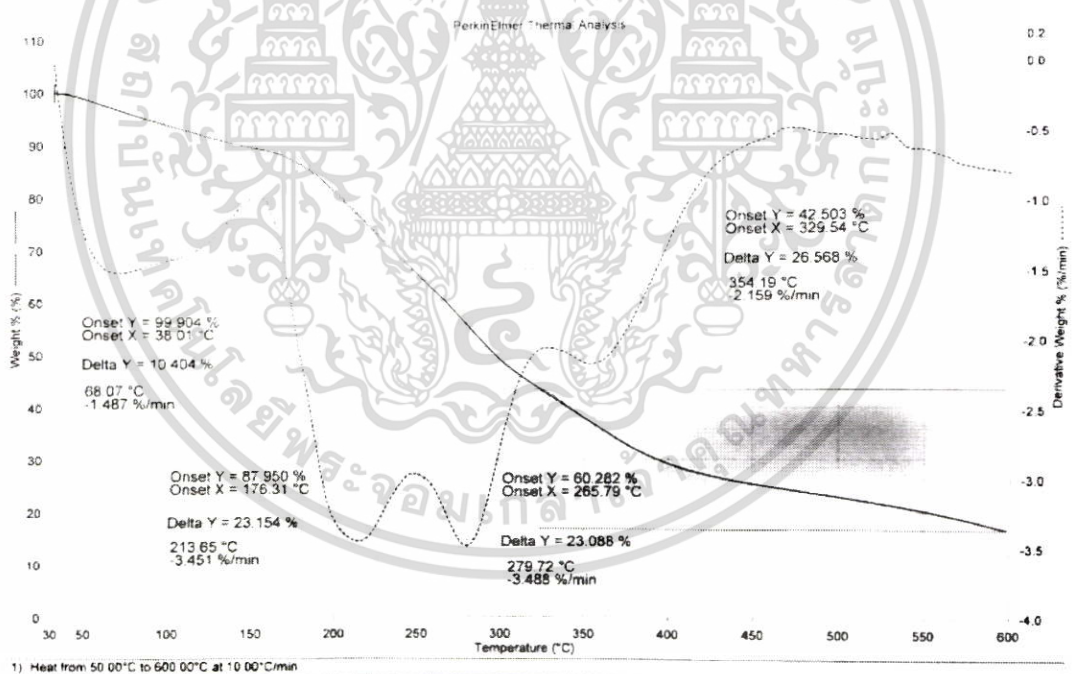


รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

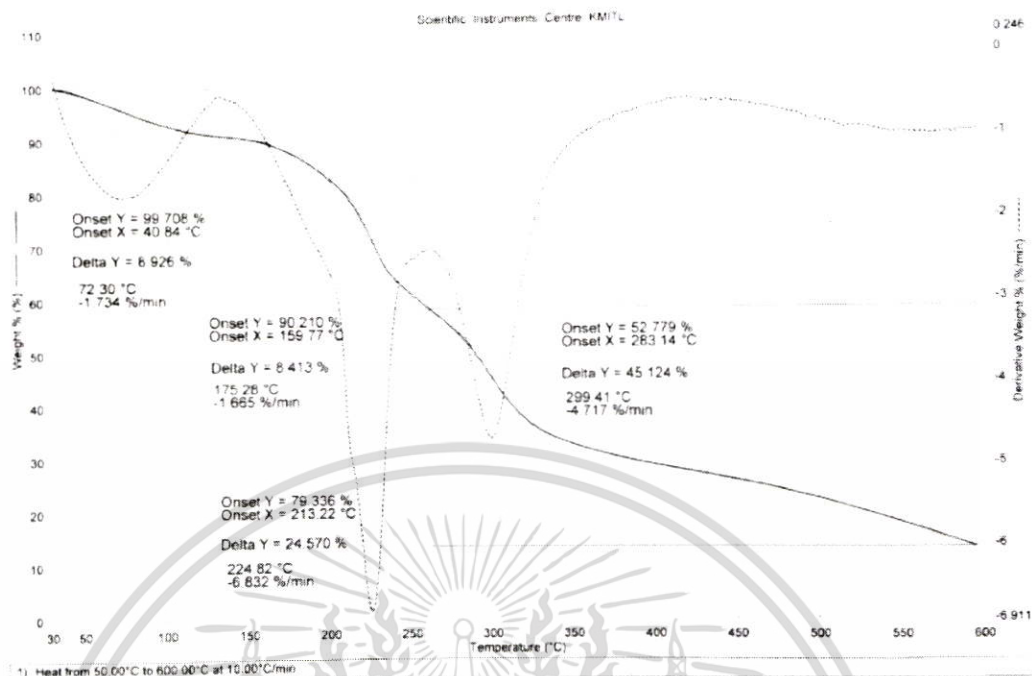


รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลทีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0.5DASF

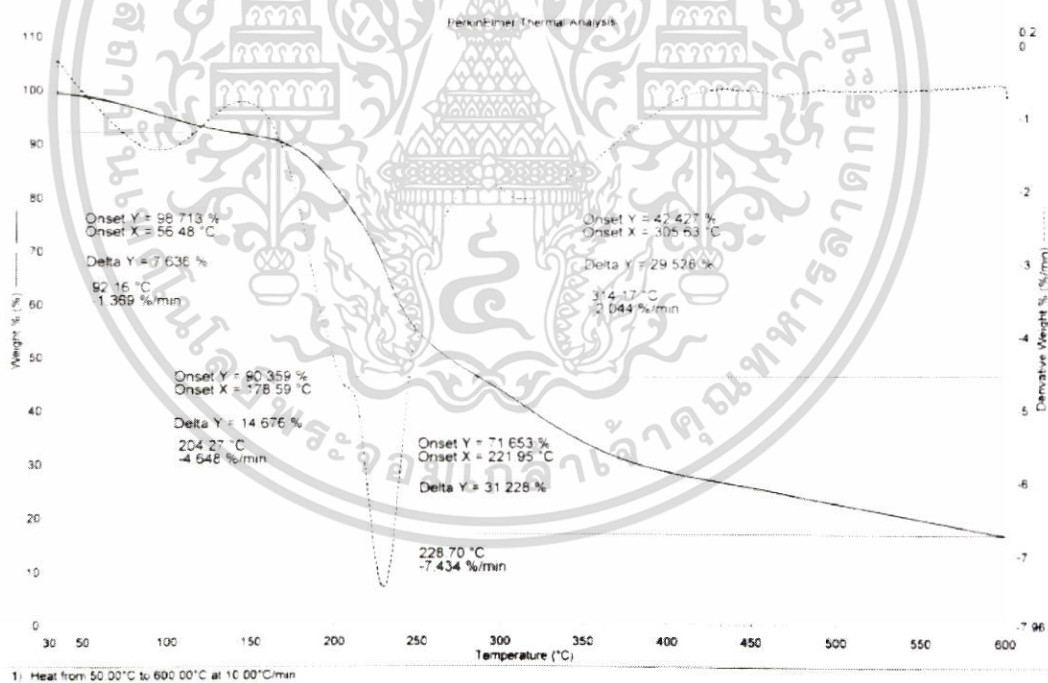


รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลทีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 1DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

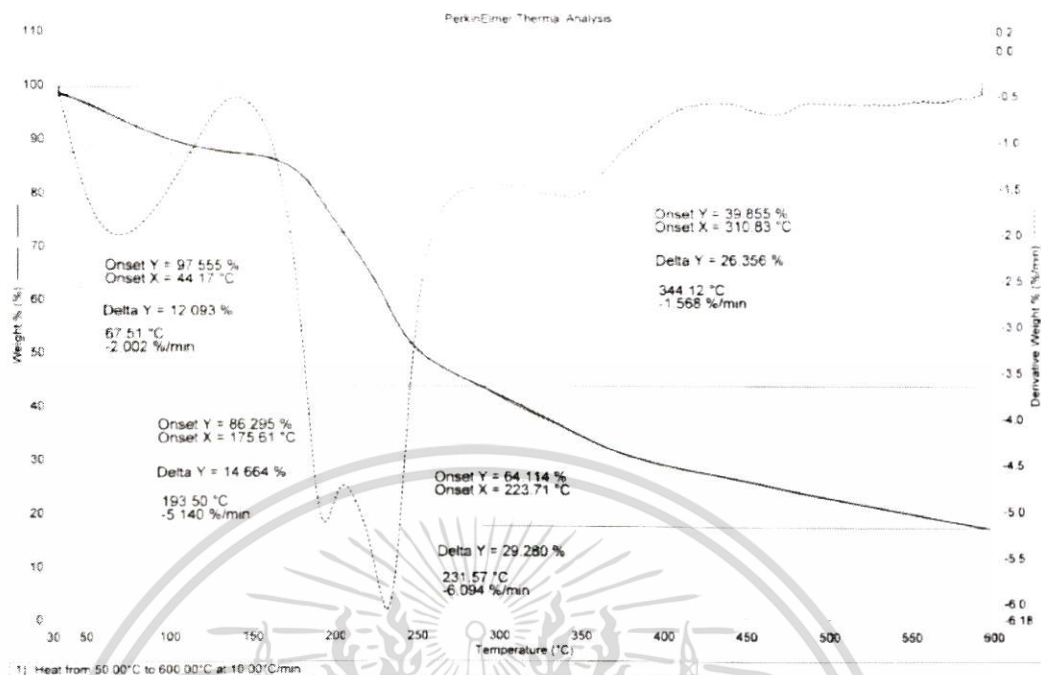


รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร ODAS50PF



รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

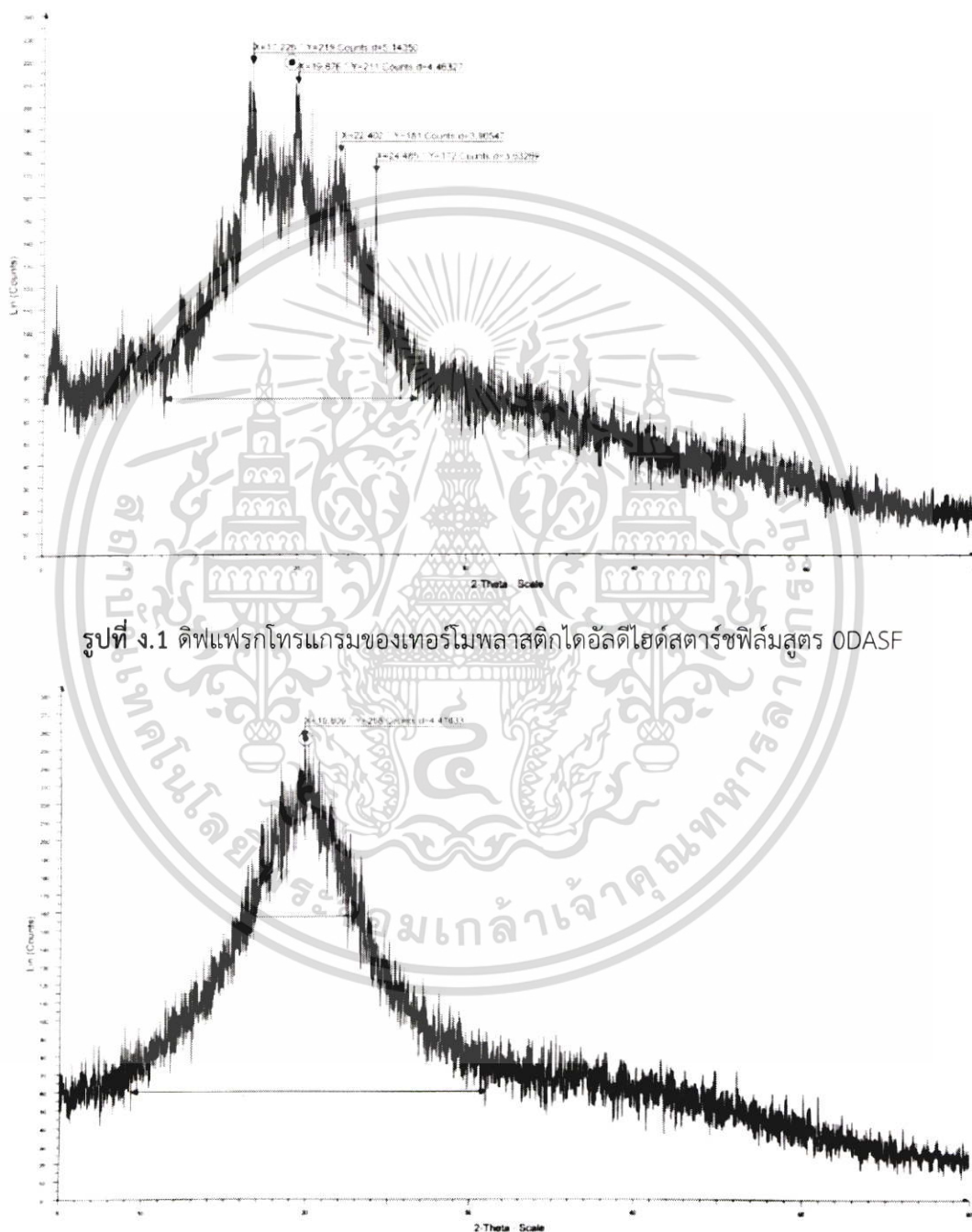


รูปที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 1DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

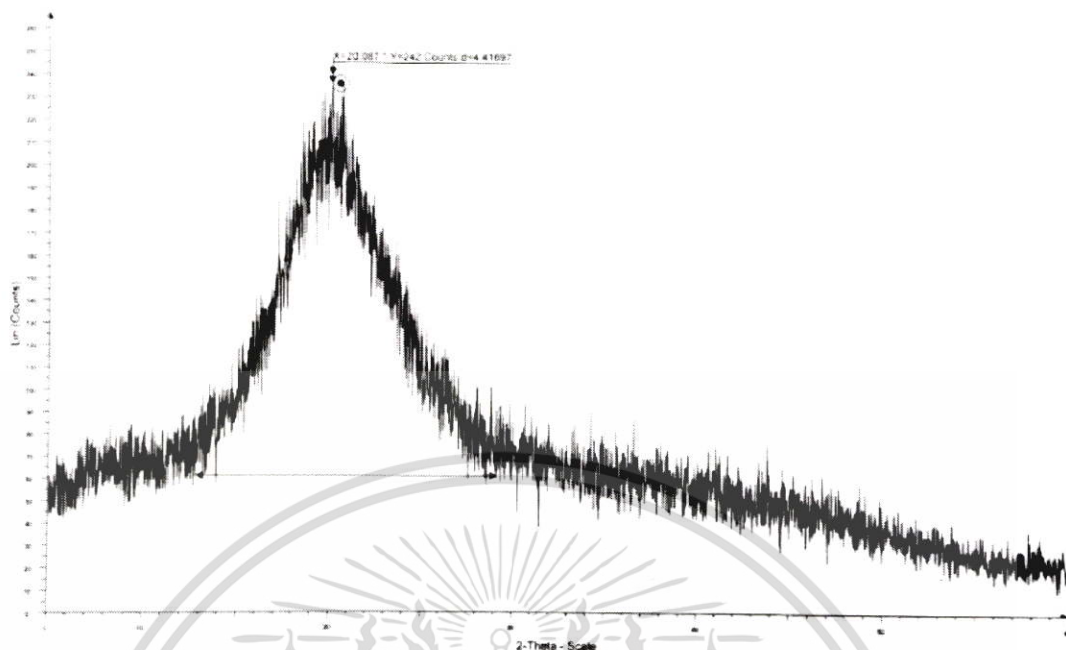
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)



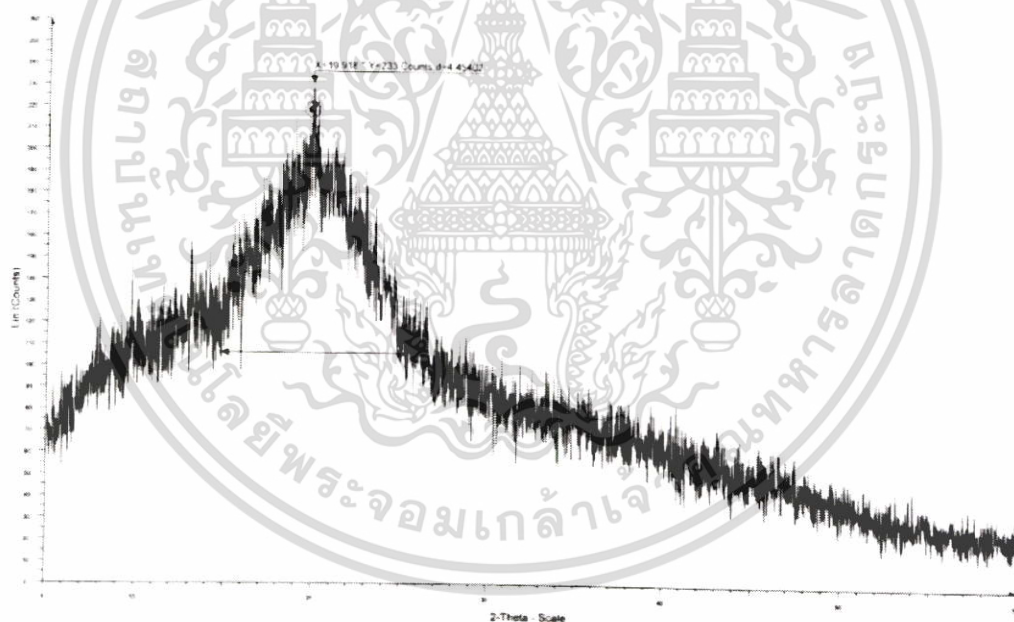
รูปที่ ง.1 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0DASF

รูปที่ ง.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0.5DASF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

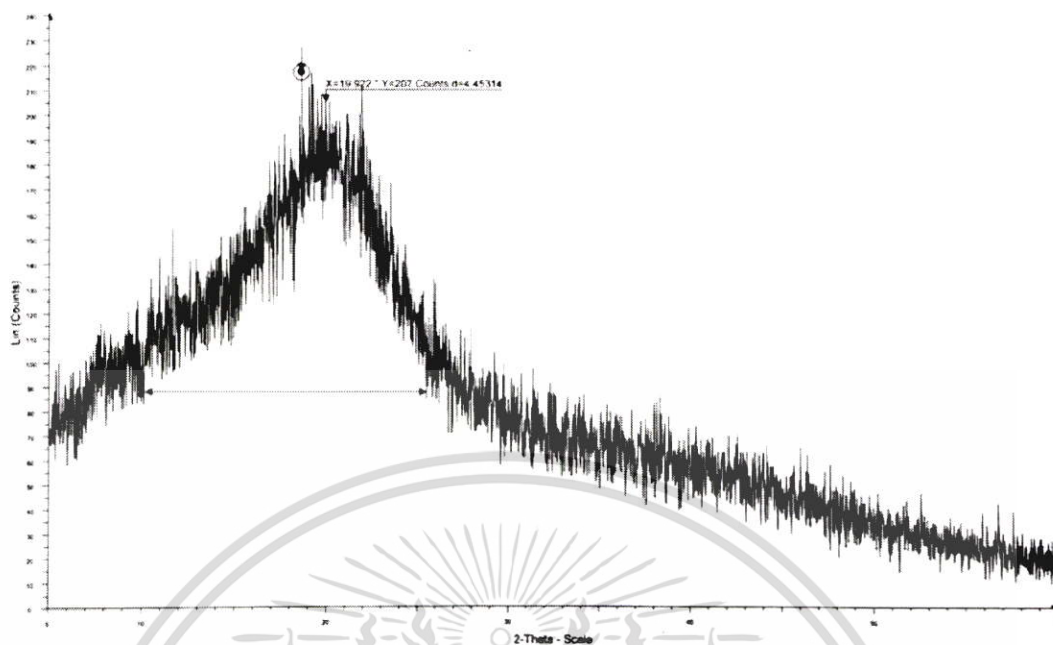


รูปที่ ง.3 ดิฟแฟร็กโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 1DASF

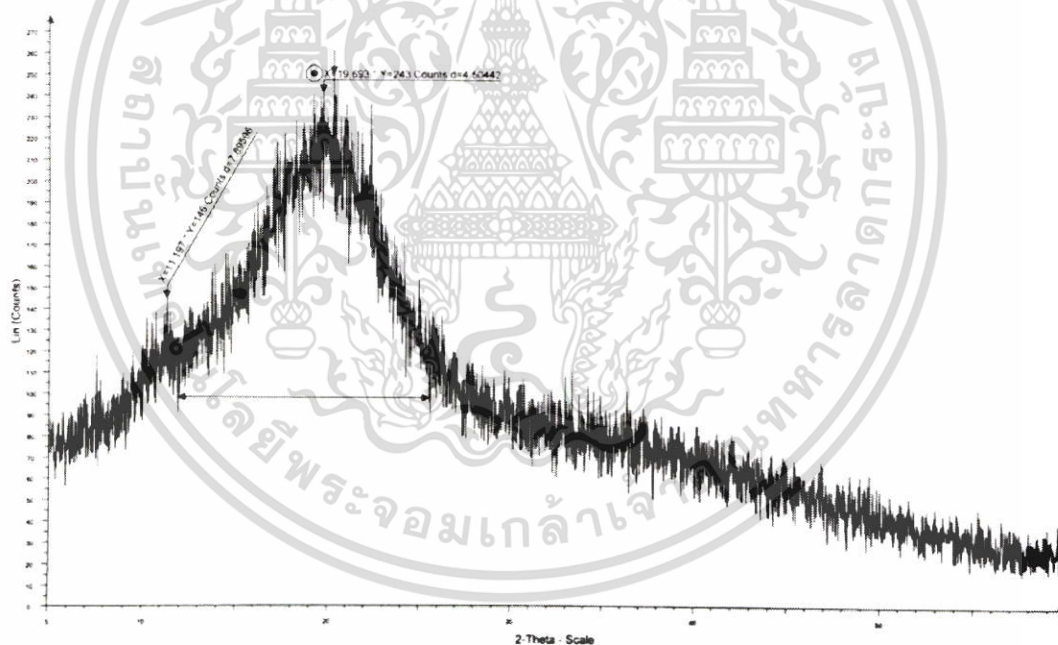


รูปที่ ง.4 ดิฟแฟร็กโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตร 0DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 0.5DAS50PF



รูปที่ ง.6 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตร 1DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ จ.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัสตีไฮด์สูตร 0DASF, 0.25DASF, 0.5DASF, 0.75DASF, 1DASF และ 100PF

สูตร	สมบัติเชิงกล					
	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เปลี่ยนไป (%)*	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%)	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เปลี่ยนไป (%)*	มอดุลัส (MPa)	มอดุลัสที่เปลี่ยนไป (%)*
0DASF	3.07±0.69	0	184.81±5.038	0	88.1±10.44	0
0.25DASF	3.32±0.70	8.14	14.8±0.73	-91.99	177±6.68	100.9
0.5DASF	18.22±1.00	493.48	9.15±1.37	-95.04	351.6±15.1	299.09
0.75DASF	19.04±1.13	520.19	7.51±0.65	-95.93	378±8.03	329.05
1DASF	21.59±0.99	603.25	5.15±0.66	-97.21	382±4.94	333.59
100PF	6.56±1.020	113.68	24.76±1.84	-86.6	207.80±7.46	135.86

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + แสดงถึงสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น และ เครื่องหมาย - แสดงถึงสมบัติเชิงกลที่ลดลง

ตารางที่ จ.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลไธด์สูตร 0DASF, 0.5DASF และ 1DASF ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 ตามลำดับ

สูตร	สมบัติเชิงกล					
	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เปลี่ยนไป (%) *	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%)	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เปลี่ยนไป (%)*	มอดุลัส (MPa)	มอดุลัสที่เปลี่ยนไป (%)*
0DASF	3.07±0.69	0	184.81±5.038	0	88.1±10.44	0
0DAS25PF	4.57±0.33	+48.85	45.83±3.78	-75.2	101.75±11.70	+15.49
0DAS50PF	5.19±0.27	+69.05	26.30± 2.10	-85.76	160.4±5.31	+82.06
0DAS75PF	6.23±0.38	+102.93	21.51 ±5.53	-88.36	172±3.36	+95.23
0.5DASF	18.22±1.00	0	9.15±1.37	0	351.6±15.1	0
0.5DAS25PF	12.90 ±1.64	-29.19	14.92±1.81	+63.06	321.4±20.32	-8.43
0.5DAS50PF	7.07±1.05	-61.19	28.93±1.89	+216.17	290±12.42	-17.37
0.5DAS75PF	6.53±0.21	-64.16	33.82±1.42	+269.61	278±8.03	-20.79
1DASF	21.59±0.99	0	5.15±0.66	0	382±4.94	0
1DAS25PF	16.04±1.30	-25.7	13.35±1.79	+159.22	368.2±8.81	-3.61
1DAS50PF	12.57±0.86	-41.77	17.49±1.98	+239.61	320.4±14.13	-16.12
1DAS75PF	7.63±0.63	-64.65	24.40±1.28	+373.78	289.2±8.78	-24.29

*หมายเหตุ เครื่องหมาย + แสดงถึงสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น และ เครื่องหมาย - แสดงถึงสมบัติเชิงกลที่ลดลง

ภาคผนวก ฉ

การศึกษาสมบัติการบวมตัว (Swelling power)

ตารางที่ ฉ.1 ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์ไฮดรอสตาร์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

ชั่วโมง	ร้อยละการบวมตัว							
	0DASF	0DAS25PF	0DAS50PF	0DAS75PF	0.25DASF	0.5DASF	0.5DAS25PF	0.5DAS50PF
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	63.86± 2.14	132.07±2.33	184.65±1.10	197.14±2.55	37.24±1.91	25.68±1.62	30.55±1.56	37.13±2.38
2	75.08± 2.82	157.35±2.10	191.72±1.83	217.40±2.76	41.97±2.68	34.43±1.25	46.71±2.09	47.25±2.09
3	84.89± 6.15	164.82±1.97	205.42±1.53	226.98±2.03	57.31±0.11	47.73±2.07	47.70±1.95	53.24±2.95
4	84.74± 1.98	167.00±0.18	221.29±1.07	231.58±1.63	64.80±1.22	52.18±0.01	54.66±0.95	85.14±2.54
5	87.63± 0.41	171.51±1.66	225.36±0.84	236.52±1.54	64.43±1.12	54.21±0.64	67.19±2.78	117.57±2.99
6	97.01± 2.37	176.17±0.89	229.42±1.21	241.44±1.41	71.92±2.41	61.95±2.57	82.12±2.52	156.54±0.80
72	127.27±2.42	179.23±0.92	234.49±1.50	249.48±1.61	79.12±0.82	72.09±2.33	102.09±2.32	162.66±3.28

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ) ร้อยละการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ซฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

ชั่วโมง	ร้อยละการบวมตัว					
	0.5DAS75PF	0.75DASF	1DASF	1DAS25PF	1DAS50PF	1DAS75PF
0	0	0	0	0	0	0
1	47.15±3.22	25.04±1.17	22.44±0.75	25.53±1.37	40.44±1.56	44.39± 1.20
2	103.07±3.19	31.15±0.99	28.72±1.83	26.12±1.11	47.71±3.07	82.71± 3.83
3	183.26±2.93	44.67±0.97	37.32±3.31	50.39±1.33	51.37±1.48	131.84± 3.80
4	191.91±2.01	50.58±0.50	42.61±1.30	55.09±1.09	65.23±1.29	147.71±3.20
5	206.68±1.74	53.91±1.34	46.91±0.72	63.74±0.60	75.61±1.67	153.52±2.56
6	214.50±3.06	56.24±2.44	49.89±1.38	64.42±0.14	80.66±0.49	185.84±0.71
72	238.76±4.53	62.70±3.22	56.72±0.99	71.59±1.80	83.39±1.46	186.55±1.55

ภาคผนวก ข

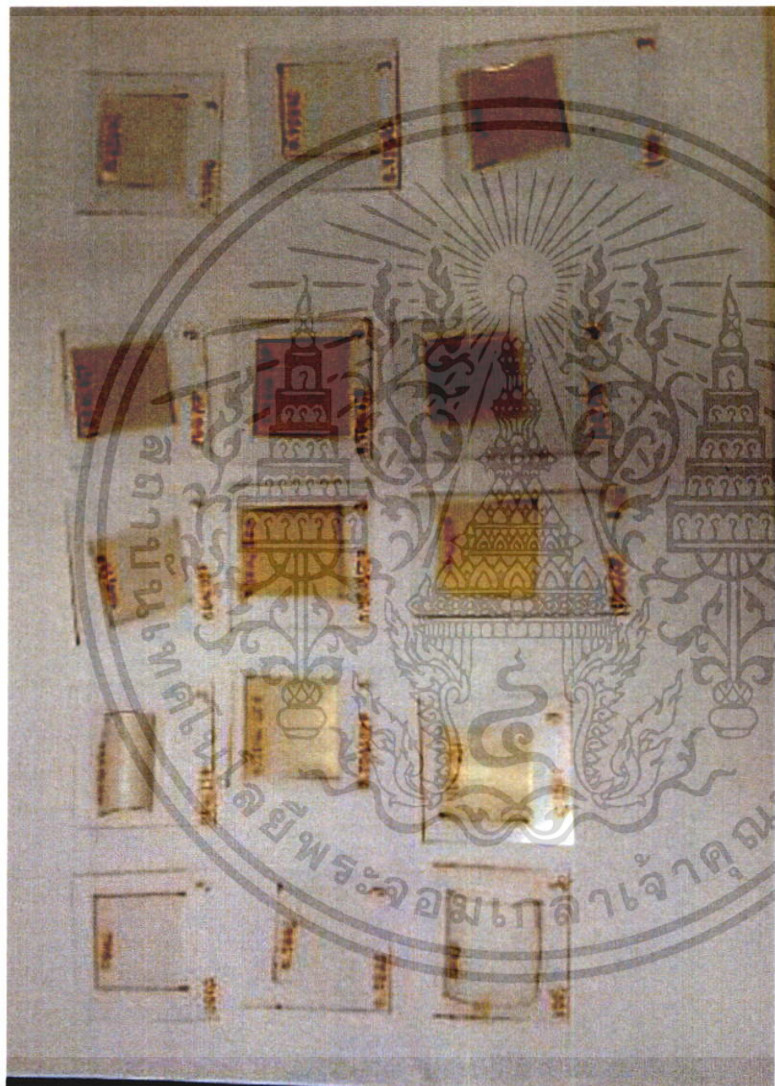
การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

ตารางที่ ข.1 ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกได้อัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน

วันที่	ร้อยละการดูดความชื้น							
	0DASF	0DAS25PF	0DAS50PF	0DAS75PF	0.25DASF	0.5DASF	0.5DAS25PF	0.5DAS50PF
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	39.60±0.05	41.87±0.15	42.33±0.32	45.21±0.77	37.24±2.96	34.98±1.28	33.65±2.36	35.58±1.47
2	59.13±1.63	59.85±0.25	68.718±0.46	86.26±1.33	48.25±3.50	46.55±1.24	55.89±0.46	65.30±0.61
3	82.36±2.55	83.89±0.65	80.16±1.11	91.55±1.74	81.06±1.93	58.03±4.03	72.86±1.01	74.48±1.46
4	88.40±3.28	88.20±0.31	88.73±0.49	99.11±1.25	84.85±0.68	79.250.45	82.96±0.41	85.67±0.65
5	97.25±2.99	97.05±0.56	98.31±0.47	103.01±0.79	95.37±1.52	78.55±1.72	84.88±0.64	85.78±0.65
6	102.88±3.01	102.92±0.22	105.75±1.40	109.23±1.13	100.57±1.16	97.78±0.62	99.72±1.13	100.95±0.70
7	111.47±1.38	111.47±1.38	125.28±0.58	133.51±0.75	105.27±2.42	101.50±1.43	103.25±0.38	120.82±0.36
8	114.17±1.65	114.17±1.65	137.76±1.31	145.26±0.08	108.69±1.63	106.91±2.20	109.04±0.39	121.10±0.92
9	132.41±4.45	133.20±0.47	141.56±1.68	146.23±0.12	124.49±2.61	111.49±1.32	130.04±0.70	130.95±0.70
10	141.30±1.36	141.09±0.77	150.36±0.89	149.73±0.24	137.63±2.33	131.69±1.17	130.06±0.90	136.83±1.64
11	147.00±1.60	146.91±0.18	152.05±0.60	152.08±0.51	144.50±1.07	139.46±1.12	139.88±0.79	143.26±0.39

ตารางที่ ข.1(ต่อ) ร้อยละการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกไดอัลดีไฮด์สตาร์ชฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน

วันที่	ร้อยละการดูดความชื้น						
	0.5DAS75PF	0.75DASF	1DASF	1DAS25PF	1DAS50PF	1DAS75PF	100PF
0	0	0	0	0	0	0	0
1	37.46±1.35	27.48±1.20	26.73±1.68	29.91±0.80	32.31±0.90	35.37±0.55	41.42±1.38
2	76.34±1.35	41.48±1.14	39.19±2.49	51.00±1.08	58.66±1.85	69.94±0.72	65.48±1.33
3	86.07±0.63	55.35±6.53	51.96±1.83	64.64±0.50	70.25±0.45	83.37±0.68	84.42±1.37
4	87.22±2.41	65.78±1.27	63.96±1.04	73.62±1.06	74.32±0.91	84.99±0.95	91.68±1.06
5	90.75±0.43	71.82±1.81	65.99±1.07	77.91±0.74	81.60±1.62	89.89±0.78	97.72±0.54
6	103.20±0.31	77.26±2.09	75.32±2.00	84.11±0.94	86.69±0.52	99.72±0.87	106.45±8.52
7	122.60±2.93	93.93±1.50	84.78±1.13	90.85±1.13	101.25±0.12	110.05±0.25	137.44±2.84
8	130.95±0.55	106.91±2.20	87.88±2.97	94.10±0.95	103.29±0.44	111.56±0.67	138.12±2.054
9	140.89±0.53	111.52±1.54	88.99±2.21	100.79±0.35	105.88±0.64	117.00±1.38	141.87±1.739
10	142.89±0.19	112.09±1.09	97.77±0.45	102.01±0.04	116.95±0.90	121.87±0.47	196.42±1.06
11	145.11±0.78	113.28±0.54	101.40±1.22	105.56±0.31	117.04±2.43	128.89±0.62	207.59±2.75



รูปที่ ช.1 เทอร์โมพลาสติกไดอัลทียูเรตีสตาร์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 0 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ช.2 เทอร์โมพลาสติกไดอิลดีไฮด์สตาร์ฟลิ้มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 เทอร์โมพลาสติกไดออกไซด์สตาร์ฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 11 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ช.4 เทอร์โมพลาสติกไดโอดสี่เหลี่ยมสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นระยะเวลา 20 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

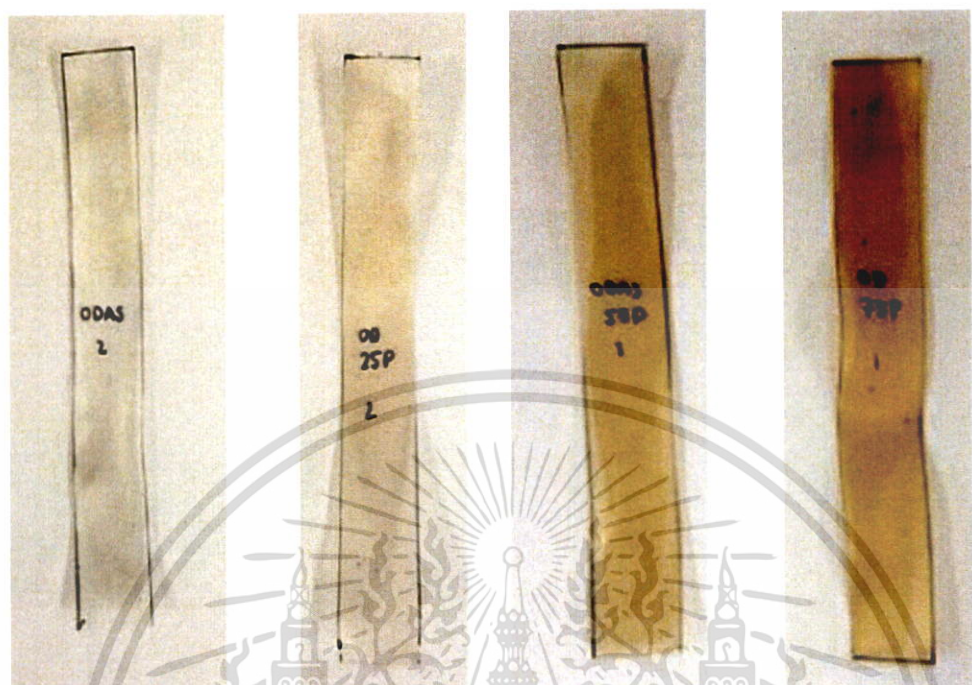
ภาคผนวก ข

สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตารางที่ ข.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกไดอัลติไฮด์สูตรต่าง ๆ หลังฝังดินเป็นระยะ
เวลา 15 วัน

สูตร	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%)	มอดุลัส (MPa)
0DASF	1.37±0.20	13.44±2.04	53.4±3.84
0DAS25PF	2.21±0.62	9.07±2.40	62.75±2.62
0DAS50PF	3.09±0.22	20.47±2.45	114.50±1.73
0DAS75PF	4.28±0.43	19.02±4.38	123.00±3.39
0.25DASF	3.15±0.75	13.81±0.65	131.00±9.56
0.5DASF	15.27±1.02	5.68±0.65	281.20±12.21
0.5DAS25PF	9.05±0.44	9.28±0.54	249.28±11.61
0.5DAS50PF	6.59±0.39	19.21±1.46	196.90±11.71
0.5DAS75PF	5.52±0.27	20.58±1.05	147.96±6.57
0.75DASF	14.24±1.76	6.48±0.71	231.40±21.52
1DASF	18.66±1.16	4.76±0.51	368.80±8.04
1DAS25PF	11.24±1.25	6.84±0.79	282.60±8.79
1DAS50PF	10.68±0.72	7.94±0.69	272.40±12.85
1DAS75PF	6.94±1.08	6.01±0.61	220.70±9.84
100PF	4.20±0.95	17.89±2.42	134.92±6.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ODASF

(ข) ODAS25PF

(ค) ODAS50PF

(ง) ODAS75PF



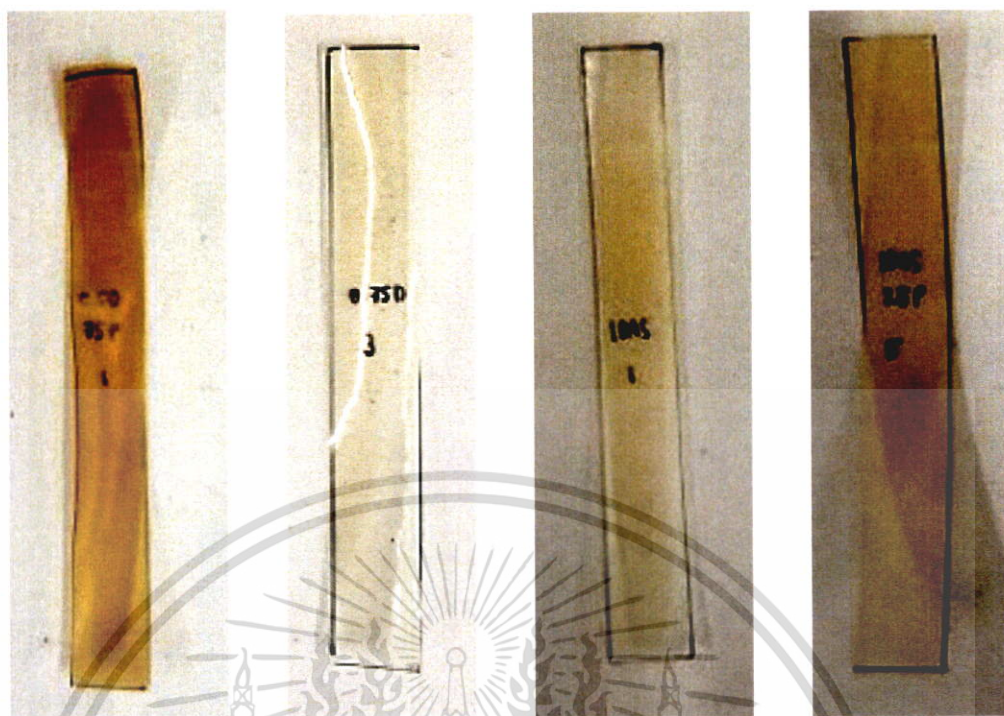
(จ) 0.25DASF

(ฉ) 0.5DASF

(ช) 0.5DAS25PF

(ซ) 0.5DAS50PF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ณ) 0.5DAS75PF

(ญ) 0.75DASF

(ฎ) 1DASF

(ฏ) 1DAS25PF



(ฐ) 1DAS50PF

(ฑ) 1DAS75PF

(ฒ) 100PF

รูปที่ ซ.1 เทอร์โมพลาสติกไดอัลตี้ไฮด์สูตรต่าง ๆ หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 15 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฅ

ตารางที่ ฅ.1 ที่มาของปริมาณสารที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกไดโอล์ดีไฮด์สตาร์ชฟิล์ม

ปริมาณของสาร (กรัม)			น้ำ (มิลลิลิตร)	หมายเหตุ
แป้ง	เพคติน	กลีเซอรอล		
10	-	2.4	100	แป้งที่ใช้มีปริมาณสูง ฟิล์มที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว
6	-	2.4	100	ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอของพื้นผิว และมีน้ำหนักปริมาณเพียงพอในการขึ้นรูป
5	-	2.4	100	ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอของพื้นผิว แต่น้ำหนักปริมาณไม่เพียงพอในการขึ้นรูป
-	6	2.4	100	ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอของพื้นผิว และมีน้ำหนักปริมาณเพียงพอในการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวศศิกร ภูมิแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	9 ตุลาคม 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 100/6 หมู่ 4 ตำบล ทับมา อำเภอเมือง จังหวัดระยอง 21000
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.67 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Poomkaew, S. and Prachayawarakorn, J. 2018. "Preparation and Properties of Thermoplastic Dialdehyde Cassava Starch Film by Sodium Metaperiodate." 105-109. In International Polymer Conference of Thailand 2018 (PCT-8) . Bangkok.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้