

สมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น
ที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจีนอล

PROPERTIES OF BIODEGRADABLE HEAT-MOISTURE TREATED STARCH
FILM MODIFIED BY CARBOXYMETHYL CELLULOSE AND EUGENOL



นิชกานต์ ฉายยะ
NICHAKARN CHAYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-012-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF BIODEGRADABLE HEAT-MOISTURE TREATED STARCH
FILM MODIFIED BY CARBOXYMETHYL CELLULOSE AND EUGENOL



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

2023

KMITL--2023-SC-M-012-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอล
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิชกานต์ ฉายยะ
รหัสนักศึกษา	62605076
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอล โดยดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของฟิล์มแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้นที่สภาวะต่าง ๆ สูงกว่าฟิล์มแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่การบวมตัว การดูดซับความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำลดลง โดยการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเป็นสภาวะการดัดแปรที่ดีที่สุด นอกจากนี้ศึกษาผลของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติมลงในฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน และฟิล์มมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก การบวมตัว การดูดซับความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำลดลง แต่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้นมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น ซึ่งปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงดั่งเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้มีการเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบพีคใหม่บริเวณ 1730 cm^{-1} โดยการเติมยูจินอลส่งผลให้การบวมตัว การดูดซับความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ และความแข็งแรงดั่งลดลงเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์การดั่งยึด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมยูจินอลสามารถเพิ่มความต้านทานเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* ซึ่งการเติมยูจินอล 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการต้านทานมากที่สุด

คำสำคัญ : แป้งมันสำปะหลัง การดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ยูจินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Properties of biodegradable heat-moisture treated starch film modified by carboxymethyl cellulose and eugenol
Student name	Nichakarn Chaya
Student ID	62605076
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research focused on the study of properties of cassava starch films modified by heat-moisture treatment (HMT), carboxymethyl cellulose (CMC) and eugenol (Eu). Different HMT conditions were examined at the temperature of 100 and 120°C for 1 and 2 hours. It was found that degree of crystallinity, thermal decomposition temperature and stress at maximum load of various HMT film were higher than those of NS film. However, swelling, water absorption and water vapor permeability were lower. The best modification condition from this study was 120 °C and 1 hour. In addition, different concentrations of CMC, i.e., 0, 5, 10, 15 and 20 %wt were also incorporated into the HMT starch film (120°C and 1 hour). It resulted in hydrogen bond formation and the decrease of crystallinity, swelling, water absorption and water vapor permeability. For HMT film, stress at maximum load increased with the increasing content of CMC and 10%wt CMC showed the optimum stress at maximum load. Moreover, various Eu contents i.e., 2, 3 and 4 %wt were added into different NS and HMT films (120°C and 1 hour) modified by 10 %wt CMC. It was observed that the new IR peak position at 1730 cm⁻¹ was detected by adding Eu. Moreover, swelling, moisture absorption, water vapor permeability and stress at maximum load was slightly decreased but elongation at maximum load enhanced after the addition of Eu into either NS/CMC or HMT/CMC films. In addition, the incorporation of Eu especially for 4%wt showed the best antibacterial activity against both *S. aureus* and *E. coli* bacteria types.

Keyword: Cassava starch, Heat-Moisture treatment, Carboxymethyl cellulose, Eugenol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณาเป็นกรรมการการสอบปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ที่กรุณาเป็นกรรมการการสอบปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับมหาบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารัตน์วาลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และการสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนโอกาสทางการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน เป็นกำลังใจ และเป็นแรงผลักดันจนโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นิชกานต์ ฉายยะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics)	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้	4
2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	4
2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	5
2.1.3.1 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	7
2.1.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ	7
2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	8
2.1.4.1 การทดสอบโดยการฝังดิน	8
2.1.4.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้	8
2.1.4.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป	9
2.2 แป้ง (Starch)	9
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญเกี่ยวกับแป้ง	9
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง	10
2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)	10
2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)	11
2.2.2.3 ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง	12
2.2.3 โครงสร้างของเม็ดแป้ง	12
2.2.4 สมบัติต่าง ๆ ของแป้ง	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)	15
2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร	15
2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)	15
2.3.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)	16
2.3.1.3 การดัดแปรแป้งทางเทคโนโลยีชีวภาพ	16
2.4 การดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น (Heat moisture treatment)	16
2.4.1 สมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น	17
2.4.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น	17
2.4.3 สมบัติการบวมตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น	17
2.4.4 สมบัติทางความร้อนของการเกิดเจลในเซชันและการคืนตัวของแป้งที่ ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น	17
2.5 มันสำปะหลัง	17
2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง	17
2.5.2 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง	18
2.6 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)	19
2.7 ยูจีนอล (Eugenol)	20
2.8 ระบบอิมัลชัน (Emulsion system)	20
2.8.1 สารลดแรงตึงผิว	20
2.8.2 Tween 80 (Polysorbate 80)	21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 สารเคมี	25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3 วิธีการทดลอง	28
3.3.1 เคำโครงการดำเนินงานวิจัย	28
3.3.2 การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนชื้น	29
3.3.3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น โซเดียม เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และยูจีนอล	30
3.4 การทดลองสมบัติต่างๆ	32
3.4.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total reflectance, ATR)	32
3.4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)	32
3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)	33
3.4.5 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)	33
3.4.6 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)	33
3.4.7 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Rate of water vapor permeability, WVP)	34
3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	34
3.4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	35
3.4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing)	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	36
4.1 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น	39
4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	39
4.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	41
4.1.3 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา	43
4.1.4 การทดสอบสมบัติการบวมตัว (Swelling)	44
4.1.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Water absorption)	45
4.1.6 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)	46
4.1.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	47
4.1.8 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	48
4.2 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ	51
4.2.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total reflectance, ATR)	51
4.2.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	53
4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	56
4.2.4 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา	59
4.2.5 การทดสอบสมบัติการบวมตัว (Swelling)	61
4.2.6 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Water absorption)	63
4.2.7 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)	64
4.2.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	65
4.2.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอลที่ ปริมาณต่าง ๆ	71
4.3.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total reflectance, ATR)	72
4.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	73
4.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	75
4.3.4 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา	78
4.3.5 การทดสอบสมบัติการบวมตัว (Swelling)	80
4.3.6 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Water absorption)	80
4.3.7 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)	81
4.3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	82
4.3.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	84
4.3.10 การทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial activity).....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลงานวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก	101
ภาคผนวก ข	111
ภาคผนวก ค	121
ภาคผนวก ง	131
ภาคผนวก จ	135
ภาคผนวก ฉ	139
ประวัติผู้เขียน	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ	10
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	25
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	25
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของยูจินอล	26
3.4 องค์ประกอบทางเคมีของทวิน 80	26
3.5 อัตราส่วนของวัสดุประกอบ	31
4.1 อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัย	36
4.2 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น	39
4.3 อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น	42
4.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น	46
4.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	50
4.6 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	55
4.7 อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	58
4.8 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	65
4.9 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	70
4.10 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ	74
4.11 อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ	77

- 4.12 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน 82
- 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน 87
- 4.14 แสดงระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ 88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	6
2.2 โครงสร้างของอะไมโลส	11
2.3 การบิดเป็นเกลียวโครงสร้างของอะไมโลส	11
2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	12
2.5 เทอร์โมแกรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแป้งที่มีผลึกแบบ A B และ Vh	13
2.6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน	14
2.7 มันสำปะหลัง	18
2.8 โครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	19
2.9 โครงสร้างยูจินอล	20
2.10 โครงสร้าง Tween 80	21
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัยส่วนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นและ CMC	28
3.2 แผนการดำเนินงานวิจัยส่วนการตัดแปรด้วยยูจินอล	29
3.3 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณผลึก	32
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอล	38
4.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ สภาวะต่างๆ	39
4.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ สภาวะต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DGT	41
4.4 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการ ตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (ก) NS (ข) HMT-110-1 (ค) HMT-110-2 (ง) HMT-120-1 และ(จ) HMT120-2	43
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการ ใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ	44
4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดย วิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ	45
4.7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ที่สภาวะต่าง ๆ	47

4.8	ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	48
4.9	ค่ามอดูลัสของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	49
4.10	เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	49
4.11	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่ผ่านการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS (ข) CMC (ค) NS-5%CMC (ง) NS-10%CMC (จ) NS-15%CMC และ (ฉ) NS-20%CMC	51
4.12	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) HMT 120-1 (ข) CMC (ค) HMT 120-1-5%CMC (ง) HMT 120-1-10%CMC (จ) HMT 120-1-15%CMC และ (ฉ) HMT 120-1-20%CMC	52
4.13	ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่ผ่านการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS (ข) CMC (ค) NS-5%CMC (ง) NS-10%CMC (จ) NS-15%CMC และ (ฉ) NS-20%CMC	54
4.14	ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ก) HMT 120-1 (ข) CMC (ค) HMT 120-1-5%CMC (ง) HMT 120-1-10%CMC (จ) HMT 120-1-15%CMC และ (ฉ) HMT 120-1-20%CMC	54
4.15	เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และใส่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA (ข) DGT	56
4.16	เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA (ข) DGT.....	57
4.17	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ (ก)NS (ข) NS-5%CMC (ค) NS-10%CMC (ง) NS-15%CMC (จ) NS-20%CMC (ฉ) HMT-120-1 (ข) HMT-120-1-5%CMC (ช) HMT-120-1-10%CMC (ฌ) HMT-120-1-15%CMC และ (ญ) HMT-120-1-20%CMC	60
4.18	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	62

4.19	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	62
4.20	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน.....	63
4.21	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	64
4.22	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน	66
4.23	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	67
4.24	ค่ามอดุลัสชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	68
4.25	ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	69
4.26	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้น ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS -10% (ข) NS -10%CMC-2Eu (ค) NS -10%CMC-3Eu และ (ง) NS -10%CMC-4Eu	72
4.27	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้น และใส่ที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) HMT 120-1-10%CMC (ข) NS-10%CMC-2Eu (ค) NS 10%CMC-3Eu และ (ง) NS-10%CMC-4Eu	72
4.28	ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอล (ก) NS-10%CMC (ข) NS -10%CMC-2Eu (ค) NS -10%CMC-3Eu และ (ง) NS -10%CMC-4Eu	73
4.29	ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอล (ก) HMT120-1-10%CMC (ข) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ค) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ง) HMT120-1-10%CMC-4Eu	74

4.30	เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นเสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG	75
4.31	เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG	76
4.32	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) HMT120-1-10%CMC (ข) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ค) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ง) HMT120-1-10%CMC-4Eu	79
4.33	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ	80
4.34	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ	81
4.35	สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ	82
4.36	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	84
4.37	ค่ามอดูลัสของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	85
4.38	ค่าเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน	86

- 4.39 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจินอลต่อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* โดย (ก) NS (ข) NS-10%CMC (ค) NS-10%CMC-2Eu (ง) NS-10%CMC-3Eu (จ) NS-10%CMC-4Eu (ฉ) HMT120-1-10%CMC (ช) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ซ) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ณ) HMT120-1-10%CMC-4Eu 89
- 4.40 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจินอลต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* โดย (ก) NS (ข) NS-10%CMC (ค) NS-10%CMC-2Eu (ง) NS-10%CMC-3Eu (จ) NS-10%CMC-4Eu (ฉ) HMT120-1-10%CMC (ช) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ซ) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ณ) HMT120-1-10%CMC-4Eu 90



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูกและมีสมบัติที่หลากหลาย จึงทำให้พลาสติกถูกนำมาใช้งานแทนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ไม้ หนัง แก้ว ยาง และเหล็ก ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านนี้ทำให้พลาสติกได้รับความนิยมและมีปริมาณการใช้งานสูงขึ้น แต่ปัญหาของพลาสติก คือ ยากต่อการย่อยสลายและตกค้างอยู่ในธรรมชาติ เนื่องจากทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นเวลานาน ก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกที่มีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการใช้งาน นอกจากนี้ยังเกิดปัญหามลพิษทางอากาศและปรากฏการณ์เรือนกระจก เนื่องจากการกำจัดขยะพลาสติกส่วนใหญ่ใช้วิธีการเผาไหม้ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์และก๊าซพิษอื่น ๆ [1] จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีการศึกษา ค้นคว้าเพื่อพัฒนาวัสดุทดแทนพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในระยะเวลาอันสั้น เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม [2]

จากปัญหาต่าง ๆ ข้างต้นส่งผลให้พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastics) จึงได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากเป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากพืชและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) ส่งผลให้ปัญหาด้านปริมาณขยะและด้านมลพิษในสิ่งแวดล้อมลดลง วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิด เช่น คอลลาเจน (Collagen) เคซีน (Casein) เซลลูโลส (Cellulose) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) และแป้ง (Starch) ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมที่นำมาผลิตพลาสติกชีวภาพที่สุด คือ แป้งซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก มีความบริสุทธิ์สูง ย่อยสลายง่ายและราคาถูก นอกจากนี้แป้งยังสามารถผลิตจากพืชทางการเกษตรได้หลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นต้น [3]

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เป็นแป้งที่ผลิตจากมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta crantz*) มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน มีขนาดอนุภาคที่เล็ก มีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ ซึ่งแป้งมันสำปะหลังสามารถหาได้ง่าย เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชไร่ที่นิยมปลูกในประเทศไทย โดยมีอัตราการผลิต 28-30 ล้านตันในปี พ.ศ. 2562 แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมมากมาย เช่น อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน ผงชูรส กระจก และอาหารสัตว์ เป็นต้น นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งมีข้อจำกัด คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ ว่องไวต่อความชื้น และไม่ต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือกระบวนการทางเคมี [4] การดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment, HMT) เป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพแบบหนึ่ง การดัดแปรด้วยวิธีนี้จะใช้สภาวะที่แป้งมีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 35%) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(90-120°C) เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 15 นาที – 24 ชั่วโมง โดยการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นส่งผลให้การพองตัว ความหนืด สมบัติการคืนตัว (Retrogradation) ขนาดอนุภาค และโครงสร้างผลึกของแป้งเปลี่ยนแปลงไป สามารถทนทานต่อความร้อนและแรงกระทำจากภายนอกสูง ซึ่งคล้ายกับแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการโครสลิงค์ด้วยสารเคมี [5]

การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้งอีกแนวทางหนึ่งสามารถทำได้โดย การนำแป้งมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) หรือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ตัดแปรมาจากสารจากธรรมชาติโดยการตัดแปรหรือปรับปรุงสมบัติของเซลลูโลสของส่วนประกอบในผนังเซลล์พืช เช่น ผักตบชวา ชานอ้อย เปลือกทุเรียน เยื่อฟางข้าว เป็นต้น CMC สามารถละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น เมื่อละลายแล้วจะมีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความคงตัวในช่วง pH 5.0-10.0 ซึ่ง CMC ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัว สารเพิ่มความหนืดและสารช่วยยึดจับ (Binding agent) ในอาหาร โดยสารชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการชักฟอก สี กาว สิ่งทอ กระดาษ เซรามิก อาหาร และยา เป็นต้น [6]

นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้งให้ทนทานต่อเชื้อแบคทีเรียสามารถทำได้โดยการใช้สารต้านทานแบคทีเรีย (Antibacterial agent) เช่น ยูจีนอล (Eugenol) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนดอกตูม ก้านดอก ของต้นกานพลู (*Syzygium aromaticum*) เป็นสมุนไพรพื้นบ้านนิยมปลูกในภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย กานพลูเป็นไม้ยืนต้น ไม้ผลัดใบ ใบเป็นรูปหอก ใบอ่อนมีสีแดง กานพลูมีสรรพคุณทางยา คือ เป็นยาชาเฉพาะที่ ขับลม บำรุงหัวใจ เป็นต้น นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่า ยูจีนอลสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้หลายชนิด เช่น *E. coli*, *S. aureus*, *B. subtilis* และ *P. aeruginosa* จึงมีการนำยูจีนอลมาใช้ในอุตสาหกรรมเช่น สบู่ น้ำหอม เครื่องหอม น้ำยาฆ่าเชื้อโรคผสมในยาสีฟัน น้ำยาฆ่าเชื้อที่บาดแผล และทันตกรรม เป็นต้น [7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น พบว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยการใช้ความร้อนขึ้นในสภาวะที่มีความชื้น 19% อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นและอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น [8] นอกจากนี้ผลการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมันสำปะหลังพบว่า เมื่อทำการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นแป้งมีการบวมตัวและความสามารถในการละลายลดลง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น [8] และจากงานวิจัยของ Tongdeesoontorn, W. *et al.* ที่ทำการศึกษาความเข้มข้นของ CMC ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้ง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้น เกิดการเคลื่อนของพีคบริเวณ 1592 cm⁻¹ แสดงว่ามีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ CMC จากการทดสอบเชิงกลพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสูงขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การยืดมีแนวโน้มลดลง [9] นอกจากนี้การศึกษาผลของยูจีนอลที่เป็นสารสกัดจากกานพลูในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร จากการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งทดสอบด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี Agar disc diffusion ต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในอาหาร 10 ชนิด พบว่ายูจีนอลสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ เช่น *S. aureus*, *B. cereus*, *E. coli*, *K. pneumoniae*, *E. aerogenes*, *S. flexneri* และ *C. freundii* โดยมีรัศมีวงยับยั้ง 9.70-21.5 มิลลิเมตร [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเทหล่อแบบ (Casting) โดยศึกษาผลของการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนและใช้ CMC เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล นอกจากนี้จะศึกษาการใช้ยูจีนอลเป็นสารต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพที่เตรียมได้ เช่น การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สมบัติการบวมตัว สมบัติการดูดซับไอน้ำ สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์ความใส สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติการย่อยสลายได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น CMC และยูจีนอลเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น
2. เพื่อศึกษาผลของสภาวะการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ปริมาณ CMC และยูจีนอลที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น CMC และยูจีนอลเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สมบัติการบวมตัว สมบัติการดูดซับไอน้ำ สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติการย่อยสลาย
2. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่าง ๆ ระหว่างฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น CMC และยูจีนอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น CMC และยูจีนอลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นจากพลาสติกที่ย่อยสลายยาก อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics)

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ปัจจุบันผู้คนเริ่มให้ความสนใจในเรื่องปริมาณขยะพลาสติกมากขึ้นที่เกิดจากความต้องการใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีความคงทนมาก ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้หรือใช้เวลาในการย่อยสลายที่นาน อีกทั้งการกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ด้วยวิธีการเผาหรือวิธีการฝังกลบ ส่งผลให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น จึงมีการศึกษาพลาสติกรูปแบบใหม่ที่ย่อยสลายได้เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะพลาสติกชีวภาพ ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติที่สามารถทดแทนขึ้นใหม่ได้ (Renewable sources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ สามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ราคาถูกและไม่มีพิษ แต่พลาสติกชีวภาพนี้ต้องมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่ากับพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบทั่วไป (Commodify plastics) โดยในปัจจุบันมีการให้คำนิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ไว้ดังนี้ [11-12]

International organization for standardization (ISO) กล่าวว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้ภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นสาเหตุให้สมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้ซึ่งใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับประเภทของพลาสติกและการใช้งาน [13]

American society for testing and materials (ASTM) ได้ให้คำนิยามไว้ว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้ เป็นพลาสติกที่ออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ ส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง [11]

2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics) คือ การย่อยสลายเมื่อพลาสติกสัมผัสกับแสงโดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักได้ง่ายเมื่ออยู่ภายใต้แสง เช่น มีหมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไปเสถียรเมื่อสัมผัสกับแสงจะเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่ข้อจำกัดของการย่อยสลายแบบนี้คือจะไม่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะ หรือในสภาวะแวดล้อมที่มืด [13-14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายแบบนี้มักเกิดกับพลาสติกที่ไม่มีการใส่สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี และแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เมื่อพลาสติกสัมผัสกับออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวี จะเกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียรเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่และสูญเสียสมบัติเชิงกล [13-14]

3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดกับพลาสติกที่มีหมู่เอสเทอร์ (Ester group) หรือเอไมด์ (Amide group) อยู่ในโครงสร้าง เช่น แป้ง พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) และพอลิยูรีเทน (Polyurethane) เมื่อผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะทำให้เกิดการแตกหักของพอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และ ประเภทที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) [13-14]

4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางกล (Mechanical Degradation) การย่อยสลายแบบนี้เกิดโดยการให้แรงกระทำกับพลาสติก ส่งผลให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ

5. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นการย่อยสลายพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ โดยการทำงานของเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ทั้งในสภาพที่มีหรือไม่มีอากาศ ได้เป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งจะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์มีขนาดใหญ่และสมบัติการไม่ละลายน้ำของพอลิเมอร์ โดยมีการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ออกมาเพื่อตัดสายโซ่พอลิเมอร์โดยตัดจากพันธะปลายสุดก่อนตามลำดับ จนกระทั่งได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการที่ 2 คือ การนำสารประกอบที่ย่อยได้เข้าสู่ภายในเซลล์เพื่อถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ก๊าซ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนโตรเจน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) [11, 14]

2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ที่มีกลไกการย่อยจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิต โดยการย่อยสลายนี้ต้องเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของพลาสติกในสภาวะแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันองค์กรต่าง ๆ ได้ให้คำจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไว้ เช่น ตามข้อกำหนด ASTM D20.96 ให้คำนิยามว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นพลาสติกที่เกิดการแตกหักพันธะของสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านทางปฏิกิริยาเคมี ชีวภาพ และกายภาพ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเกิดการย่อยสลายโครงสร้างของพลาสติก [11]

นอกจากนี้องค์กรต่าง ๆ ในต่างประเทศได้จัดทำมาตรฐานวิธีการทดสอบและรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติก เช่น International organization for standardization (ISO), American society for testing and materials (ASTM), Institute for standards research (ISR) และ Japanese industrial standards (JIS) เป็นต้น ซึ่งในระดับนานาชาติได้จัดทำมาตรฐานสำหรับรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพให้มีมาตรฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่อาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องขององค์ประกอบ และวิธีการทดสอบ [15]

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 ได้กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 1 ชนิดจะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารชีวมวล ภายในเวลา 6 เดือน ส่วนพอลิเมอร์ผสมจะต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงสภาพดินได้ โดยไม่มีความเป็นพิษทั้งต่อพืชและสัตว์ จึงจะถือว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อผลิตภัณฑ์ใดผ่านการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดไว้แล้วจึงจะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม compostable DIN CENTCO ของประเทศเยอรมนี PBS GreemPla ของประเทศญี่ปุ่น และ Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น [11, 15]



รูปที่ 2.1 ลักษณะการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 การใช้งานผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น

1. การใช้งานด้านการแพทย์และสาธารณสุข

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุสำหรับการผ่าตัด และการเย็บแผล ซึ่งสามารถย่อยสลายหรือละลายได้เมื่อสัมผัสกับของเหลวภายในร่างกายภายในระยะเวลาหนึ่ง ผิวหนังเทียม แคมปูเลียที่ถูกออกแบบให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาวอย่างช้า ๆ ภายในร่างกาย นอกจากนี้ยังสามารถนำมาทำไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามตามกระดูกที่ได้รับการฝังไว้ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายเองได้ภายหลัง ทำให้ไม่ต้องได้รับการผ่าตัดอีกรอบเพื่อนำอุปกรณ์เหล่านี้ออก หลังการรักษาเสร็จ [16]

2. การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

สำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่คือ ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้มีสัดส่วนในขยะเป็นปริมาณสูงเนื่องจากมีน้ำหนักเบา สะดวกในการใช้งาน ราคาถูก และสามารถนำมาใช้แทนวัสดุอื่น ๆ ได้ เช่น กระดาษ โลหะ ไม้ หรือแก้ว แต่มีข้อจำกัดคือการรีไซเคิลสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและการทำความสะอาด รวมถึงการรีไซเคิลมีค่าใช้จ่ายที่สูง พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไปเพื่อลดปริมาณขยะ [16]

3. การใช้งานด้านเกษตรกรรม

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่มีความสำคัญที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ สตอเบอรี่ ซึ่งฟิล์มที่ใช้คลุมหน้าดินนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเจริญเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นให้ดิน การใช้ฟิล์มคลุมดินที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้ อีกทั้งยังช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินที่มักเกิดในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยตัวยา ปุ๋ย หรือสารเคมีทางการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในพื้นที่แห้งแล้ง รวมถึงทำเป็นกระถางสำหรับการเพาะกล้า [16]

2.1.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

1. โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาตินั้นต้องมีโครงสร้างที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ คือ มีพันธะที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลลดลงเรื่อย ๆ จนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านจะสามารถย่อยสลายได้ยากกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง เนื่องจากความเกะกะของกิ่งก้านจะไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ และพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชนิดของจุลินทรีย์

ธรรมชาตินั้นมีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูง ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดที่สังเคราะห์เอนไซม์แตกต่างกัน ซึ่งเอนไซม์ที่แตกต่างกันนี้จะมีความสามารถในการย่อยสลายพลาสติกที่ไม่เท่ากัน โดยปกติแล้วการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นจากจุลินทรีย์มากกว่า 1 ชนิด และในสภาวะที่ปราศจากจุลินทรีย์นั้นก็แทบจะไม่มีกรย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้น [16]

3. สภาพแวดล้อม

สภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากการปรับสภาพแวดล้อมให้มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- ปริมาณก๊าซออกซิเจน ช่วยส่งเสริมการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วขึ้น
- น้ำและความชื้น ช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปัจจัยที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- อุณหภูมิ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่นอุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 25-35 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในธรรมชาติ

2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

2.1.4.1 การทดสอบโดยการฝังดิน

เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร และขุดตัวอย่างออกมาทุกเดือนจากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน หรือทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น [17]

2.1.4.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้

เป็นวิธีที่วัดการเปลี่ยนแปลงจากกายภาพที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เช่น ความขรุขระการเปลี่ยนแปลงของสี รูพรุน หรือรอยแตกหักตามชิ้นงาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกและสามารถทำการทดสอบได้โดย [16]

- การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทดสอบความเปลี่ยนแปลงของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น สีที่เปลี่ยนแปลง รอยแตกหรือรอยฉีกขาดเกิดขึ้น และขนาดของพลาสติกที่เล็กลงเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- การวิเคราะห์ด้วยสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพจะมีค่าสมบัติเชิงกลต่ำลง เนื่องจากการย่อยสลายทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ขาดและสั้นลง น้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง

- วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งทำให้ทราบว่า การย่อยสลายของจุลินทรีย์จะส่งผลต่อส่วนอสัณฐาน (Amorphosity) ของพอลิเมอร์ให้ลดลง โดยส่วนอสัณฐานจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์มากกว่าส่วนผลึก

2.1.4.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปของพลาสติกเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดคือ การให้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์อยู่กับจุลินทรีย์เป็นเวลานาน กลุ่มของจุลินทรีย์จะเกิดการฝังตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ส่งผลให้น้ำหนักที่ได้มีค่าสูงเกินจริงเนื่องจากมีน้ำหนักของจุลินทรีย์รวมอยู่ด้วย โดยการย่อยสลายส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ แสดงว่าน้ำหนักที่สูญหายไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว ดังนั้นในการรายงานผลที่แม่นยำขึ้นควรรายงานค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ต่อพื้นที่ผิวทดสอบ [16]

2.2 แป้ง (Starch)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญเกี่ยวกับแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สำคัญ สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ในใบ และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ด ราก ลำต้น และหัว เป็นต้น บทบาทที่สำคัญของแป้งคือใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานของมนุษย์ โดยให้พลังงานสูงถึงร้อยละ 70-80 ของพลังงานที่ต่อบริโภค นอกจากนี้แป้งยังเป็นแหล่งโภชนาการที่สำคัญ ซึ่งโภชนาการส่วนใหญ่ก็มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ขนมปัง ข้าว อาหารจำพวกเส้น เป็นต้น แป้งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาดของอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-100 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคจะขึ้นกับแหล่งที่มาของวัตถุดิบที่ผลิตแป้ง เช่น แป้งจากข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวสาลี จากทวีปอเมริกา แป้งจากมันฝรั่ง ในทวีปยุโรป และแป้งจากข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง จากทวีปเอเชียและทวีปแอฟริกา เป็นต้น [18-19]

ในทางสากลแป้งนั้นมีความหมายว่า สารกลุ่มคาร์บอนไฮเดรตที่มีองค์ประกอบหลักๆ เป็นอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ และอื่น ๆ ซึ่งแป้งที่สัดส่วนสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณมากจะจัดเป็นประเภท ฟลาวร์ (Flour) เช่น แป้งข้าวโพด (Corn flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกสกัดออกหมดจนเหลือแต่แป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แป้งนั้นจะจัดเป็นประเภท สตาร์ช (Starch)

นอกจากนี้ได้มีการนำแป้งมาใช้ในการอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอาหารเพื่อใช้แป้งในการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ อาหาร เช่น การทำให้เกิดเจล การทำให้เกิดความคงตัว การทำพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) การสเตอริไรเซชัน (Sterilization) และป้องกันเนื้อสัมผัสอาหารเสียรูปจากกระบวนการแช่แข็ง นอกจากนี้อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมกระดาษ ก็มีการนำแป้งมาใช้ด้วยเช่นกัน [17, 19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

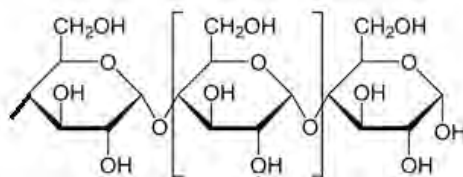
แป้งเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย อะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ซึ่งแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) แป้งมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) โดยทั่วไปในแป้งจะมีสัดส่วนของอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส ประมาณ 80 ต่อ 20 หรือ 70 ต่อ 30 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและชนิดของแป้ง จึงส่งผลให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน นอกเหนือจากนี้แป้งยังมีสารตัวกลาง (Intermediate material) และสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และเถ้า เป็นต้น [17, 19]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่าง ๆ [13]

ชนิดแป้ง	เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต	เปอร์เซ็นต์ ไขมัน	เปอร์เซ็นต์ โปรตีน	เปอร์เซ็นต์เถ้า	เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส
ข้าวโพด					
- ปกติ	98.9	0.60	0.35	0.10	0.015
- อะไมโลสสูง	99.4 – 98.7	0.40 – 1.10	-	0.20	0.070
ข้าวสาลี	98.6	0.8	0.4	0.20	0.060
ข้าว	98.3	0.08	0.4	0.50	0.010
มันฝรั่ง	99.5	0.05	0.06	0.40	0.080
มันสำปะหลัง	99.6	0.10	0.10	0.20	0.010

2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคสประมาณ 100 – 6000 หน่วย เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยพันธะ α -1,4 Glycosidic เป็นหลักมี พันธะ α -1,6 Glycosidic ในปริมาณน้อย โดยขนาดของโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและกระบวนการแปรรูปแป้ง เช่น แป้งที่มาจากธัญพืช ได้แก่ แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสที่สูงประมาณ 22 – 30% ส่วนแป้งที่มาจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาคุ จะมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 18 -24% ส่วนแป้งข้าวเหนียวนั้นจะไม่มีปริมาณของอะไมโลสเลย จากโครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส พบว่า มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก ส่งผลให้แป้งมีสมบัติความชอบน้ำและการละลายน้ำที่ดี นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสสามารถบิดเป็นเป็นเกลียวได้ (Helical conformation) ทำให้สามารถเกิดเป็นไมเซลล์ในน้ำและสามารถละลายในไขมันได้ [19]



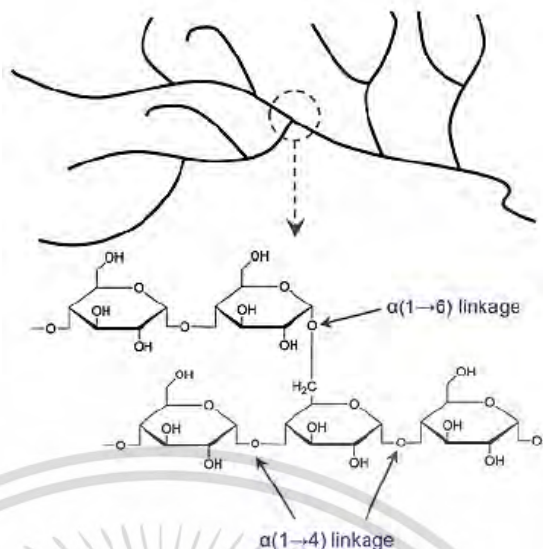
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [19]



รูปที่ 2.3 การบิดเป็นเกลียวโครงสร้างของอะไมโลส [19]

2.2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคติน เป็นพอลิเมอร์เชิงสายโซ่กิ่งที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 Glycosidic และ พันธะ α -1,6 Glycosidic ซึ่งสายโซ่กิ่งจะมีความห่างกันประมาณ 6 – 12 หน่วย โดยสายโซ่กิ่งแต่ละสายจะประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลกลูโคส 12 – 15 หน่วย ทำให้โครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีโมเลกุลที่ใหญ่กว่าอะไมโลส นอกจากนี้อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลที่ประมาณ 1000 เท่าของอะไมโลส เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูงของอะไมโลเพคติน ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของโมเลกุลลดลง มีอัตราการคืบตัวต่ำ และมีสมบัติความชอบน้ำสูงจากการที่มีจำนวนหน่วยซ้ำของกลูโคสที่มาก [19]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [19]

2.2.2.3 ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง

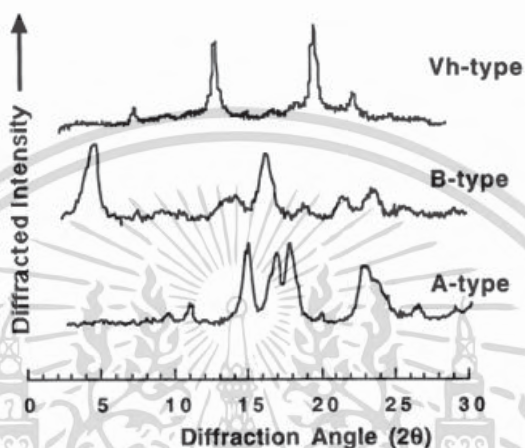
1. ส่วนประกอบที่ไม่ใช่แป้งที่แยกจากแป้งได้ (Particular material) เช่น โปรตีน และผนังเซลล์ของเม็ดแป้งที่ไม่ละลาย
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ทำให้เม็ดแป้งเกิดความเสียหาย เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์ (Amyloplast membrane)
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถสกัดออกได้แต่เม็ดแป้งจะเกิดการเสียหาย เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง [17]

2.2.3 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Granule) ที่มีขนาดเล็ก เมื่อทำการตรวจดูด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่มาของแป้งชนิดนั้น ๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ที่ประกอบไปด้วยส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และ ส่วนผลึก (Crystallite) เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ส่วนอสัณฐานในเม็ดแป้งคือบริเวณที่ประกอบไปด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน แต่สำหรับส่วนผลึก คือส่วนที่เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของอะไมโลเพคตินในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ต่อกันในรูปของคลัสเตอร์ (Series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบไปด้วยชั้นผลึก (Crystalline lamellae) [17-18]

เม็ดแป้งมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ผลึกแบบ A (A-type) เกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นของเกลียวคู่ เช่น แป้งจากธัญพืชและราก แต่ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ จะเกิดผลึกแบบ B (B-type) เช่น แป้งที่มาจากพืชหัว แต่ถ้ามีการเอกลำนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจะเกิดผลึกแบบ C (C-type) เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว นอกจากนี้ยังมีผลึกแบบ Vh (Vh-type) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนเกิดจากการจับกันของอะไมโลสกับแอลกอฮอล์ที่เป็นเส้นตรง ไอโอดีน หรือกรดไขมัน ซึ่งผลึกแบบนี้จะพบในแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสมากกว่าร้อยละ 40 เช่น แป้งข้าวโพดที่มีการดัดแปลงโครงสร้างทางพันธุกรรม



รูปที่ 2.5 เทอร์โมแกรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งที่มีผลึกแบบ A B และ Vh [17]

2.2.4 สมบัติต่าง ๆ ของแป้ง

1. การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

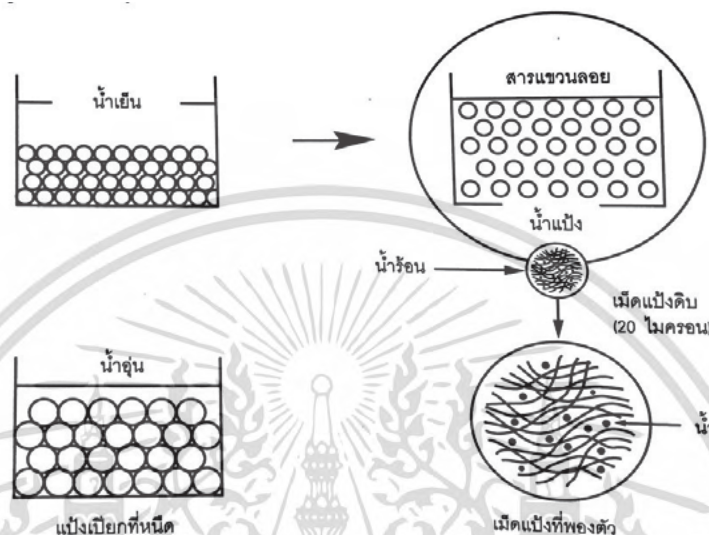
แป้งไม่สามารถละลายในน้ำได้แต่สามารถดูดซับน้ำไว้ประมาณ 25 – 30% และพองตัวได้น้อยมากจนไม่สามารถสังเกตได้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในเม็ดแป้ง ส่วนผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นจะป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ส่งผลให้สมบัติการดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายน้ำลดลง แต่ส่วนของอสัณฐานที่จัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้ แต่ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการคลายการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายมากขึ้น [17]

2. การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) เป็นหลัก เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำแต่เนื่องจากเป็นแป้งอยู่รูปของร่างแห (Miselles) ซึ่งการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำได้ยากแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวส่งผลให้เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัวส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดสูงและใสขึ้นเพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งน้อยลงเม็ดแป้งเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลในเซชัน อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลใน ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยแป้งจากพืชหัวจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลในต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืชการเกิดเจลในเซชัน [17]



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [17]

3. การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันแล้วยังให้ความร้อนต่อไปเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสจะกระจายตัวออกมาทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดคงตัวมากขึ้น มีลักษณะเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์ม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การคืนตัวของแป้งสุก หรือการคืนตัว (Setback) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้นเนื่องจากโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาภายนอกเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น การคืนตัวของแป้งสุกจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดเบสของสารละลาย เป็นต้น [17,20]

4. ความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของแป้งเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้นซึ่งพฤติกรรมความหนืดนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งที่อยู่ในน้ำได้รับความร้อนระดับหนึ่งจะพองตัวขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกันอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) การที่แป้งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดสูงสุดเนื่องจากเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้นและโมเลกุลของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินบางส่วนแตกออกมากอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้น ความหนืดจะเริ่มลดลง [20]

5. ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จากแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในสภาพแวดล้อมที่เก็บรักษาแป้ง ภายใต้สภาพบรรยากาศปกติแป้งธรรมชาติจะมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์โดยที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็นศูนย์ความชื้นของแป้งก็จะเข้าใกล้ศูนย์ด้วย โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์จะมีปริมาณความชื้นประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ [20]

2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดัดแปร หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพ และ ทางเทคโนโลยีชีวภาพ โดยการใช้สารเคมี ความร้อน หรือ เอนไซม์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการดัดแปรแป้ง เพื่อเปลี่ยนแปลงปรับปรุงสมบัติบางประการให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น ความคงทนต่อความร้อน คงทนต่อการกดเบส คงทนต่อแรงเฉือนที่มากระทำ ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้ง สมบัติการยึดติด และความสามารถในการละลายหรือตัวทำละลายอื่น ๆ [17]

2.3.1 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

1. การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีในสภาวะเบส ซึ่งแป้งอนุพันธ์จะมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งปกติ เช่น อุณหภูมิในการเกิดเจลต่ำลง การพองตัวมากขึ้น การละลายมากขึ้น ความหนืดมากขึ้นหรือน้อยลง และทนทานต่อการขึ้นรูปมากขึ้น เป็นต้น แป้งอนุพันธ์จำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของแป้งกับกรดคาร์บอกซิลิก หรือ การทำปฏิกิริยาของแป้งกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น แอนไฮไดรด์ (Anhydride) อะซิลคลอไรด์ (Acylchloride) และเอสเทอร์ แป้งที่ได้มีสมบัติเด่นคือมีความหนืดสูงกว่าแป้งปกติ และ รักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเป็นเจลจะมีความใส ความอ่อนตัว และ ยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน [21]

- แป้งอนุพันธ์จากปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อีเทอร์ สมบัติของแป้ง คือ มีการคั่นตัวน้อย อุณหภูมิในการเกิดเจลต่ำลง พองตัวในน้ำเย็นได้ดี คงตัวได้ดี มีความคงทนต่อการกดและเบส [21]

- แป้งเชื่อมโยง (Cross-linked starch) คือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกสารนั้นว่า สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแป้งในสภาวะแขวนลอย ซึ่งพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจะส่งเสริมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น การพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงขึ้น สามารถทนทานต่อกรดเบส ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน [17]

2. แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยกรด (Acid-Modified starch) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดอินทรีย์ทำให้ขนาดโมเลกุลของแป้งเล็กลง เมื่อไปละลายในน้ำร้อนจะมีความหนืดน้อยกว่าแป้งปกติ เมื่อเกิดการคั้นตัวจะได้เจลที่แข็งและหีบสามารถยืดเกาะได้ดี [17]

3. แป้งออกซิเดชัน (Oxidized starch) ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาของแป้งกับสารออกซิไดซ์ ได้แก่สารในกลุ่มโบรมีน คลอรีน ไฮโปคลอไรท์ เปอร์ซัลเฟต เป็นต้น โดยสมบัติของแป้งที่ได้ คือ มีอัตราการคั้นตัวของแป้งเปียกลดลง และแป้งเปียกที่ร้อนมีความหนืดต่ำลง และมีความใสเพิ่มขึ้น [17]

2.3.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)

1. แป้งพรีเจลลาติไนซ์ (Pregelatinized starch) หรือแป้งพรีเจลสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับแป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลลาติไนเซชันแล้วทำให้แป้งแห้งทันที ทำให้ได้แป้งที่สามารถละลายได้ดีในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันทีและไม่เกิดเจล ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งธรรมดาเหมาะสำหรับใช้กับอุตสาหกรรมอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน [17]

2. การลดขนาดของแป้งด้วยวิธีการเชิงกล (Mechanical milling) คือการทำให้เม็ดแป้งแตกออกโดยทางกล ซึ่งขนาดของเม็ดแป้งมีผลต่อสมบัติบางประการ เช่น การพองตัวและการละลาย

3. การอบอ่อน (Annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลลาติไนซ์

4. การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงในสถานะที่มีความชื้นจำกัด ส่งผลให้สมบัติทางความร้อนและความหนืดเปลี่ยนแปลงไป

2.3.1.3 การดัดแปรแป้งทางเทคโนโลยีชีวภาพ

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของแป้ง ได้แก่

1. Waxy starch เป็นแป้งที่ปราศจากอะไมโลสหรือมีปริมาณอะไมโลสต่ำทำให้สมบัติที่ได้คล้ายกับสมบัติของแป้งข้าวเหนียว คือ มีความเหนียวและความมันสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกาวและสิ่งทอ [17]

2. High amylose starch คือ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงส่งผลให้แป้งพองตัวได้ยาก อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงขึ้น เมื่อทำเป็นฟิล์มจะมีสมบัติที่แข็งแรงสูงและยืดหยุ่นได้ดี

2.4 การดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น (Heat moisture treatment)

การดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้นเป็นการดัดแปรทางกายภาพด้วยการให้ความร้อนสูงกับแป้งที่มีความชื้นต่ำ (< 35%) โดยอุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลาติไนเซชันของแป้ง (80 – 120 องศาเซลเซียส) โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการดัดแปรประมาณ 30 นาที – 24 ชั่วโมง ซึ่งที่สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรด้วยความชื้นสูงเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนขึ้น เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อโครงสร้างและผลึก การพองตัว ความสามารถในการละลาย ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจลาตินเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน ความสามารถในการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ของ แป้งหลังการดัดแปร การดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นกับแป้งจากพืชหัวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแป้งจาก พืชตระกูลถั่วและธัญพืช โดยประสิทธิภาพในการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจะขึ้นกับ ชนิดของแป้ง องค์ประกอบของแป้ง ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน สภาวะในการทดสอบ และเวลาในการดัดแปร เป็นต้น [22-23]

2.4.1 สมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ไม่พบการรายงานว่าการดัดแปรแป้งด้วยความร้อนขึ้นทำให้สมบัติทางเคมี เช่น ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เปลี่ยนไป อาจเนื่องมาจากการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่วนใหญ่ส่งผลต่อ ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง [23]

2.4.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

เมื่อทำการทดสอบโครงสร้างผลึกของแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B เช่น แป้งมันฝรั่ง จะโครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปเป็นแบบ A หรือแบบ C หลังจากผ่านการดัดแปร ส่วนแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C เช่น แป้งมันสำปะหลัง เมื่อผ่านการดัดแปรจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A แต่แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก เมื่อผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น [23]

2.4.3 สมบัติการบวมตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นจะมีการบวมตัวต่ำลง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของอะไมโลสกับสายโซ่อะไมโลสด้วยกันเอง หรือ ระหว่างสายโซ่อะไมโลสกับสายโซ่ของอะไมโลเพคติน ในระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น [23]

2.4.4 สมบัติทางความร้อนของการเกิดเจลาตินเซชันและการคืนตัวของแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น จะมีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินเซชันที่สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากการบวมตัวของส่วนอสัณฐานส่งผลให้ส่วนผลึกจัดเรียงตัวแน่นขึ้น แต่ถ้าวความร้อนในการดัดแปรสูงเกินไปอาจส่งผลให้ส่วนผลึกถูกทำลายและทนทานต่อความร้อนลดลง ดังนั้นอุณหภูมิในการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมบัติของแป้ง [23]

2.5 มันสำปะหลัง

2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชตระกูลหัวชนิดหนึ่งมีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า แคสซาวา (Cassava) มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ เช่น ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส และบราซิล มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นมีอายุอยู่ได้หลายปี หลังจากปลูกได้ประมาณ 2 เดือนจะเริ่มมีการสะสมแป้งไว้ที่ราก และจะเริ่มออกสาคเป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าหัวมันสำปะหลัง และสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่อหัวมันสำปะหลังมีอายุประมาณ 6 – 12 เดือน

ในประเทศไทยมีพื้นที่การปลูกมันสำปะหลังประมาณ 6.58 ล้านไร่ ส่วนมากอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก โดยผลผลิตกว่าร้อยละ 45 ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถผลิตได้ปีละ 1.6 ล้านเมตริกตัน โดยถูกใช้ภายในประเทศประมาณ 700,000 ตัน มีลักษณะเป็นผงสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดคล้ายกาว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เหมาะกับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร [17]



รูปที่ 2.7 มันสำปะหลัง [17]

2.5.2 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง

1. อุตสาหกรรมมันเส้น

การทำมันเส้นเป็นการแปรรูปที่ง่ายที่สุด เริ่มจากเมื่อเก็บเกี่ยวมันสดก็จะนำส่งลานมัน และทำการแปรรูปด้วยเครื่องตัดหัวมันเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปตากบนลานตากอีกครั้ง เมื่อแห้งดีแล้วก็ทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบต่อให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมสัตว์ หรืออุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป [17]

2. อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

มันอัดเม็ด หรืออีกชื่อหนึ่งคือมันเม็ด คือการนำมันเส้นมาอัดโดยเครื่องอัดภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและความดัน หลังจากอัดแล้วจะมีลักษณะเป็นท่อนยาวประมาณ 1 – 2 เซนติเมตร ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งออกไปขายต่างประเทศเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำอาหารสัตว์ เนื่องจากมันอัดเม็ดมีปริมาณแป้งสูงจึงใช้เป็นแหล่งพลังงานของสัตว์ [17]

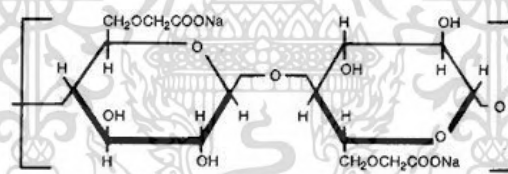
3. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ประเทศไทยถือเป็นประเทศที่นำมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลังมากที่สุด และถือเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เช่น ตัวช่วยที่ทำให้อาหารข้นขึ้น ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว ช่วยให้อาหารเกาะกันได้ดีขึ้น และช่วยในการเสริมแต่ง แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งเป็นสารละลายที่ใช้สำหรับชุบเส้นด้ายก่อนนำไปทอผ้า เพื่อให้เส้นด้ายลื่น เรียบไม่มีขน และเป็นสารหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดหรือพันกัน และในปัจจุบันนิยมนำแป้งมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไป นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น อุตสาหกรรมผงชูรส อาหารสัตว์ สารให้ความหวาน กาว และ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น [17]

2.6 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่แทนที่ได้ 3 หมู่ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลือโซเดียม หรือเรียกอีกอย่างว่า เซลลูโลสแกม ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดที่สามารถแตกตัวให้หมู่ที่มีประจุลบ (Anionic hydrocolloid) หมู่ไฮดรอกซิลของ CMC สามารถเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงส่งเสริมการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์จากแป้งได้โดยทั่วไป CMC ที่มีค่าระดับการแทนที่ (Degree of substitution, DS) ประมาณ 0.3 หรือต่ำกว่านั้นจะไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะละลายในด่าง CMC ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมักมีค่า DS ประมาณ 0.7 นอกจากนี้ CMC สามารถละลายในน้ำเย็นได้ แต่จะละลายได้เร็วขึ้นในน้ำร้อน ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์แต่จะละลายในสารละลายผสม เช่น น้ำกับเอทานอล หรือน้ำกับอะซิโตน ในการละลาย CMC ควรทำให้ละลายอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาค [24]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [6]

ปัจจุบันนิยมใช้ CMC เป็นสารให้ความหนืด สารเพิ่มความคงตัว สารแขวนลอย สารช่วยให้เกิดเจล และสารช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของสารละลาย เป็นต้น เนื่องจาก CMC แม้ในปริมาณน้อยก็สามารถทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสารละลาย CMC มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplasticity) คือ เมื่อมีแรงเฉือนที่มากขึ้นจะทำให้ความหนืดมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างของ CMC เป็นสายโซ่ยาว เมื่อได้รับแรงเฉือนจะทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวแรงที่มากระทำกับสายโซ่เป็นผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง สารละลาย CMC จะมีความเสถียรที่ความเป็นกรดต่างประมาณ 7 – 9 และที่ความเป็นกรดต่างที่มากกว่า 10 ความหนืดของสารละลาย CMC จะลดลง ส่วนความเป็นกรดต่างที่น้อยกว่า 4 ความสามารถในการละลายของ CMC จะลดลง [24]

2.7 ยูจีนอล (Eugenol)

ยูจีนอลหรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า 4-allyl-2-methoxyphenol หรือ 2-methoxy-4-(2-propenyl) phenol เป็นสารประกอบอะโรมาติกซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{10}H_{12}O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 164.20 กรัม/โมล จุดเดือดเท่ากับ 254 องศาเซลเซียสและมีจุดหลอมเหลว -7.5 องศาเซลเซียส มีค่า pKa เท่ากับ 10.19 และมีความหนาแน่น 1.067 g/ml ที่ 25 องศาเซลเซียส ยูจีนอลเป็นน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากพืชสมุนไพรและเครื่องเทศหลายชนิด เช่น กานพลู อบเชย ใบพลู ยี่หระ โหระพา ตะไคร้หอม เป็นต้น ส่วนลักษณะทางกายภาพของยูจีนอล จะมีลักษณะเป็นของเหลวไม่มีสีจนถึงสีเหลืองอ่อน สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ และมีกลิ่นคล้ายน้ำมันกานพลู [25]

ในปัจจุบันมีการศึกษาผลการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจีนอล พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ 13 ชนิด ได้แก่ *E. aerogenas*, *K. pneumoniae*, *S. flexneri*, *C. freundii*, *S. Typhimurium*, *S. Enteritidis*, *E. tarda*, *L. innocua*, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7, *E. coli*, *S. aureus*, *B. Cereus* [10] จึงมีการนำยูจีนอลมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม สารแต่งกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อราในพืชในการเกษตร ใช้เป็นยาขับปัสสาวะ และใช้เป็นยาแก้ปวดฟันในด้านทันตกรรม [25]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างยูจีนอล [25]

2.8 ระบบอิมัลชัน (Emulsion system)

อิมัลชัน (Emulsion) คือ ระบบคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งมีองค์ประกอบของของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่สามารถละลายหรือผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยระบบคอลลอยด์ประกอบด้วย 2 วัฏภาค วัฏภาคแรกเรียกว่า วัฏภาคภายใน (Internal phase) ซึ่งจะกระจายตัวอย่างไม่ต่อเนื่องอยู่ในอีกวัฏภาคหนึ่งซึ่งเรียกว่า วัฏภาคภายนอก (External phase) ที่อยู่ในรูปของอนุภาค เช่น ระบบน้ำในน้ำมัน น้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งการแบ่งกันเป็น 2 วัฏภาคนี้อาจทำให้เกิดความไม่คงตัวของของผสม ซึ่งสามารถทำให้อิมัลชันมีความคงตัวได้โดยการเติมสารที่เรียกว่า สารลดแรงตึงผิว (Surfactant agent) [26]

2.8.1 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว หรือ สารทำอิมัลชัน (Emulsifier) ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ชอบน้ำหรือส่วนที่มีขั้ว (Hydrophilic) และ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำหรือส่วนที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic) โดยสมบัติเด่นของสารชนิดนี้คือเป็น แอมฟิฟิลิก (Amphiphilic molecule) ที่สามารถ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายได้ทั้งในส่วนที่มีขี้และส่วนที่ไม่มีขี้ เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในของผสมระหว่างน้ำกับน้ำมัน โดยส่วนที่มีขี้จะละลายในน้ำและส่วนที่ไม่มีขี้จะละลายในส่วนของน้ำมันจึงเป็นตัวแทนสารผสมให้รวมตัวเป็นไมเซลล์ (Micelle) ซึ่งความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นไมเซลล์ต้องมีความเข้มข้นต่ำสุดที่จุดวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) [26]

2.8.2 Tween 80 (Polysorbate 80)

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Tween 80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) โดย Tween 80 มีสูตรโครงสร้าง $C_{64}H_{124}O_{27}$ มีน้ำหนักโมเลกุล 1,310 กรัม มีลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวหนืดสีเหลือง นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) เช่น ไอศกรีม น้ำกะทิกระป๋อง มายองเนส เป็นต้น [27]



รูปที่ 2.10 โครงสร้าง Tween 80 [27]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alves V.D *et al.* (2007) ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อแป้งมันสำปะหลังที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอลที่ 5 20 32.5 และ 45 กรัมต่อแป้ง 100 กรัม โดยใช้เทคนิคการหล่อแบบ (Casting) พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่าความเครียด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันค่าความเค้น ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสมีค่าลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลพบว่า โครงสร้างของแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลเนื่องจากกลีเซอรอลเข้าไปแทรกตามสายโซ่ของแป้ง ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณกลีเซอรอลที่มากขึ้นยังส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำออกลดลงด้วย เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้โครงสร้างแป้งมีช่องว่างมากขึ้นจึงดูดซับโมเลกุลน้ำเข้ามาในโมเลกุลได้มากขึ้น [28]

Gunaratne A. *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาผลของการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อแป้งที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน คือ ผลิตแบบ A และแบบ B โดยทำการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ความชื้นแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้แบ่งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B มีค่าพลังงานในการสลายพันธะ (Enthalpy of transition, ΔH) ของแบ่งลดลง แต่ไม่ส่งผลให้ค่าดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงสำหรับแบ่งผลึกแบบ A เนื่องจากแบ่งโครงสร้างผลึกแบบ B ถูกทำลายในระหว่างการตัดแปร ดังนั้นหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นระดับของการแยกจากกัน (Degree of separation) ระหว่างกิ่งสายนอกสุดของอะไมโลเพคตินที่อยู่ติดกันมีระยะห่างมากขึ้นในแบ่งโครงสร้างผลึกแบบ B แต่ไม่เกิดขึ้นในแบ่งผลึกแบบ A [29]

Hoover R. et al. (1994) ศึกษาผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ส่งผลต่อแบ่งจากธัญพืช พืชตระกูลถั่ว และพืชหัว ในสถานะที่มีความชื้น 30% อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า การลดลงของค่า ΔH ของแบ่งจากมันฝรั่งและแบ่งจากพืชหัวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายของเกลียวคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้าง และมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากแบบ B ไปเป็นผลึกแบบ C นอกจากนี้พบว่าค่า ΔH ลดลงตามปริมาณของความชื้นที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณของสายเกลียวคู่ที่ถูกทำลายไปในแบ่งจากมันฝรั่งและแบ่งจากพืชหัวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีผลมาจากการเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น [30]

Olayemi E. et al. (2019) ทำการศึกษาผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นแบ่งจากมันสำปะหลัง โดยใช้สภาวะในการตัดแปร ที่ความชื้น 19% อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าแบ่งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (Onset temperature, T_o) ค่าอุณหภูมิที่จุดสูงสุด (Peak temperature, T_p) และค่าอุณหภูมิที่จุดสุดท้าย (Conclusion temperature, T_c) ที่สูงขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลในส่วนอสัณฐานในเม็ดแบ่งเกิดการพองตัวส่งผลให้สายโซ่ส่วนที่เป็นผลึกมีการจัดเรียงตัวที่แน่นขึ้น [8]

Ghanbarzadeh B. et al. (2010) ศึกษาการเตรียมพลาสติกชีวภาพจากแป้งกล้วย ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ที่อุณหภูมิ 88-112 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.5-24 ชั่วโมง และใช้ความชื้น 19-31 % จากการทดสอบ พบว่า ชิ้นงานจากแป้งกล้วยที่ผ่านการตัดแปร มีการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากแป้งกล้วยที่ไม่ผ่านการตัดแปร ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุล ภายในเม็ดแบ่งใหม่ ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีค่าสูงขึ้น จึงขัดขวางการแทรกซึมของไอน้ำได้ดี และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ การบวมตัว และการละลาย ของชิ้นงานที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ก็น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นขึ้น ก็น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น [31]

Tongdeesoontorn W. et al. (2011) ได้ศึกษาผลของปริมาณ CMC ที่มีผลสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง โดยทำการศึกษาปริมาณ CMC ที่ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น ค่าการละลายน้ำของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ CMC โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่น ความแข็งแรงระหว่างโมเลกุลจึงมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแทรกตัวได้ยาก ดังนั้นการละลายน้ำของฟิล์ม

จึงลดลงเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ CMC ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่มีความยืดหยุ่นจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงตามปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น [9]

Ma X. *et al.* (2008) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งจากพืชตระกูลถั่วกับ CMC โดย CMC มีปริมาณ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า CMC มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มลดลง คือ จาก 317 องศาเซลเซียส เป็น 298 องศาเซลเซียส เนื่องจาก CMC เมื่อละลายแล้วเป็นสารที่มีความหนืดสูงส่งผลให้การเคลื่อนตัวของโมเลกุลและการจัดเรียงของสายโซ่โมเลกุลลดลง ทำให้ฟิล์มมีความทนทานต่อความร้อนลดลงด้วย นอกจากนี้เมื่อนำฟิล์มมาทดสอบความสารณในการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่า ฟิล์มจากแป้งที่มีการเติม CMC สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่าฟิล์มจากแป้งที่ไม่มีการเติม CMC เกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแป้งกับ CMC และขนาดอนุภาคที่ใหญ่ของ CMC [32]

Nattagarn H. *et al.* (2021) ศึกษาการเตรียมฟิล์มช่วยยืดอายุอาหารจากแป้งมันสำปะหลังคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) และไขมันปาล์ม จากการศึกษาพบว่า การละลายน้ำและการบวมตัวของชิ้นงานที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไขมันปาล์ม มีค่าการละลายและการบวมตัวลดลง 4.9 และ 6.5% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ใส่สารปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากไขมันปาล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีการสร้างพันธะไฮโดรเจนจากหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง [34]

วรยุทธ ยอดบุญ และคณะ (2555) ศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหยของกานพลู ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร พบว่าน้ำมันหอมระเหยกานพลูมีลักษณะเป็นน้ำมันสีเหลืองเข้ม มีกลิ่นหอม มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ 7.3% จากการทดสอบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ได้ผลการทดสอบว่าน้ำมันหอมระเหยกานพลูมีวงยับยั้งอยู่ที่ประมาณ 10.67 – 15.00 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น *E. aerogenas*, *K. pneumoniae*, *S. flexneri*, *C. freundii*, *S. Typhimurium*, *S. Enteritidis*, *E. tarda*, *L. innocua*, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7, *E. coli*, *S. aureus*, *B. Cereus* เป็นต้น เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยกานพลูมีสารที่ชื่อว่า ยูจีนอล ซึ่งพบมากถึง 70 – 80% ที่สามารถเข้าทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ส่งผลให้เซลล์ตาย นอกจากนี้พบว่าค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดของสารสกัดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์น้ำมันหอมระเหยกานพลู มีค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ (Minimal inhibitory concentration, MIC) อยู่ในช่วง 2.32 – 148.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิเมตร โดยเชื้อที่มีความไวต่อน้ำมันหอมระเหยกานพลูมากที่สุด คือ *B.Cereus* [10]

Zheng K. *et al.* (2019) ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากไคโตซาน ที่ใส่ยูจีนอล ในปริมาณต่างๆ โดยใช้ tween80 เป็นอิมัลชัน พบว่าชิ้นงานที่มีการใส่ยูจีนอล มีค่าความแข็งแรงดึงลดลง เมื่อปริมาณยูจีนอลเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 15.5 MPa เป็น 13.7 MPa เนื่องจากยูจีนอลเข้าไปเพิ่มปริมาตรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุญาต หากฝ่าฝืนอาจมีโทษตามกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิสระ (Free volume) ในโมเลกุลของชิ้นงาน ทำให้โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลห่างกัน และทำลายความต่อเนื่องของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง นอกจากนี้พบว่า การใส่ยูจินอลส่งผลให้ชิ้นงานสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแกรมลบ (*E. coli*) ได้ เนื่องจากยูจินอลจะทำลายการขนส่งสารระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์ จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลภายในเซลล์ เชื้อแบคทีเรียจึงตาย [33]

Narayanan A. et al. (2013) ศึกษาการเตรียมฟิล์มต้านแบคทีเรียจากพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (PHB) ที่ผสมกับยูจินอล 10–200 $\mu\text{g/g}$ ของ PHB เมื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆพบว่า การเพิ่มขึ้นของยูจินอลทำให้ฟิล์มมีสีเหลืองซีด โดยฟิล์ม PHB จะสามารถต้านทานแบคทีเรีย *S. aureus* *S. typhimurium* *E. coli* และ *B. cereus* ได้ เมื่อผสมยูจินอลตั้งแต่ 80 $\mu\text{g/g}$ ของ PHB ขึ้นไป และต้านทานดีที่สุดเมื่อผสมยูจินอล 200 $\mu\text{g/g}$ ของ PHB และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ฟิล์ม PHB ที่ไม่มียูจินอล แต่ค่าความแข็งแรงดิ่งมีค่าลดลง 23.5 MPa นอกจากนี้พบว่า การเติมยูจินอลส่งผลให้ฟิล์ม PHB มีปริมาณผลึกอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง [35]

Raigond P. et al. (2019) ศึกษาการทำการบรรจุภัณฑ์อาหารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย จากแป้งมันฝรั่งและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ยูจินอลเป็นสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย 4 ชนิด คือ *S. aureus* *E. coli* *Salmonella typhi* (*S. typhi*) และ *Campylobacter jejuni* (*C. jejuni*) พบว่ายูจินอลต้านทานเชื้อ *S. aureus* ได้ดีที่สุดโดยที่ความเข้มข้น 0.6 และ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย แต่ยูจินอลไม่สามารถต้านทาน *S. typhi* ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของยูจินอลที่ใช้ไม่เพียงพอ นอกจากนี้พบว่า การใส่ยูจินอลส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง ตามปริมาณยูจินอลที่มากขึ้น โดยการใส่ยูจินอล 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง 23% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ยูจินอล เนื่องจากยูจินอลมีลักษณะเป็นน้ำมันเข้าไปลดแรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ [36]

Cheng J. et al. (2021) ศึกษาการเตรียมฟิล์มต้านทานเชื้อแบคทีเรียจากแป้งกลอยจีน (Chinese yam starch) ยูจินอล และปรับปรุงความแข็งแรงด้วยเซลลูโลสสายสั้น (Microcrystalline cellulose) โดยใช้ ยูจินอล 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์มที่ใส่ยูจินอล มีค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง แต่มีเปอร์เซ็นต์การดิ่งยืดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ใส่ยูจินอล เนื่องจาก ยูจินอลมีหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จึงเพิ่มความยืดหยุ่นของชิ้นงาน แต่ไปลดความต่อเนื่องของผลึก จึงทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง นอกจากนี้สมบัติการซึมผ่านไอน้ำมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยูจินอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากยูจินอลเข้าไปเติมส่วนที่ไม่ชอบน้ำให้กับชิ้นงาน โมเลกุลของน้ำจึงแทรกเข้าชิ้นงานลดลง [38]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง ตรามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจัน องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังตามตารางที่ 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
ความเป็นกรดขด้าง	6 - 7

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลีเซอรอล (glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system Co., Ltd.
3. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxy methyl cellulose; CMC) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

	Standard	Analysis
Physical Form	White Powder	White Powder
Viscosity, mPa.s(2%Soln.)	2400-2600	2600
Degree of Substitution (D.S)	0.70-0.95	0.79
pH Value	6.0-8.5	7.0
Moisture, %	10.0 max	6.2
Purity, %	99.5 min	99.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. ยูจีนอล (Eugenol) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของยูจีนอล

	มาตรฐาน
ลักษณะ	ของเหลว
สี	ไม่มีสี
กลิ่น	แรง
จุดหลอมเหลว/ช่วงของจุดเยือกแข็ง	-12 ถึง -10 °C
จุดเดือด	254 °C
จุดวาบไฟ	124 °C
ความดันไอ	0.04 hPa
ความหนาแน่น	1.067 g/cm ³
อุณหภูมิที่ลุกติดไฟได้	380 °C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. ทวิน 80 (Tween80) จากบริษัทเคมีภัณฑ์ จำกัด

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของทวิน 80

	Analysis
Acid Value (mg KOH/g)	0.24
Appearance (30°C)	PASS
Color	G-3
Hydroxyl Value (mg KOH/g)	74.6
Moisture (%)	0.15
pH (1%aq)	6.34
Saponification Value (mg KOH/g)	50.9
Specific Gravity at 25°C(g/cm ³)	1.078

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. น้ำกลั่น (Distilled water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

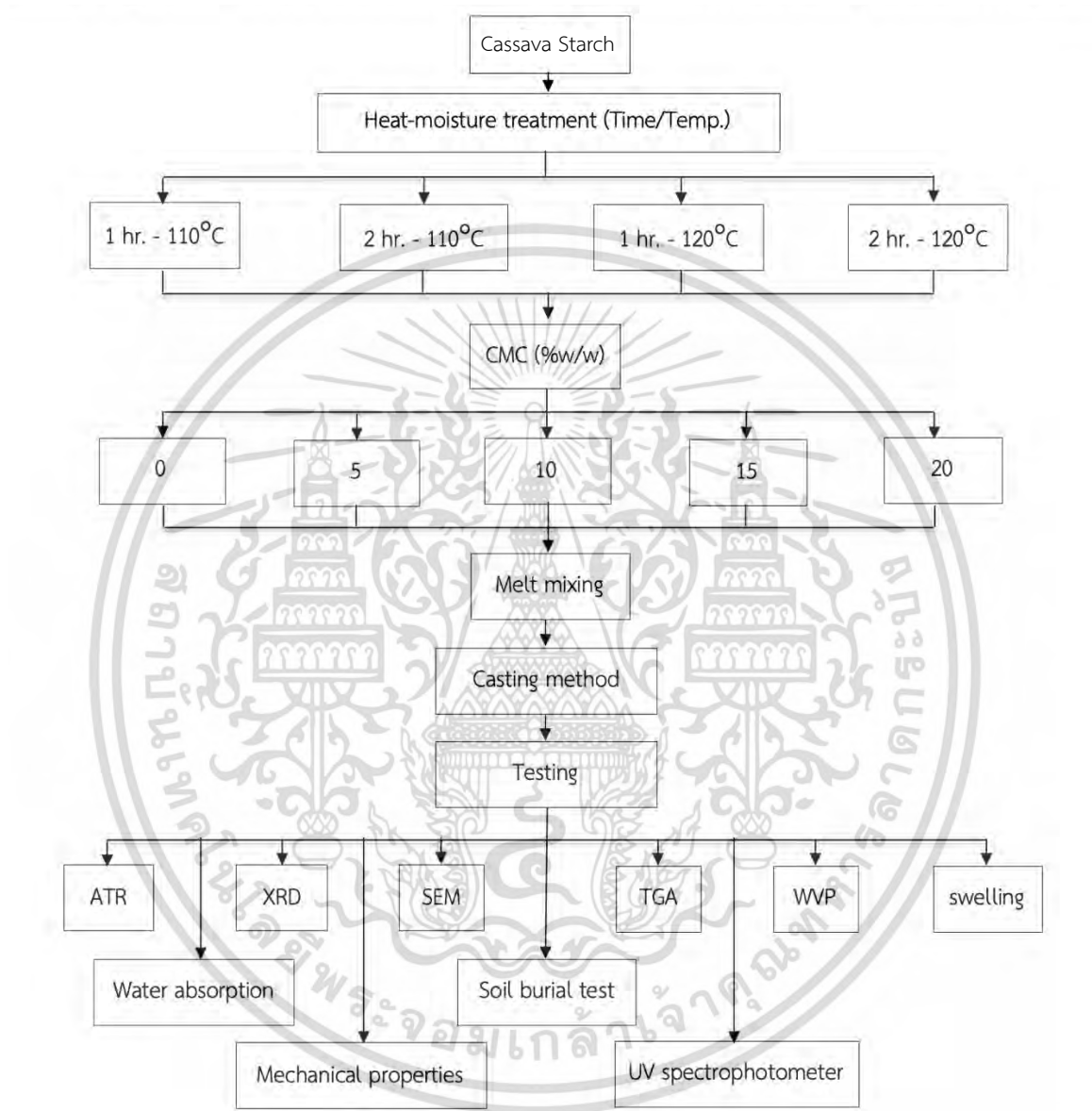
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance) รุ่น ML3002 ของบริษัท Mettler Toledo จากประเทศไทย
3. เตาให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น c-mag HS7 5000 ของบริษัท IKA Co, Ltd. จากประเทศเยอรมัน
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น ULM 600/1 ของบริษัท Memmert Co., Ltd จากประเทศไทย
5. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic machine) รุ่น Wise clean ของบริษัท Wisd Co.. Ltd. จากประเทศญี่ปุ่น
6. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) รุ่น SX-500 ของบริษัท Tomy จากประเทศญี่ปุ่น
7. ขวดดูแรน (Duran bottle) ขนาด 250 มิลลิลิตร
8. ถาดพลาสติก (Polypropylene tray) ขนาด 17 x 23 cm.
9. เวอร์เนีย (Vernier)
10. เครื่องวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometry, XRD) รุ่น XRD-6100 ของบริษัท Shimadzu จากประเทศญี่ปุ่น
11. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น TGA/DSC 3+ จากบริษัท Mettler Toledo จากประเทศไทย
12. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น IRTracer-100 ของบริษัท Shimadzu จากประเทศญี่ปุ่น
13. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น UV 9100 ของบริษัท Lab Tech, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา
14. กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-5910 จากบริษัท Jeol Co., Ltd. จากประเทศเยอรมัน
15. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR5KPlus จากบริษัท LLOYD INSTRUMENT Ltd. จากประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 วิธีการทดลอง

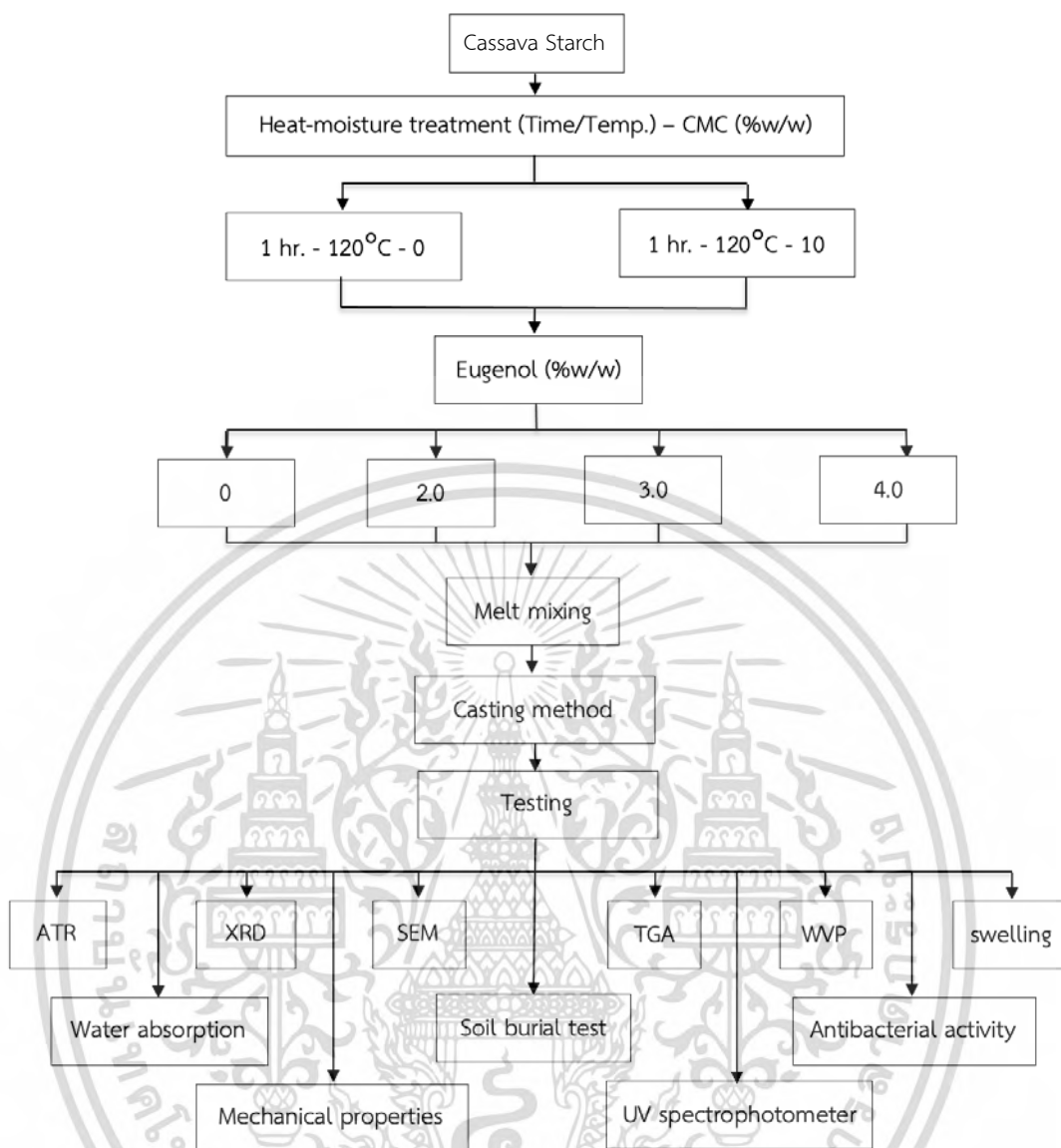
3.3.1 คำโครงการดำเนินงานวิจัย

แผนผังการดำเนินงานสำหรับงานวิจัย แสดงได้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัยส่วนการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นและ CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานวิจัยส่วนการดัดแปรด้วยยูจีนอล

3.3.2 การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้ความร้อนขึ้น

1. นำแป้งไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปรับความชื้น ให้แป้งมีความชื้นร้อยละ 20 ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{ความชื้น (\%)} = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ W_e = น้ำหนักแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 20

W_0 = น้ำหนักแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 0

2. ชั่งแป้งที่ปรับความชื้นแล้ว 200 กรัม ใส่ในขวดสุญญากาศขนาด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำขวดคูแรนที่บรรจุแป้งแล้วใส่ในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ โดยใช้อุณหภูมิ 110 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

4. นำแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นแล้ว ไปบดให้ละเอียด

3.3.3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นโดย โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และยูจินอล

1. ผสม CMC ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักแป้ง กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวน (Magnetic bar) ขนาด 5 เซนติเมตร แล้วนำบีกเกอร์ไปวางบนเตาให้ความร้อน ผสมให้เข้ากันโดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย 80 ± 2 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนด้วยความเร็ว 1050 rpm ประมาณ 15 นาที

2. นำบีกเกอร์สารละลาย CMC ไปวางในเครื่องอัลตราโซนิก ประมาณ 30 นาที และตากฟองอากาศด้านบนออก

3. ผสมแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น 10 กรัม กลีเซอรอลร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวนขนาด 5 เซนติเมตร นำบีกเกอร์ไปวางบนเตาให้ความร้อน ผสมให้เข้ากันพร้อมปั่นกวนด้วยความเร็ว 450 rpm ประมาณ 5 นาที

4. นำสารละลาย CMC ในข้อ 2 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เทผสมในสารละลายข้อ 3 โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย 71 ± 2 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนด้วยความเร็ว 600 rpm เป็นเวลาประมาณ 20 นาที

5. นำบีกเกอร์ลงจากเตา เทลงในถาดหล่อขึ้นรูปพลาสติก เกลี่ยสารละลายให้สม่ำเสมอทั่วถาด โดยชั่งน้ำหนักให้มีน้ำหนักเฉลี่ย 80 ± 2 กรัม เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์ม

6. อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือจนกว่าฟิล์มจะแห้งสนิท

7. เมื่อฟิล์มแห้งสนิทแล้ว นำออกจากตู้อบลมร้อน พักทิ้งไว้ให้เกิดการเย็นตัว แล้วจึงลอกฟิล์มออกจากถาด แล้วนำไปเก็บไว้ในถุงซิปล็อค เพื่อป้องกันการดูดความชื้นของฟิล์ม

8. ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม เพื่อเลือกสูตรที่ดีที่สุด มาทดสอบสมบัติเมื่อเติมยูจินอลต่อไป

9. ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยการเติมยูจินอลทำได้โดย การผสมยูจินอลปริมาณ 2 3 และ 4 phr (part per hundred of rubber) โดยใช้ Tween80 ปริมาณ 1 phr เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ไปผสมกับแป้งและกลีเซอรอล

10. จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มตามข้อ 4-7

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของวัสดุประกอบ

สูตร	แป้ง (g.)	CMC (g.)	น้ำ (g.)	กลีเซอรอล (g.)	ยูจีนอล (g.)	ทวิน 80 (g.)
NS	10.0	-	200	3	-	-
HMT 1-110	10.0	-	200	3	-	-
HMT 2-110	10.0	-	200	3	-	-
HMT 1-120*	10.0	-	200	3	-	-
HMT 2-120	10.0	-	200	3	-	-
NS-CMC5	9.5	0.5	200	3	-	-
NS- CMC10	9.0	1.0	200	3	-	-
NS- CMC15	8.5	1.5	200	3	-	-
NS- CMC20	8.0	2.0	200	3	-	-
HMT 1-120- CMC5	9.5	0.5	200	3	-	-
HMT 1-120-CMC10**	9.0	1.0	200	3	-	-
HMT 1-120- CMC15	8.5	1.5	200	3	-	-
HMT 1-120-CMC20	8.0	2.0	200	3	-	-
NS- CMC10-Eu2	9.0	1.0	200	3	0.2	1.0
NS- CMC10-Eu3	9.0	1.0	200	3	0.3	1.0
NS - CMC10-Eu4	9.0	1.0	200	3	0.4	1.0
HMT 1-120-CMC10-Eu2	9.0	1.0	200	3	0.2	1.0
HMT 1-120-CMC10-Eu3	9.0	1.0	200	3	0.3	1.0
HMT 1-120-CMC10-Eu4	9.0	1.0	200	3	0.4	1.0

หมายเหตุ NS คือ แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร

HMT คือ การดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (Heat-moisture treated)

Eu คือ ยูจีนอล (Eugenol)

* คือ HMT 1-120 เป็นสูตรที่มีสมบัติต่าง ๆ ดีที่สุดจึงนำมาศึกษาการใส่ CMC ต่อ

** คือ CMC ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติของฟิล์มแป้งเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจึงนำมาศึกษาการใช้ยูจีนอลต่อ

3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.4.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยใช้โหมด Attenuated Total reflectance, ATR

การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโครงสร้างของโมเลกุลของสาร นำฟิล์ม แป้งขนาด 1*1 ตารางนิ้ว วางบน ATR prism เพื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น 4000-700 cm^{-1} ทำการสแกน 45 ครั้งต่อตัวอย่าง ที่ความละเอียด 4 cm^{-1}

3.4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์หาปริมาณผลึกของชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบนหน้าผลึกที่มุมต่าง ๆ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งใช้ $\text{CuK}\alpha$ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.64 อังสตรอม) ใช้ขนาดของมุมตกกระทบสำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ได้พิคทั้งหมด (Net area) คือ $2\theta = 5-50$ องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที โดยพื้นที่ที่สนใจ (Raw area) คือ $2\theta = 10-30$ องศา โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ดังนี้

$$\% \text{ Crystallinity} = (\text{Raw area} / \text{Net area}) \times 100 \quad (3.2)$$



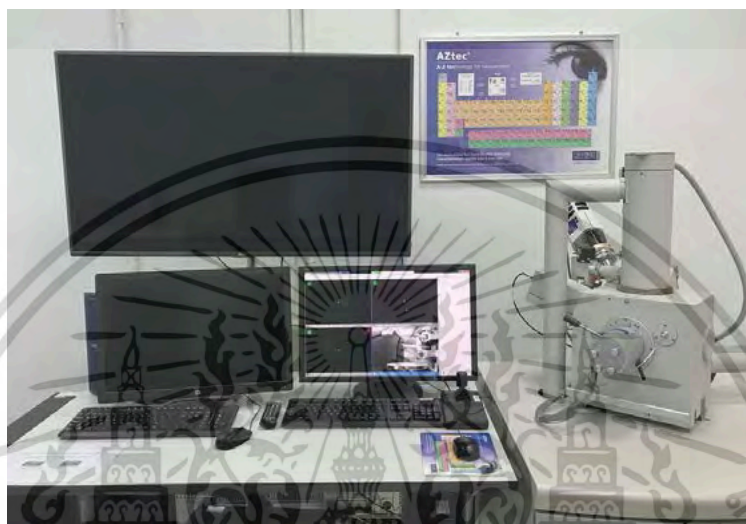
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณผลึก

3.4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นตักใส่พาน (Pan) ที่ต่อกับเครื่องซึ่งที่มีความไวและความละเอียดสูง วิเคราะห์โดยใช้ความร้อนตั้งแต่ 30 - 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานมาหักในไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำชิ้นงานมาเคลือบทองคำก่อนนำเข้าเครื่องทดสอบ เพื่อศึกษาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.5 การทดสอบการบวมตัว (Swelling)

ในการศึกษาการบวมตัวของชิ้นงาน ทำได้โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1x1 ตารางนิ้ว สูตรละ 3 ชิ้น นำชิ้นงานใส่ตะแกรงลวดที่ปิด ขนาด 200 เมช (Mesh) และนำไปแช่น้ำหนักโดยละเอียด (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่น โดยวางตะแกรงลวดปิดที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานแรกมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง และชั่งอีกครั้งที่ 24 48 และ 72 ชั่วโมง ซึ่งก่อนนำไปชั่งน้ำหนักต้องซับน้ำออกจากแผ่นฟิล์มให้หมดด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณร้อยละการบวมตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ Swelling} = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ W_e คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

3.4.6 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

การหาปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน ทำตามมาตรฐาน ASTM E 104 โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.5x2.5 ตารางเซนติเมตร สูตรละ 3 ชิ้น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นงานแห้งสนิท เมื่อเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่น โดยวางตะแกรงลวดปิดที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานแรกมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง และชั่งอีกครั้งที่ 24 48 และ 72 ชั่วโมง ซึ่งก่อนนำไปชั่งน้ำหนักต้องซับน้ำออกจากแผ่นฟิล์มให้หมดด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณร้อยละการดูดซับความชื้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

เซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หรือจนกระทั่งความชื้นในชิ้นงานหมดไป คือชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ แล้วนำชิ้นงานไปชั่งโดยละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บันทึกค่าที่ได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปวางในภาชนะปิดที่อิมมิดด้วยน้ำกลั่น ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเวลา 21 วัน โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

$$W_a (\%) = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ W_a คือ ร้อยละการดูดซับความชื้น

W_e คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

3.4.7 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Rate of water vapor permeability, WVP)

ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผ่านพื้นที่หรือความหนาของชิ้นงานต่อเวลา ทดสอบโดยใช้วิธี Desiccant method ตามมาตรฐาน ASTM E96 ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการตัดฟิล์มเป็นวงกลมให้มีพื้นที่ประมาณ 7 ตารางเซนติเมตร วางปิดผลึกลงบนถ้วยที่บรรจุซิลิกาเจล 20 กรัมด้วยพาราฟิน แล้วนำไปวางในเดซิเคเตอร์โดยมี NaCl ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75% ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักถ้วยซิลิกาเจลทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$WVP = (WVTR/A)(e/\Delta P_v) \quad (3.5)$$

เมื่อ WVP คือ อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม · มิลลิเมตรต่อตารางเมตร · วัน · กิโลปาสกาล)

WVTR คือ อัตราการถ่ายเทไอน้ำ (กรัม · วินาที⁻¹)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงานตัวอย่าง ($32.15 \cdot 10^{-3}$ ตารางเมตร)

E คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

ΔP_v คือ ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างบรรยากาศของ $CaCl_2$ และบรรยากาศสิ่งแวดล้อม (Pa)

3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน จะทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D882-02 ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $60 \pm 5 \%$

ทดสอบตามสภาวะดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) 50 mm/min

ระยะทดสอบ (Gauge length) 50 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดเซลล์ (Load cell)	1	kN
จำนวนตัวอย่างทดสอบ	10	ขึ้นต่อสูตร

ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) ของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงคำนวณได้จาก

$$\text{Stress at maximum load (MPa)} = F/A \quad (3.6)$$

เมื่อ F คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load) คำนวณจาก

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

เมื่อ L คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (mm)

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

มอดุลัส (Modulus) คำนวณจาก

$$\text{Modulus (MPa)} = \text{Stress} / \text{Strain}$$

3.4.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน จะเตรียมตัวอย่างโดยการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100×15 ตารางมิลลิเมตร ฝังในดินที่มีความชื้นในช่วง 5-10 % ที่ความลึก 10 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป เพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ฝังดิน

3.4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน ASTM F895-11 (Agar diffusion method) โยทดสอบเพื่อหาบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (zone of inhibition) ของชิ้นงานตัวอย่างในอะการ์ ในขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) ความเข้มข้น 1% และ เอทานอลที่มีเข้มข้น 95% เป็นสภาวะควบคุม ใส่ชิ้นงานลงบนกระดาดชกรองที่ปราศจากเชื้อ จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อในจานเพาะ (Petri dish) โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้คือ แบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 และแกรมลบ *Escherichia coli* ATCC 25922 เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตร

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอล โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของสภาวะในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้ อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และความชื้น 20% ตอนที่ 2 ทำการศึกษาเปรียบเทียบของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีผลต่อฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลในปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง และ ตอนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของการใส่ยูจินอลโดยใช้หีน 80 ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งทำการศึกษาปริมาณยูจินอลที่ 0 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบแล้ว จึงนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา การบวมตัว การดูดซับความชื้น อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์ความใส สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	สูตร/อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	NS	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร
2	HMT-110-1	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3	HMT-110-2	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4	HMT-120-1	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5	HMT-120-2	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6	NS-CMC5	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 wt%
7	NS-CMC10	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

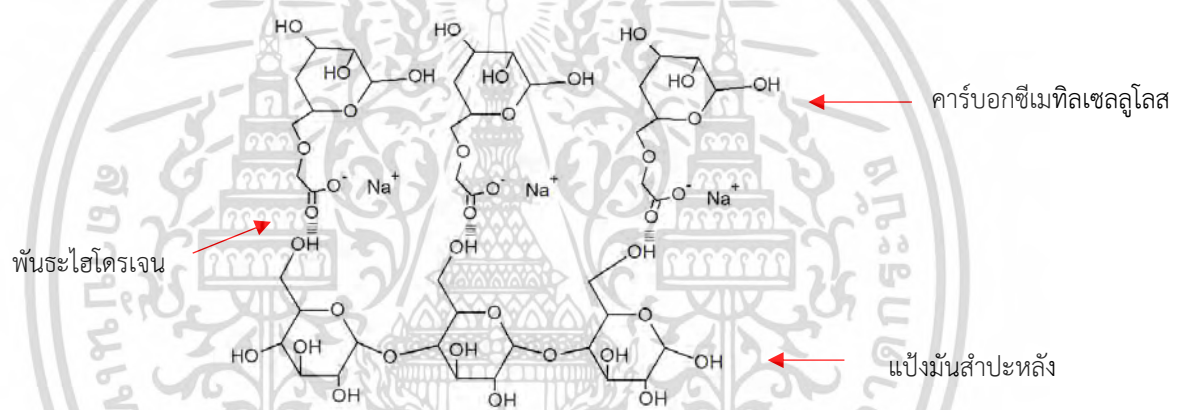
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

8	NS-CMC15	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 wt%
9	NS-CMC20	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 wt%
10	HMT-120-1-CMC5	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 wt%
11	HMT-120-1-CMC10	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt%
12	HMT-120-1-CMC15	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 wt%
13	HMT-120-1-CMC20	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 wt%
14	NS -CMC10-Eu2	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 2 wt%
15	NS -CMC10-Eu3	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 3 wt%
16	NS -CMC10-Eu4	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 4 wt%
17	HMT1-120-CMC10-Eu2	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 2 wt%
18	HMT1-120-CMC10-Eu3	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 3 wt%
19	HMT1-120-CMC10-Eu4	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 wt% และใส่ยูจินอล 4 wt%

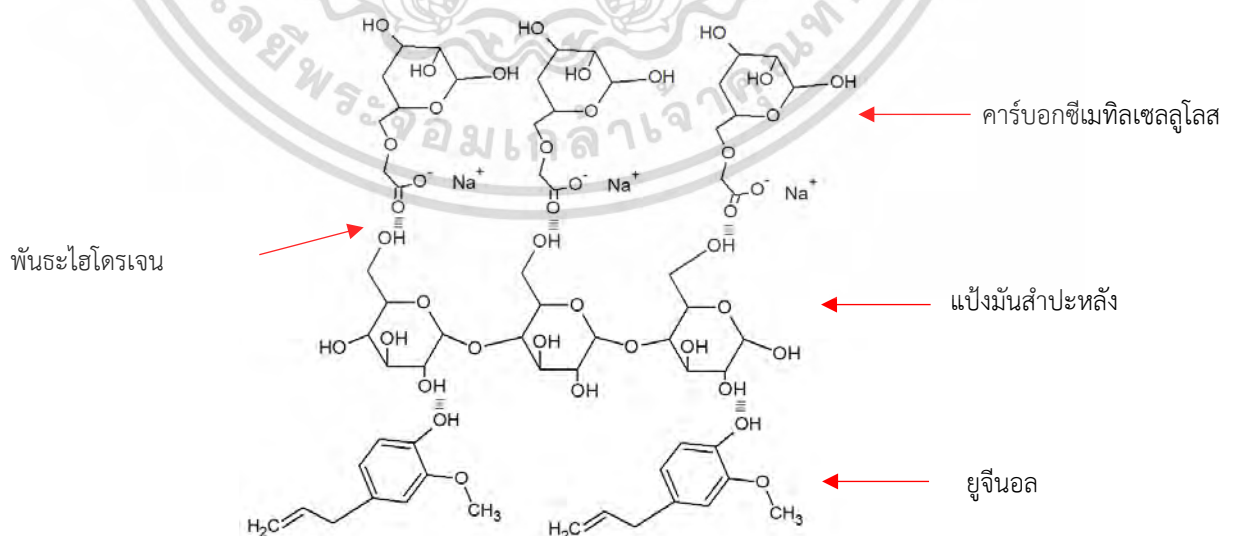
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานและการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เกิดพันธะไฮโดรเจน โดยอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1(ก) โดย Almasi H. รายงานว่าหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน [39-41] ถึงแม้ Sun Q. รายงานว่าอาจเกิดพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง เนื่องจากการใช้ความร้อนสูงในขั้นตอนการขึ้นรูป [42] แต่ในการศึกษานี้ไม่เกิดพันธะเอสเทอร์เนื่องจากใช้ความร้อนไม่สูงพอ นอกจากนี้ผลจากการเติมยูจีนอลในฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง อาจส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งผ่านพันธะไฮโดรเจน โดยอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจีนอลสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1 (ข) [43]



รูปที่ 4.1 (ก) อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



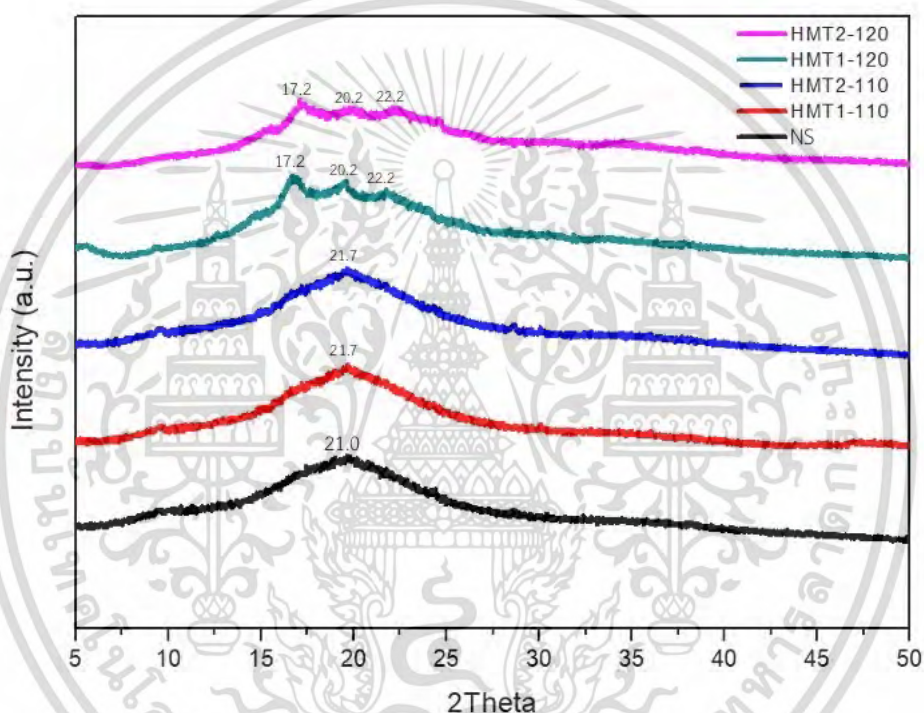
รูปที่ 4.1 (ข) อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้น

4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีใช้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และความชื้น 20% ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้อัตราเร็ว 1°/ นาที ซึ่งขนาดมุมตกกระทบเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ได้พิคทั้งหมด (Net area) คือ $2\theta = 5-50^\circ$ และพื้นที่ที่สนใจศึกษา (Raw area) คือ $2\theta = 10-30^\circ$ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีใช้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีใช้ความร้อนขึ้น

สูตร	ปริมาณผลึก (%) 10-30
NS	18.9
HMT-110-1	20.2
HMT-110-2	24.6
HMT-120-1	27.1
HMT-120-2	25.2

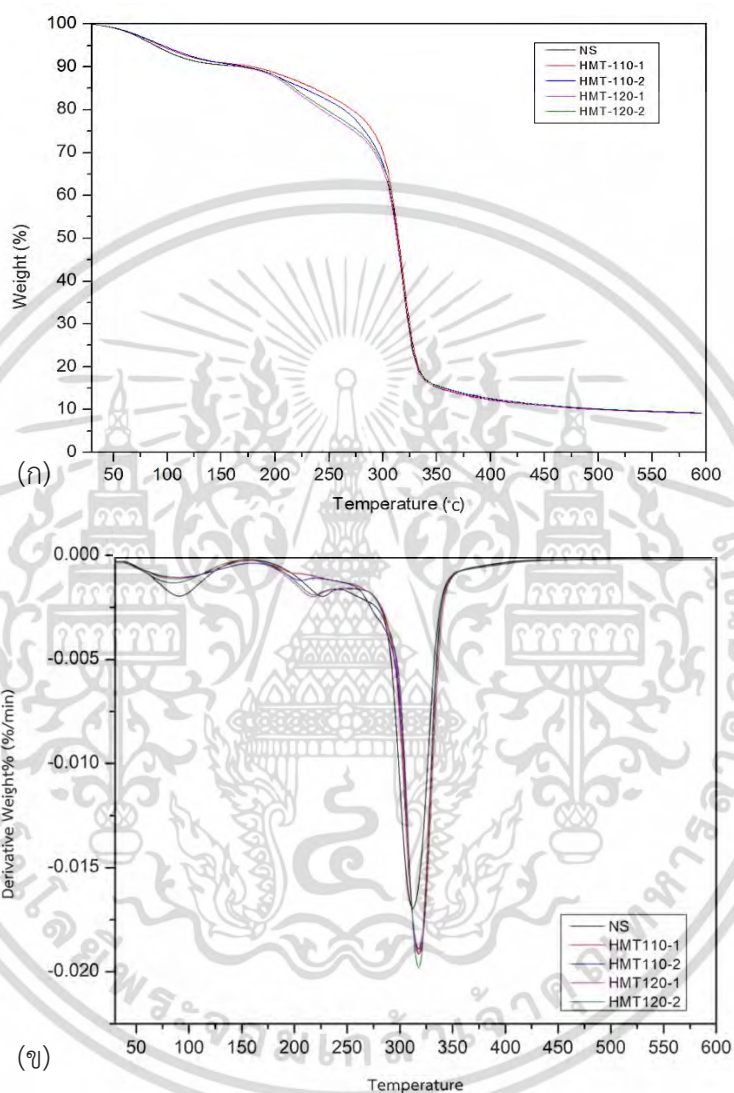
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 และภาคผนวก ก. แสดงดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น พบว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร ปรากฏพีค 20 เท่ากับ 21.0° และมีโครงสร้างผลึกแบบ A เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ได้จากพืชหัว [35] แต่สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อน ปรากฏดิฟแฟรกโทแกรมดังนี้ สูตร HMT-110-1 และ HMT-110-2 พบพีคที่มุม 21.7° และมีโครงสร้างผลึกแบบ A แสดงว่าการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมงไม่ส่งผลให้รูปแบบผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อใช้เวลาในการดัดแปรมากขึ้น พบว่าความเข้มของพีค 21.7° มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาสูตร HMT-120-1 และ HMT-120-2 พบว่ามีพีคที่มุม 20 เท่ากับ 17.2° และมีพีคคู่ (Doublet) ที่มุม 20 เท่ากับ 20.2° และ 22.2° ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B แสดงว่าการดัดแปรที่อุณหภูมิ 120°C ทำให้รูปแบบผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง จากโครงสร้างผลึกแบบ A เป็นโครงสร้างผลึกแบบ B เนื่องจากการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gunaratne A. et al. ที่ศึกษาผลของการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อฟิล์มแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันพบว่า ที่อุณหภูมิการดัดแปรที่เท่ากัน โครงสร้างผลึกแบบ A เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกแบบ B และเมื่อเวลาในการดัดแปรมากขึ้นส่งผลให้ความเข้มของพีคมากขึ้น [29]

จากตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังพบว่า ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการดัดแปรโดยการใช้น้ำร้อนขึ้น โดยการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C พบว่าปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น และปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดัดแปรมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีเวลาในการจัดเรียงตัวมากขึ้น [29] เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการดัดแปร พบว่าการดัดแปรที่อุณหภูมิ 110°C ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการดัดแปรที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งมีการศึกษาว่าการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลึกอย่างมีนัยสำคัญ [29] นอกจากนี้ พบว่าชิ้นงานสูตร HMT-120-1 มีปริมาณความเป็นผลึกมากที่สุด คือ 27.1% เนื่องจากเมื่อแป้งมันสำปะหลังได้รับการดัดแปร ความร้อนทำให้สายโซ่โมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการดัดแปรมากขึ้นตามสูตร HMT-120-2 มีปริมาณความเป็นผลึกลดลง คาดว่าเกิดจากเวลาในการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนนานเกินไป ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลอาจเกิดการสลายตัว ปริมาณผลึกจึงลดลง

4.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอุณหภูมิ 30-600°C และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10°C / นาที



รูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

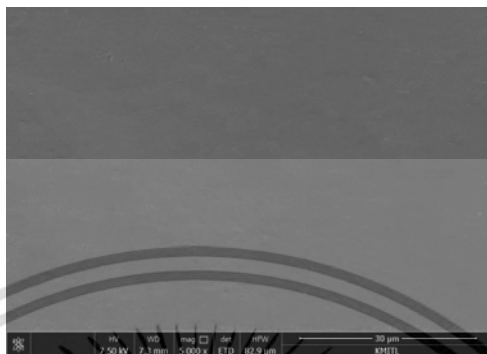
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิในการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชั้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)			น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	
Native	81.33	207.50	315.84	79.33
HMT-110-1	89.00	217.35	317.15	77.36
HMT-110-2	89.50	217.68	318.17	72.84
HMT-120-1	85.33	219.82	320.41	68.82
HMT-120-2	85.83	205.25	318.67	70.10

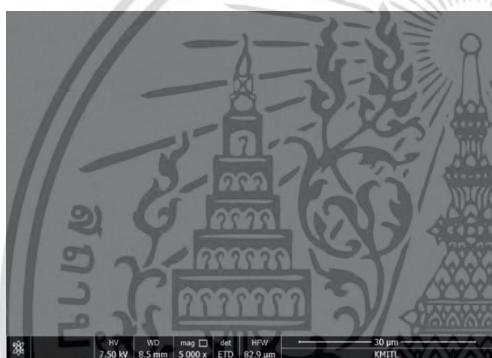
รูปที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ข. แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น จากผลการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวได้ทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 $80 - 90^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลน้ำ ช่วงที่ 2 $190 - 220^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอล และช่วงที่ 3 $310 - 320^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้ง โดยฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้งสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และการดัดแปรที่อุณหภูมิสูง คือ ที่อุณหภูมิ 120°C ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้งสูงกว่าการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่ำ คือ ที่อุณหภูมิ 110°C เนื่องจากปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ XRD ส่งผลให้โครงสร้างภายในโมเลกุลแป้งที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น ต้องใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น

4.1.3 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ผ่านตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



(ก) Native, 5000X



(ข) HMT-110-1, 5000X



(ค) HMT-110-2, 5000X



(ง) HMT-120-1, 5000X



(จ) HMT-120-2, 5000X

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานฟิล์มจากแบ่งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อน (ก) NS (ข) HMT-110-1 (ค) HMT-110-2 (ง) HMT-120-1 และ (จ) HMT-120-

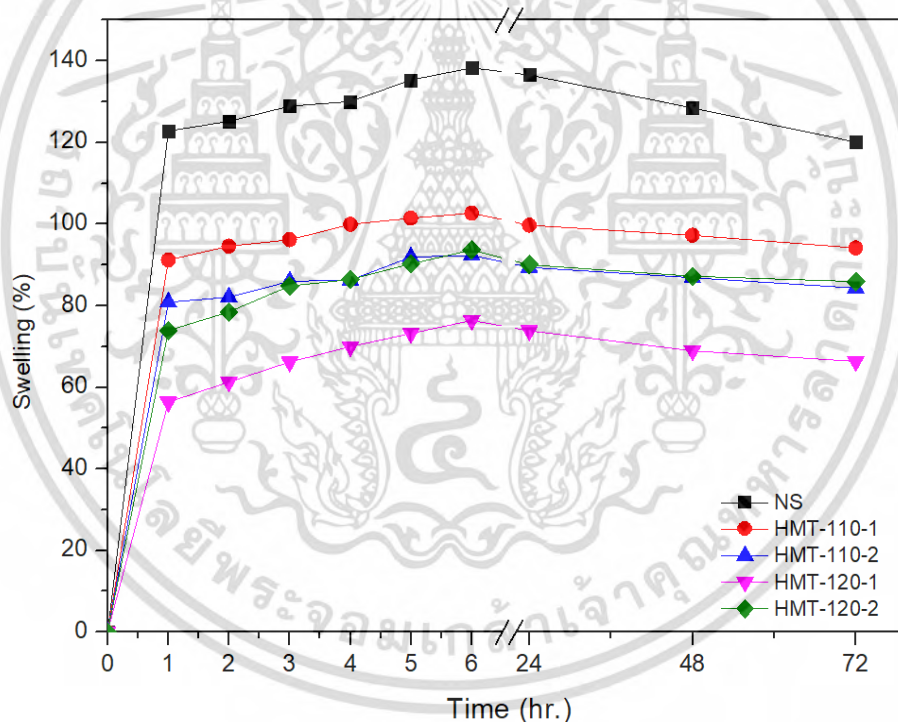
2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทั้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและผ่านการตัดแปรรูปโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป รูปที่ 4.4 (ก) และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรูป รูปที่ 4.4 (ข)-(จ) มีภาคตัดขวางที่เรียบ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปมีการใช้อุณหภูมิสูง และมีการใช้กลีเซอรอลที่เพียงพอ ส่งผลให้ส่วนอสังฐานและส่วนของผลึกในเม็ดแป้งพองตัวและแตกออกพร้อมกัน จึงไม่เห็นเม็ดแป้งหลงเหลืออยู่

4.1.4 การบวมตัว (Swelling)

การทดสอบสมบัติการบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรูปโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และความชื้น 20% ทำได้โดยการนำชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังมาแช่น้ำเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้



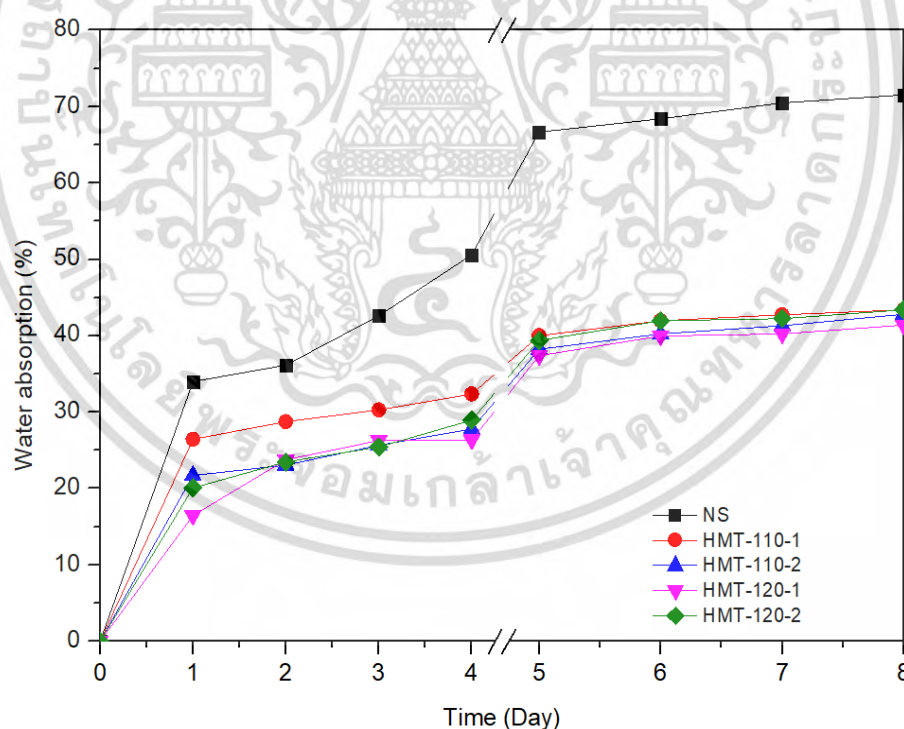
รูปที่ 4.5 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรูปโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 และภาคผนวก ง. แสดงการบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทั้งที่ผ่านการตัดแปรรูปและไม่ผ่านการตัดแปรรูปโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่างกันพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทุกสูตรมีการบวมตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบมากขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ ชิ้นงานมีการบวมตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งอัตราเร็วในการบวมตัวมีแนวโน้มช้าลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเข้าสู่ช่วงโม่ถัดไป และฟิล์มแข็งดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นทุกสภาวะเริ่มเกิดการละลายเมื่อทำการทดสอบครบ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าขึ้นงานสูตร NS มีการบวมตัวมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของแข็งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่แสดงถึงควมมีขั้วอยู่จำนวนมาก ส่งผลให้แข็งมีสมบัติความชอบน้ำสูงและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ แต่ขึ้นงานสูตร HMT-120-1 มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นสูตรที่มีปริมาณความเป็นผลึกมากที่สุด แสดงว่าภายในขึ้นงานมีการจัดเรียงสายโซ่กันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งจะไปขัดขวางการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำที่เข้ามาในโครงสร้างได้มาก ซึ่งสอดคล้องกับ Li *et al.* ที่ศึกษาการดัดแปรแข็งด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงพบว่าแข็งที่ผ่านการดัดแปรมีการบวมตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแข็งที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากแข็งเริ่มบวมตัวในส่วนอสัณฐานก่อนเพราะเป็นส่วนที่สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่าย แต่การดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลใหม่ ซึ่งเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้ส่วนอสัณฐานมีลดลง การบวมตัวของแข็งจึงลดลง [44]

4.1.5 การดูดซับความชื้น (Water absorption)

การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 และภาคผนวก จ. แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น จากการทดสอบพบว่า ขึ้นงานของฟิล์มแป้งมัน

สำหรับหลังจากการดัดแปรทุกสภาวะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรกของการทดสอบ หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มช้าลงและเริ่มคงที่ เนื่องจากชั้นงานฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่แสดงถึงความเป็นขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ เมื่อโครงสร้างแบ่งดูดซับความชื้นจนอิ่มตัว จึงไม่สามารถดูดซับความชื้นเพิ่มได้อีก ค่าการดูดซับความชื้นจึงเริ่มคงที่เมื่อการทดสอบผ่านไประยะหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาฟิล์มแบ่งที่ผ่านการดัดแปรโดยความร้อนขึ้นพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีค่าลดลง โดยชั้นงานสูตร NS มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมากที่สุด แต่สำหรับชั้นงานสูตร HMT-120-1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นน้อยที่สุด เนื่องจากมีปริมาณความเป็นผลึกมาก แสดงว่าภายในโครงสร้างแบ่งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ทำให้ความชื้นแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ยากขึ้น [39] ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบการบวมตัวและปริมาณผลึก โดย Chung *et al.* ศึกษาการดัดแปรแบ่งด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รายงานว่าการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นส่งผลให้ชั้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากการดัดแปรทำให้สายโซ่ภายในโมเลกุลแบ่งจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบ และส่วนที่เป็นระเบียบอยู่แล้วเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกในเม็ดแบ่งมีค่าสูงขึ้น จึงป้องกันการแทรกซึมของความชื้นได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นงานที่ไม่ผ่านการดัดแปร [45]

4.1.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)

การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น

สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม·มิลลิเมตร/ตารางเมตร·วัน·กิโลปาสกาล)
NS	12.65
HMT-110-1	12.38
HMT-110-2	11.94
HMT-120-1	10.98
HMT-120-2	11.15

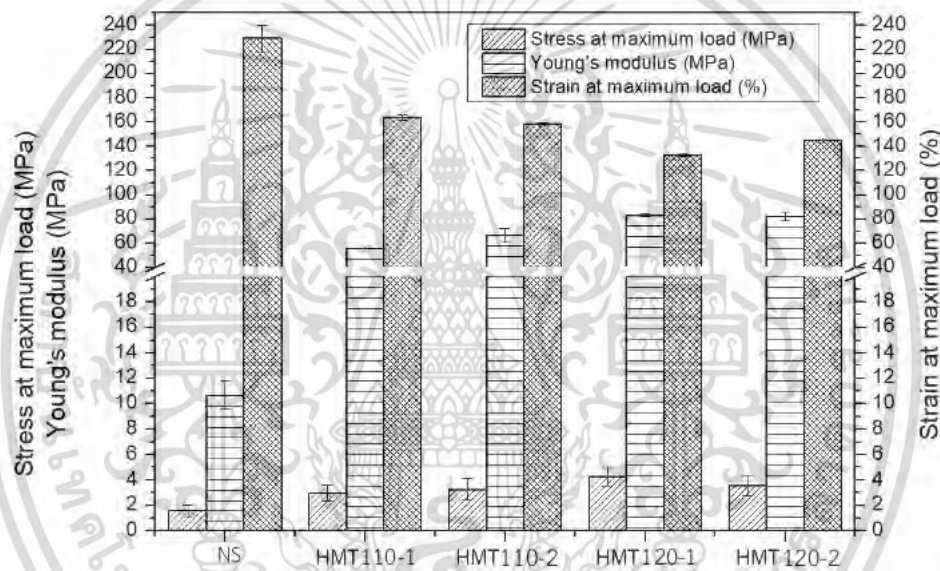
จากตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังพบว่า ฟิล์มแบ่งที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นทุกสูตร มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มแบ่งที่ไม่ผ่านการดัดแปรเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้นมีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของฟิล์มแบ่งมันสำหรับหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นแสดงว่าภายในโครงสร้างแบ่งเกิดการจัดเรียงตัวและปริมาณผลึกมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง และชั้นงานสูตรที่มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดคือ HMT-120-1 เพราะมีปริมาณความเป็นผลึก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัว ปริมาณผลึก และเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น เนื่องจากการเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสายโซ่ในโมเลกุลแบ่งไปขัดขวางการแทรกตัวของน้ำหรือความชื้นที่จะเข้ามาในโครงสร้างแบ่ง [44, 45] สอดคล้องกับการทดลองของ Indrianti *et al.* ที่พบว่า การดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง เนื่องจากการดัดแปรนี้ส่งผลให้ชิ้นงานมีปริมาณผลึกมากขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างภายในโมเลกุลแบ่งลดลง การถ่ายเทความชื้นของชิ้นงานจึงลดลง [46]

4.1.7 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สถานะต่าง ๆ

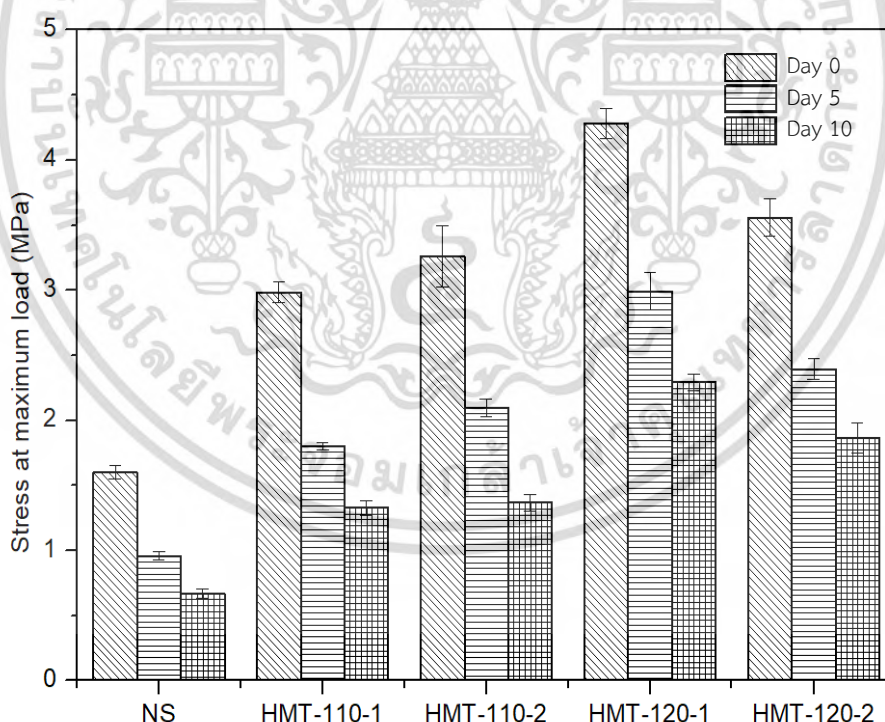
จากรูปที่ 4.7 และภาคผนวก ฉ. แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น จากการทดสอบพบว่า ชิ้นงานสูตร NS มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสต่ำที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้แป้งมีความชอบน้ำ และสามารถดูดซับความชื้นเก็บไว้ในโครงสร้างได้มาก โดยความชื้นที่เข้าไปในโครงสร้างทำหน้าที่เหมือนพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้แป้งมีความแข็งแรงน้อยและสามารถดึงยืดได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลแบ่งจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีปริมาณผลึกมากขึ้น ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาชิ้นงานสูตร HMT-120-1 พบว่ามีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสสูงที่สุด แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัว ปริมาณผลึก และเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

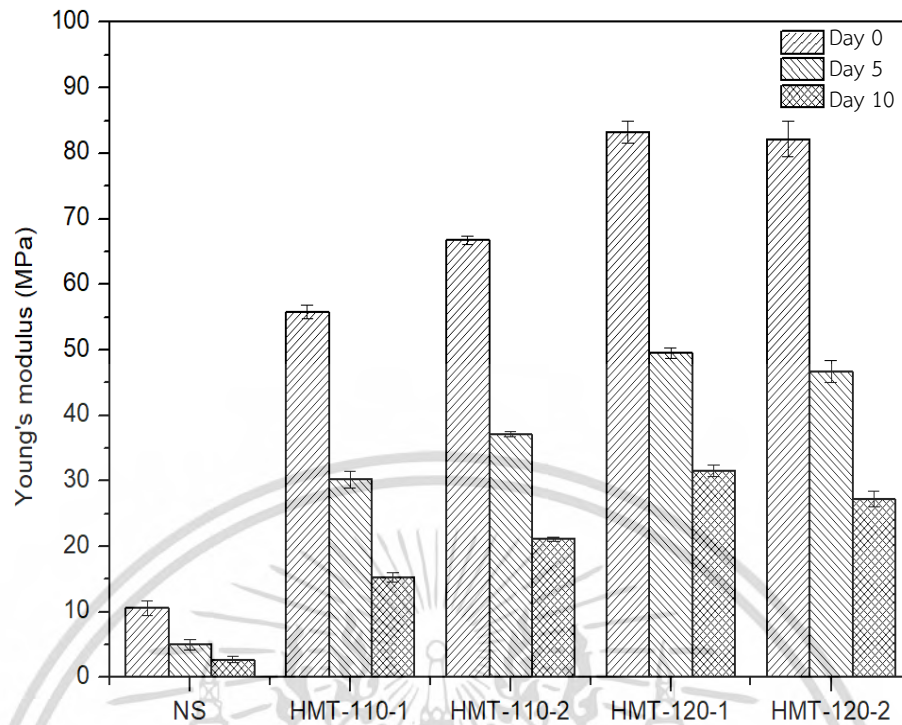
การดัดยัด ณ จุดขาดต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ XRD ที่ชิ้นงานสูตร HMT-120-1 มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากที่สุด สาเหตุจากสายโซ่โมเลกุลในโครงสร้างแข็งจัดเรียงตัวเป็นระเบียบอย่างหนาแน่น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความชื้นน้อยจึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาดต่ำ จากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบอย่างหนาแน่น จึงสามารถรับแรงได้มาก ส่งผลให้มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสสูง ซึ่งตรงกับผลการศึกษาของ Majzoubi et al. ที่ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น 120°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าการดัดแปรด้วยวิธีนี้เพิ่มปริมาณความเป็นผลึกของชิ้นงาน จึงส่งผลให้ค่าความความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีค่าสูงขึ้น [47] จากผลของสัณฐานวิทยาของฟิล์มพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ มีภาคตัดขวางที่เรียบไม่แตกต่างกัน

4.1.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

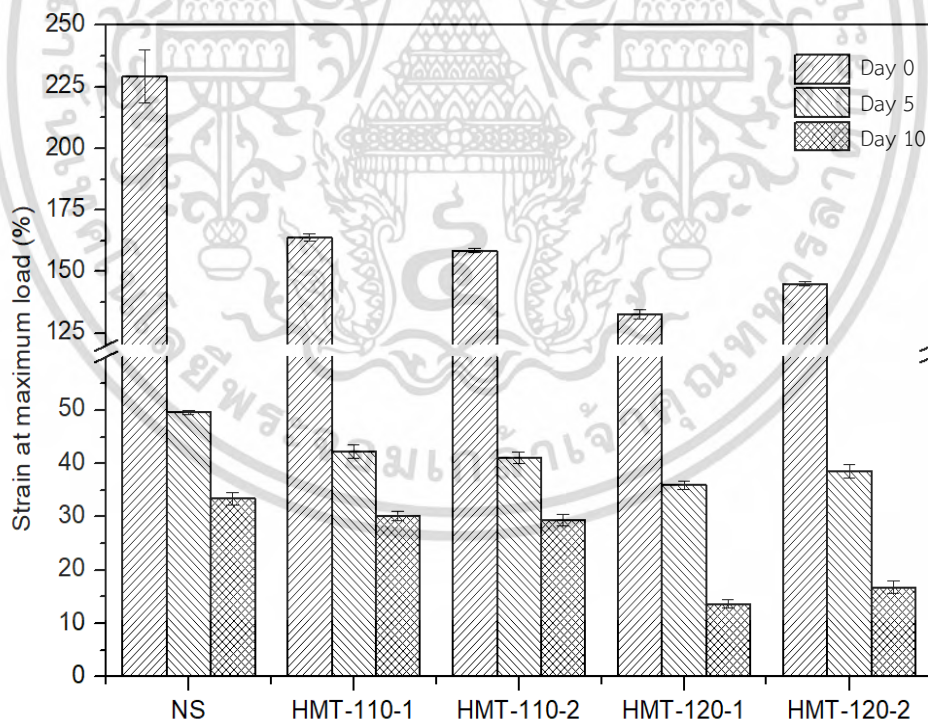
วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อน ที่มีการฝังดินที่ความชื้น 5-10% เป็นเวลา 5 และ 10 วันซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.8 ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.9 ค่ามอดูลัสของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาดต่ำของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ภายหลังจากผึ่งดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยืด	ความ แข็งแรงดึง	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยืด
NS	40.20	52.20	78.40	58.24	85.42	74.59
HMT-110-1	39.60	45.84	74.21	55.52	81.63	72.51
HMT-110-2	35.66	44.41	74.09	49.83	81.49	68.38
HMT-120-1	30.12	40.45	72.94	46.54	89.69	62.09
HMT-120-2	32.72	43.13	73.39	47.55	88.42	66.89

รูปที่ 4.8-4.10 และภาคผนวก ฉ. แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ภายหลังจากการผึ่งดินเป็นเวลา 5 และ 10 วัน พบว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ (ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด) มีค่าลดลงภายหลังจากการผึ่งดิน และอัตราการลดลงมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการผึ่งดินมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่าชิ้นงานจากฟิล์มสูตรที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (NS) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลภายหลังจากการผึ่งดินมากกว่าชิ้นงานจากฟิล์มสูตรที่ผ่านการดัดแปรในทุกช่วงเวลาการทดสอบ เนื่องจากโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากจึงส่งผลให้มีความเป็นขั้วสูง ทำให้มีสมบัติการชอบน้ำสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้มากทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส สายโซ่โมเลกุลของแป้งสั้นลงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น สมบัติเชิงกลต่าง ๆ จึงลดลงหลังการทดสอบ แต่เมื่อแป้งผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนส่งผลให้โครงสร้างภายในโมเลกุลแป้งมีปริมาณความเป็นผลึกมากขึ้นทำให้โมเลกุลน้ำและความชื้นแทรกซึมเข้าในโมเลกุลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังยากขึ้นการดูดซับน้ำและความชื้นจากดินจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้น ที่ชิ้นงานที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการดัดแปร ทำให้การย่อยสลายเกิดได้ช้าลง

จากการศึกษาในตอนที 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของสภาวะในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการใช้ความร้อน พบว่าการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนในทุกสภาวะ ส่งผลให้ชิ้นงานมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ความสามารถทนต่อความร้อนมากขึ้น สมบัติเชิงกลดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนในทุกสภาวะ ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าการบวมตัว การดูดซับไอน้ำ และการซึมผ่านไอน้ำลดลง โดยการดัดแปรที่สภาวะ 120°C เวลา 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาต่อ

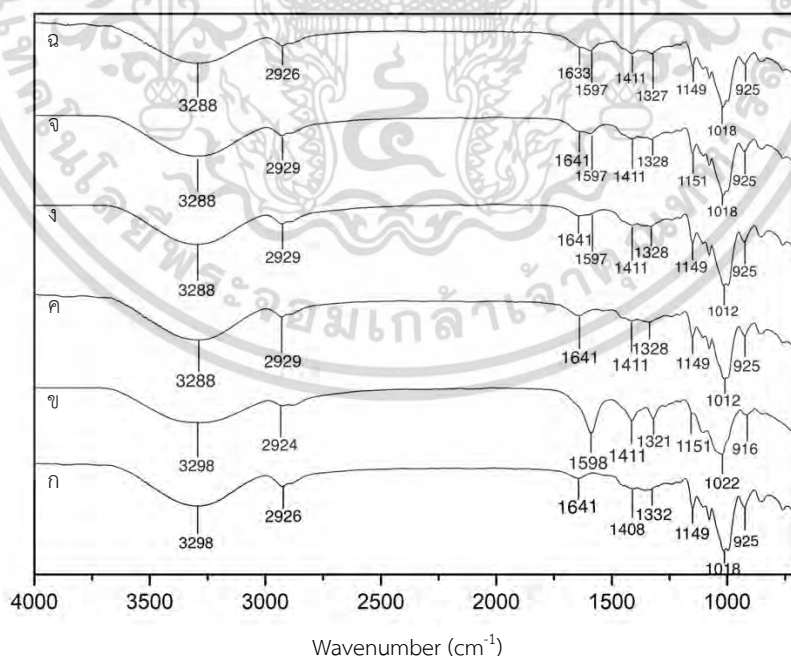
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ

จากผลการศึกษาในตอนต้นที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของสภาวะในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง โดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และความชื้น 20% พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (HMT-120-1) มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อในตอนต้นที่ 2 เนื่องจากมีสมบัติการบวมตัว และการดูดซับความชื้นต่ำ นอกจากนี้ HMT-120-1 เป็นสูตรที่มีความแข็งแรง และทนทานต่อความร้อนสูงที่สุด ตอนต้นที่ 2 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อลดสมบัติการบวมตัว การดูดซับความชื้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และเพิ่มความแข็งแรง

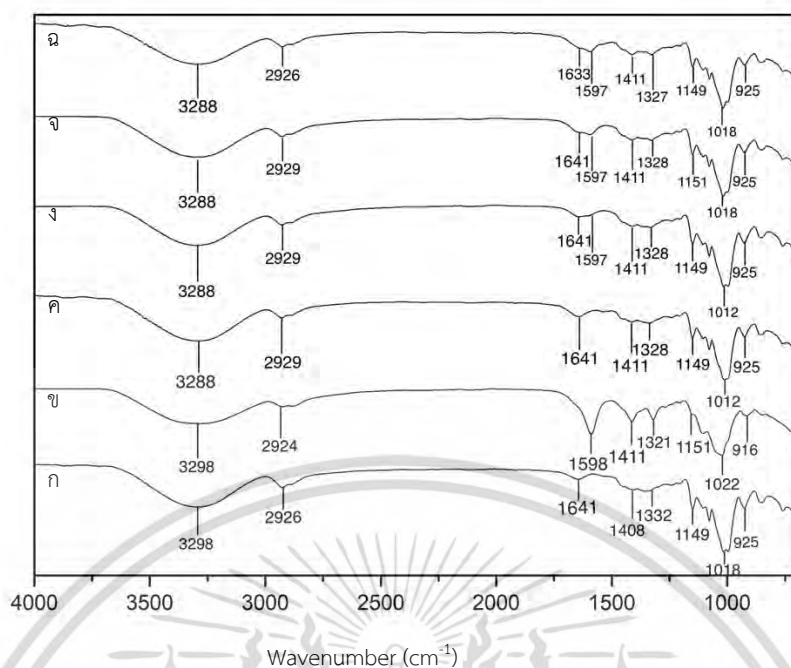
4.2.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total reflectance, ATR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค ATR ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยการใชความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS (ข) CMC (ค) NS-5%CMC (ง) NS-10%CMC (จ) NS-15%CMC และ (ฉ) NS-20%CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้น ที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) HMT 120-1 (ข) CMC (ค) HMT 120-1-5%CMC (ง) HMT 120-1-10%CMC (จ) HMT 120-1-15%CMC และ (ฉ) HMT 120-1-20%CMC

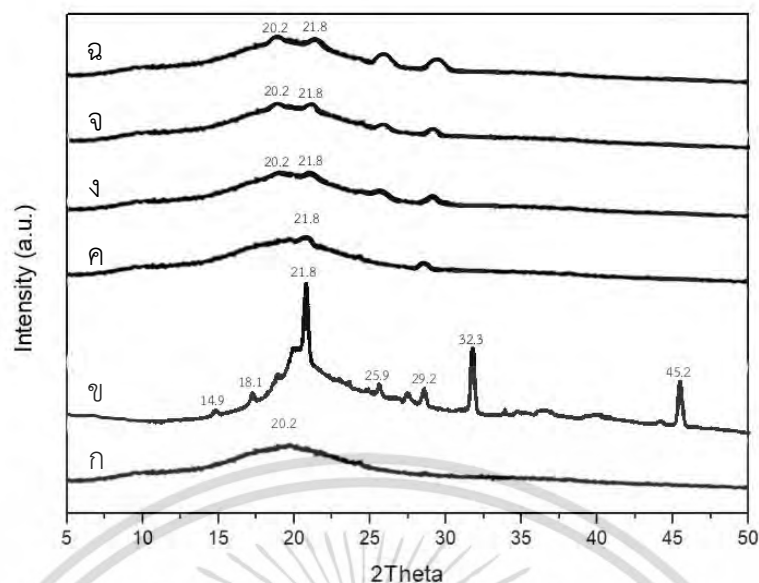
จากรูปที่ 4.11 - 4.12 และภาคผนวก ค. แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทุกตัวอย่าง มีลักษณะคล้ายคลึงกันซึ่งมีลักษณะตามโครงสร้างของแป้ง ดังนี้ พีคที่ความยาวคลื่นช่วง $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พีคที่ช่วงความยาวคลื่น $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ CH_3 ของแป้ง พีคบริเวณ $1628-1609\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในแป้ง พีคช่วง $1425-1485\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่น O-H bending ของแป้ง พีคที่มีความยาวคลื่น $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง พีคในช่วง $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-H bending และพีคช่วง $800-900\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending [19]

เมื่อใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสเปกตรัมเกิดความเปลี่ยนแปลงโดยฟิล์มที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีพีค O-H stretching ที่ช่วงความยาวคลื่น $3480-3440\text{ cm}^{-1}$ พีคที่ช่วงความยาวคลื่น 2919 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C-H stretching และพีคเอกลักษณ์ของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส คือ ที่ความยาวคลื่น 1597 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของกลุ่ม COO- stretching นอกจากนี้พบความยาวคลื่น $3400-3000\text{ cm}^{-1}$ เคลื่อนไปที่ความยาวคลื่นลดลงแสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่

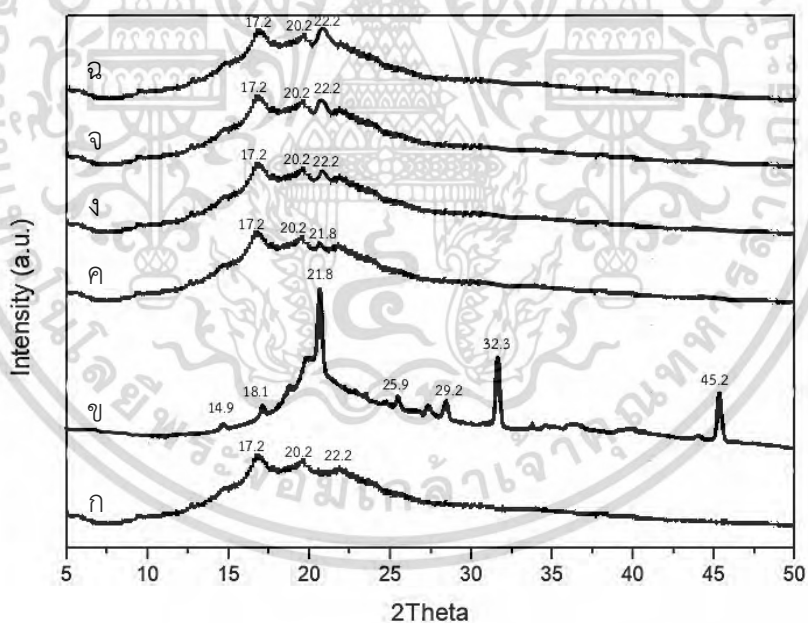
โดย Almasi H. *et al.* [39] Wilpiszewska K. *et al.* [40] และ Jiang G. *et al.* [41] รายงานว่าหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน Cagnin C. *et al.* ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รายงานว่าการเกิดขึ้นของพันธะไฮโดรเจนทำให้พีคในช่วง $3500-3100\text{ cm}^{-1}$ เคลื่อนไปที่ความยาวคลื่นลดลง [48]

4.2.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.13 – 4.14 และภาคผนวก ก แสดงดิฟแฟรแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน พบว่าเมื่อใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสพบพีคใหม่ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.8° 32.3° และ 45.2° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [34] โดยความเข้มของพีคดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามลำดับจากตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณผลึกในช่วงมุม $2\theta\ 10^\circ - 30^\circ$ พบว่าเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น ปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลง โดยฟิล์มแป้งสูตร HMT120-1 ที่ไม่มีการใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีปริมาณผลึกสูงสุด ในขณะที่ฟิล์มแป้งสูตร HMT120-1-20%CMC ซึ่งมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลมากที่สุดมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้ง เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้ง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.1 (ก.) แสดงอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง และเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ปริมาณความเป็นผลึกของแป้งจึงลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับ Tavares K. *et al.* ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณต่าง ๆ รายงานว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเกิดเป็นพันธะพันธะไฮโดรเจนและไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลในเม็ดแป้ง จึงส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง [49]



รูปที่ 4.13 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่ผ่านการตัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS (ข) CMC (ค) NS-5%CMC (ง) NS-10%CMC (จ) NS-15%CMC และ (ฉ) NS-20%CMC



รูปที่ 4.14 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนและเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ก) HMT 120-1 (ข) CMC (ค) HMT 120-1-5%CMC (ง) HMT 120-1-10%CMC (จ) HMT 120-1-15%CMC และ (ฉ) HMT 120-1-20%CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

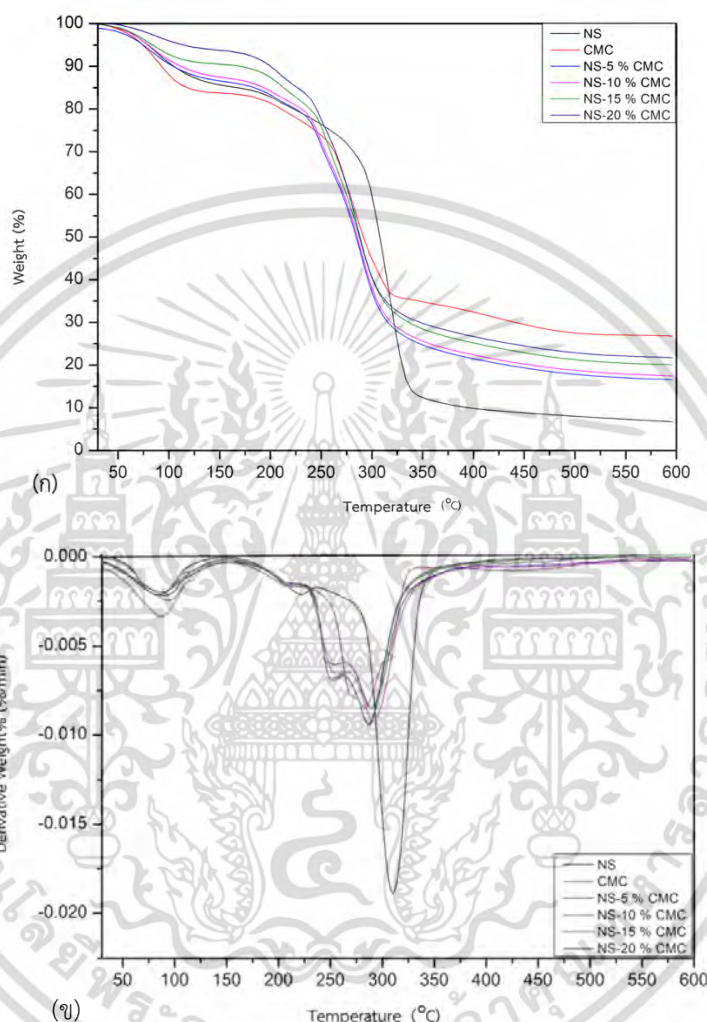
ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

สูตร	ปริมาณผลึก (%) 10-30
NS	18.9
CMC	40.7
NS-5%CMC	18.1
NS-10%CMC	17.5
NS-15%CMC	16.8
NS-20%CMC	15.7
HMT-120-1	27.1
HMT-120-1-5%CMC	25.9
HMT-120-1-10%CMC	25.2
HMT-120-1-15%CMC	24.8
HMT-120-1-20%CMC	23.7

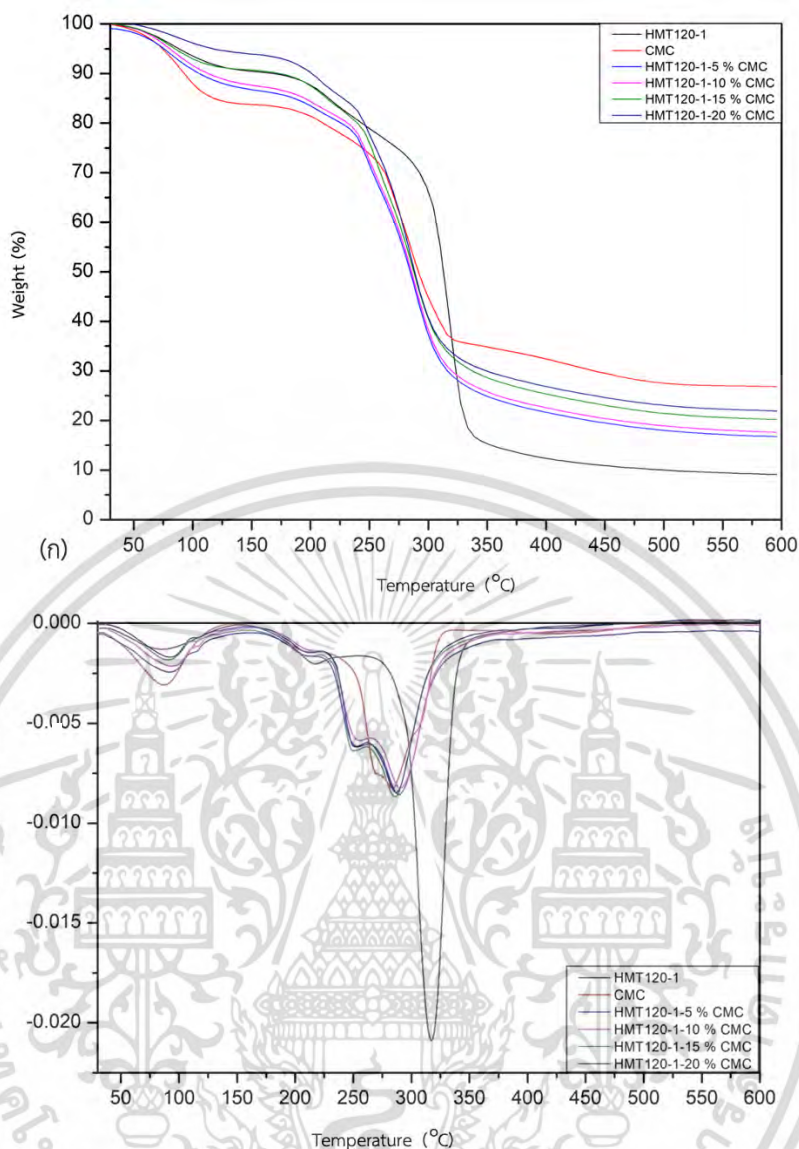
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และใส่เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)				น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส)	ช่วงที่ 4 (แป้ง)	
NS	81.33	207.50	-	315.84	79.33
CMC	95.82	205.83	282.32	-	67.74
NS-5%CMC	93.08	200.58	260.45	293.04	79.67
NS-10%CMC	97.45	199.56	258.52	290.68	78.92
NS-15%CMC	95.48	206.25	250.64	287.44	76.89
NS-20%CMC	95.92	210.38	249.77	285.96	75.78
HMT-120-1	85.33	199.82	-	320.41	68.82
HMT-120-1-5%CMC	90.84	207.25	264.56	300.85	74.58
HMT-120-1-10%CMC	88.50	215.97	262.83	298.46	72.94
HMT-120-1-15%CMC	89.83	216.98	259.77	298.20	70.09
HMT-120-1-20%CMC	89.03	217.87	254.90	297.86	69.54

จากรูปที่ 4.15 – 4.16 ตารางที่ 4.7 และภาคผนวก ข. แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งอุณหภูมิการสลายตัวได้ทั้งหมด 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 $81-95^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลน้ำ ช่วงที่ 2 $199-217^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ กลีเซอรอล ช่วงที่ 3 $249-264^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [45] และช่วงที่ 4 $285-314^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแป้ง โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยฟิล์มแป้งสูตร HMT120-1-20%CMC มีการสลายตัวทางความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากสูตร HMT120-1-20%CMC เป็นสูตรที่มีปริมาณผลึกต่ำที่สุดจึงสามารถทนทานต่อความร้อนได้ต่ำส่งผลให้สลายตัวทางความร้อนต่ำที่สุด โดย Suriyatem *et al.* ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้ความทนทานทางความร้อนของชิ้นงานลดลง เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความหนืดสูงจึงเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในเม็ดแป้ง จึงทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง ส่งผลให้

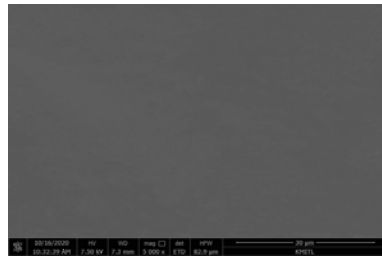
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความทนทานทางความร้อนของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย [50] นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากผลของปริมาณผลึกตารางที่ 4.6 ชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นทุกสูตรมีปริมาณผลึกที่มากกว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร จึงสามารถทนทานต่อความร้อนได้มากกว่าส่งผลให้มีการสลายตัวทางความร้อนต่ำ

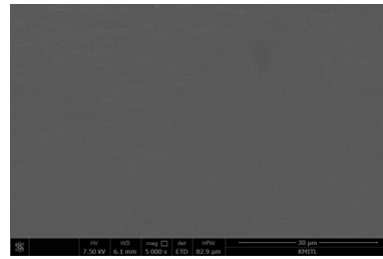
4.2.4 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

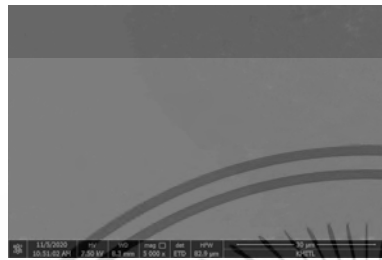
จากรูปที่ 4.17 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 4.17 (ก) และ (ง)) ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและไม่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (รูปที่ 4.14 (ข)-(จ) และ (ช)-(ญ)) มีภาคตัดขวางที่เรียบ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดย Pelissari et al. ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าภาคตัดขวางของชิ้นงานเรียบ แสดงว่าแป้งกล้วยและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถเข้ากันได้ดี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความคล้ายคลึงกัน [51]



(f) NS



(๑) HMT-120-1



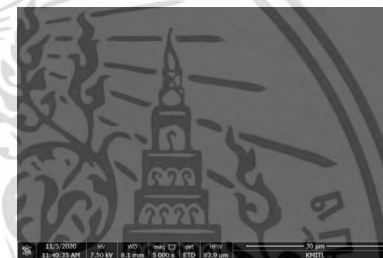
(๗) NS-5%CMC



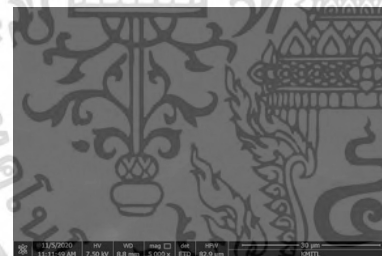
(୫) HMT-120-1-5%CMC



(ค) NS-10%CMC



(၈) HMT-120-1-10%CMC



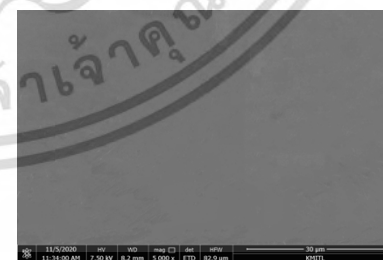
(j) NS-15%CMC



(ឈ) HMT-120-1-15%CMC



(จ) NS-20%CMC



(၅) HMT-120-1-20%CMC

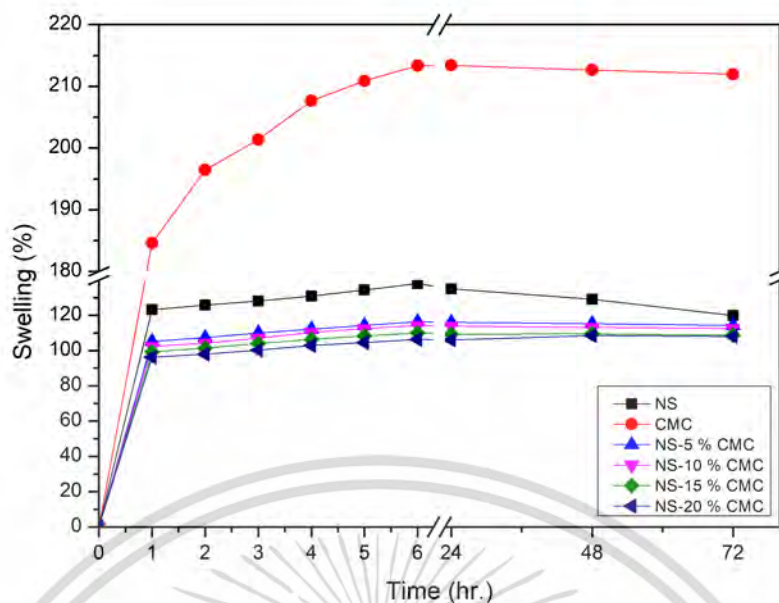
รูปที่ 4.17 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานที่กำลังขยาย 5000 เท่าของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) NS (ข) NS-5%CMC (ค) NS-10%CMC (ง) NS-15%CMC (จ) NS-20%CMC (ฉ) HMT-120-1 (ช) HMT-120-1-5%CMC (ซ) HMT-120-1-10%CMC (ณ) HMT-120-1-15%CMC และ (ญ) HMT-120-1-20%CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

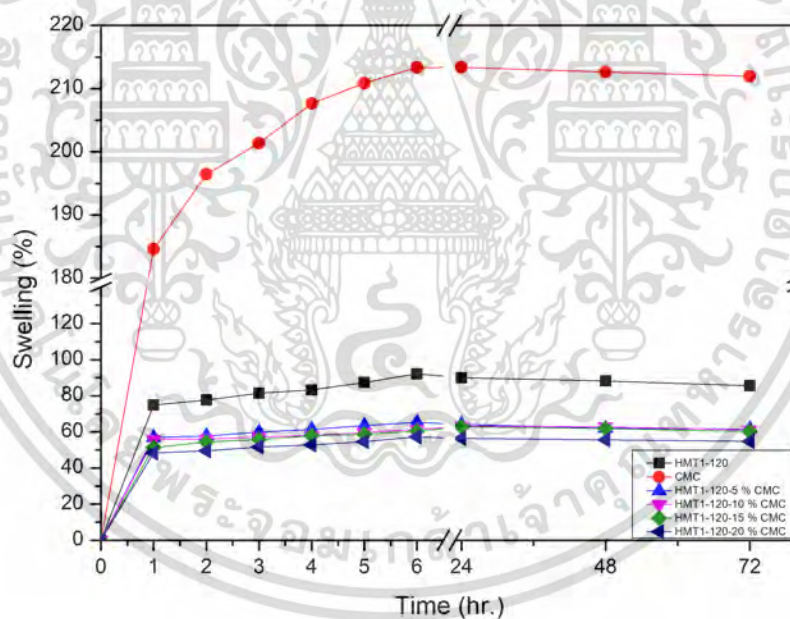
4.2.5 สมบัติการบวมตัว (Swelling)

การทดสอบสมบัติการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

จากรูปที่ 4.18 – 4.19 และภาคผนวก ง. แสดงการบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง พบว่าในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการทดสอบชิ้นงานทุกสูตรมีการบวมตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเข้าสู่การทดสอบในชั่วโมงถัดไปและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทุกสูตรเริ่มเกิดการละลายเมื่อทำการทดสอบครบ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานสูตร CMC มีการบวมตัวมากที่สุด และเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในชิ้นงานมากขึ้น ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำจึงทำให้การบวมตัวของฟิล์มมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leksawasdi et al. ที่ศึกษาการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวโพดและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รายงานว่าหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกิดการเชื่อมโยงเป็นพันธะไฮโดรเจน เมื่อมีการสร้างพันธะมากขึ้นจึงไปขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำทำให้ค่าการบวมตัวลดลง เมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น [52] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนรูปที่ 4.18 และผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน รูปที่ 4.19 ที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทุกสูตรมีค่าการบวมตัวของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณผลึกที่มากกว่าชิ้นงานที่แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร จึงทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าโมเลกุลแป้งได้น้อยกว่า



รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

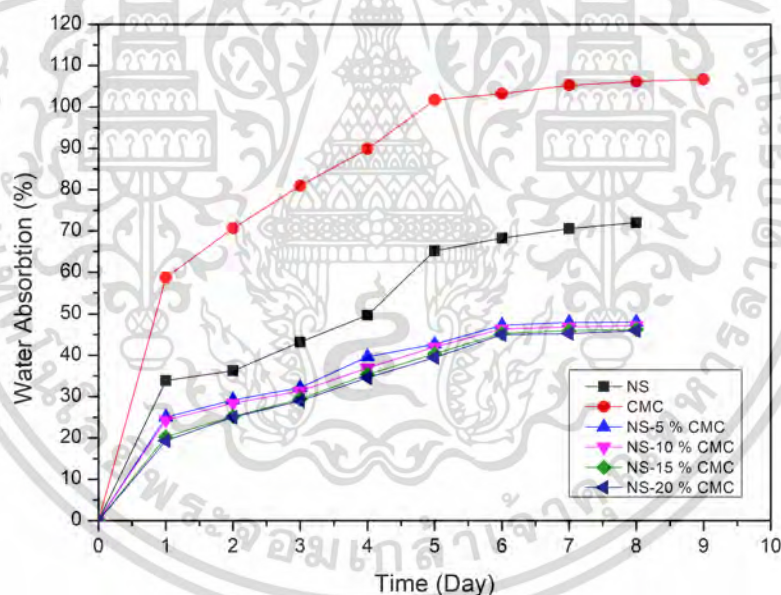


รูปที่ 4.19 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

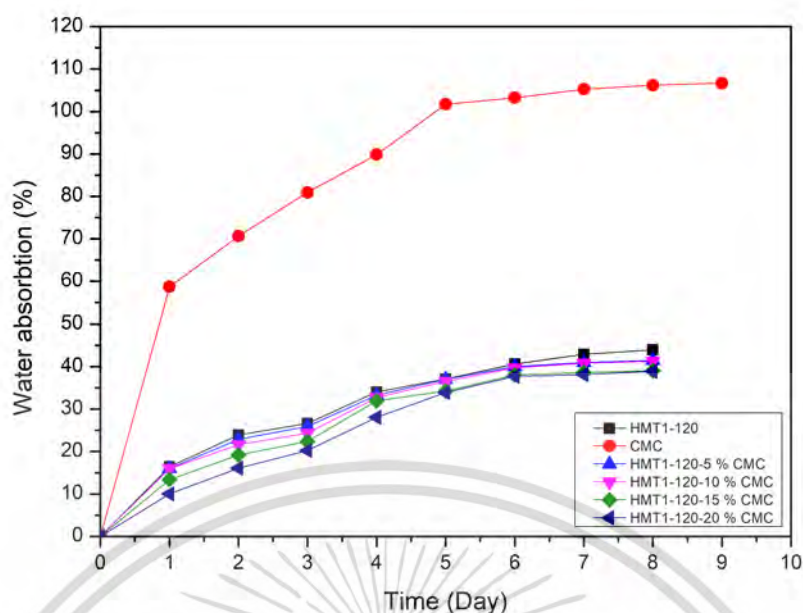
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 การดูดซับความชื้น (Water absorption)

จากรูปที่ 4.20 – 4.21 และภาคผนวก จ. แสดงการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไป นอกจากนี้พบว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นลดลงทั้งในชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และผ่านการดัดแปร และลดลงตามปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงทำให้พันธะไฮโดรเจนมากขึ้น และพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไปขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำ [47] เมื่อพิจารณาชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน รูปที่ 4.20 และผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน รูปที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนทุกสูตรมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.2.5 สมบัติการบวมตัว ดังนั้นฟิล์มสูตร HMT120-1-20%CMC จึงมีค่าการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

4.2.7 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)

จากตารางที่ 4.8 แสดงผลอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าชิ้นงานสูตร CMC มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงสุด แต่เมื่อใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในชิ้นงานพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงทั้งชิ้นงานแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อน เนื่องจากการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายจากปฏิกิริยาของแป้งกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลฟิล์มแป้งสูงขึ้น จึงไปขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ [47] ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงโดยฟิล์มแป้งสูตร HMT120-1-20%CMC มีค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghanbarzadeh et al. ศึกษาฟิล์มแป้งข้าวโพดที่เติมยางธรรมชาติและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำของชิ้นงานลดลง เนื่องจากกลไกการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ขัดขวางการแทรกซึมของไอน้ำ [53] นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น คือเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้นน้ำหรือความชื้นสามารถแทรกซึมเข้าโมเลกุลแป้งได้ลดลง

ตารางที่ 4.8 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม • มิลลิเมตร/ ตารางเมตร • วัน • กิโลปาสกาล)
NS	12.65
CMC	20.68
NS-5%CMC	12.03
NS-10%CMC	11.87
NS-15%CMC	10.59
NS-20%CMC	10.23
HMT-120-1	10.98
HMT-120-1-5%CMC	10.87
HMT-120-1-10%CMC	10.29
HMT-120-1-15%CMC	9.89
HMT-120-1-20%CMC	9.74

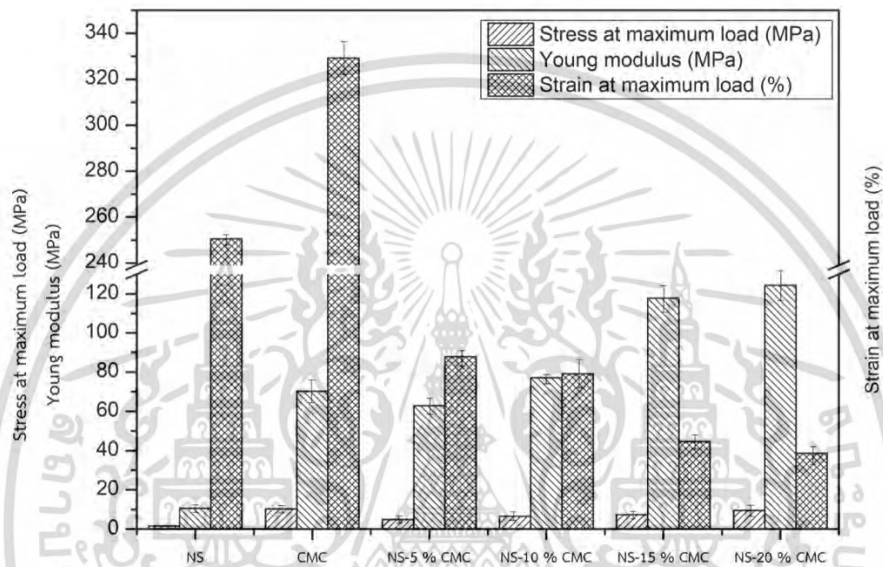
4.2.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

จากรูปที่ 4.22 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านดัดแปรโดยวิธีใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน (NS) มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสต่ำกว่าฟิล์มแป้งสูตรที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่า แต่ฟิล์ม CMC มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสสูง แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำ นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในชิ้นงานมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมากขึ้นตามลำดับ แต่ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสร้างพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4.1) จึงสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li *et al.* ที่ศึกษาฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นส่งเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างชิ้นงาน [54]

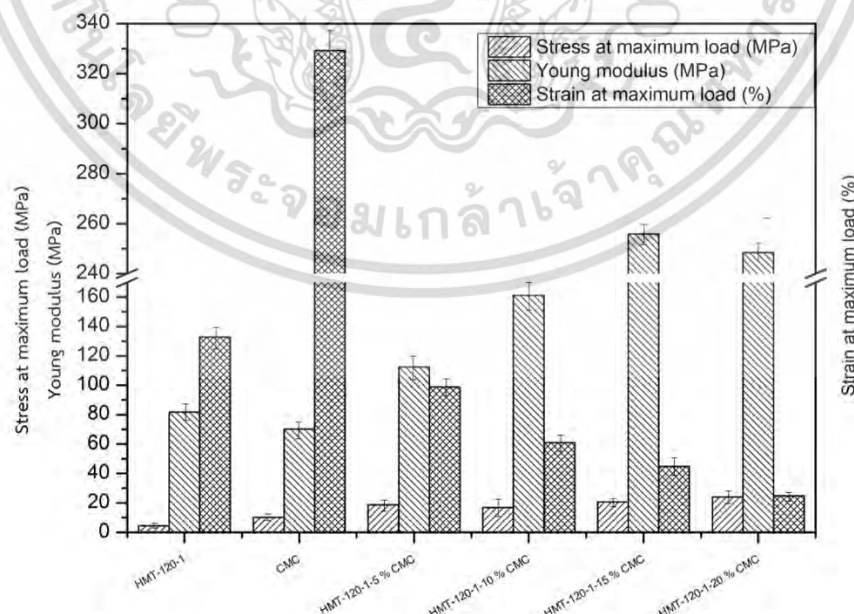
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีใช้ความร้อนขึ้นที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสต่ำกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เนื่องจากชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีค่าปริมาณผลึกที่สูงกว่าจึงสามารถรับแรงได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยฟิล์มแป้งสูตร HMT120-1-20%CMC มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงที่สุด



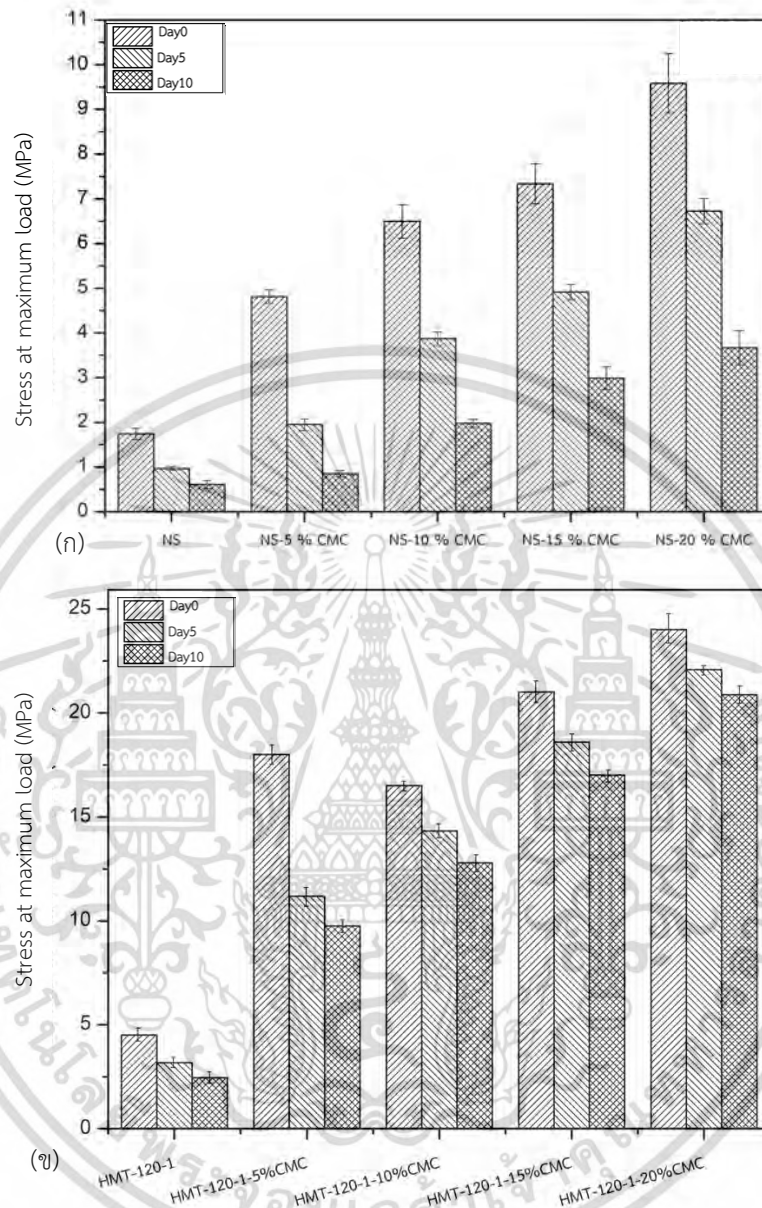
รูปที่ 4.22 ก. สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน



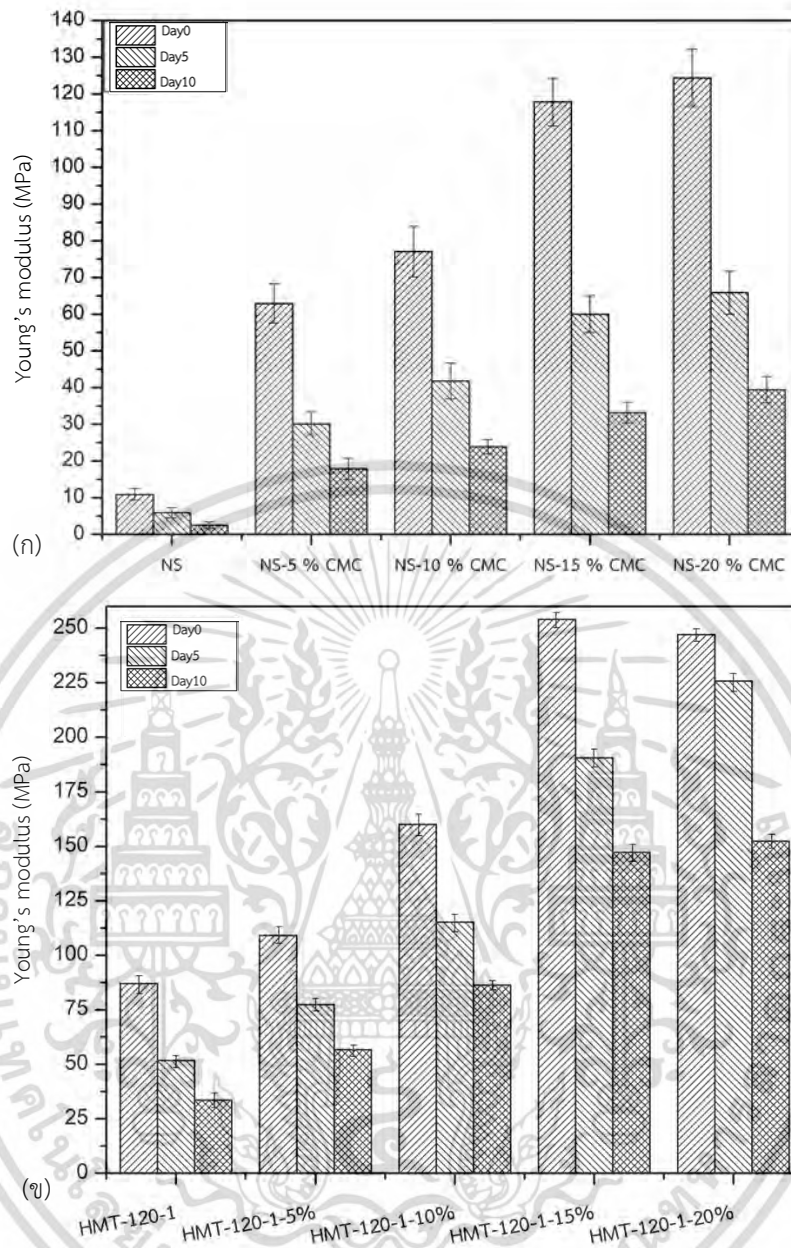
รูปที่ 4.22 ข. สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

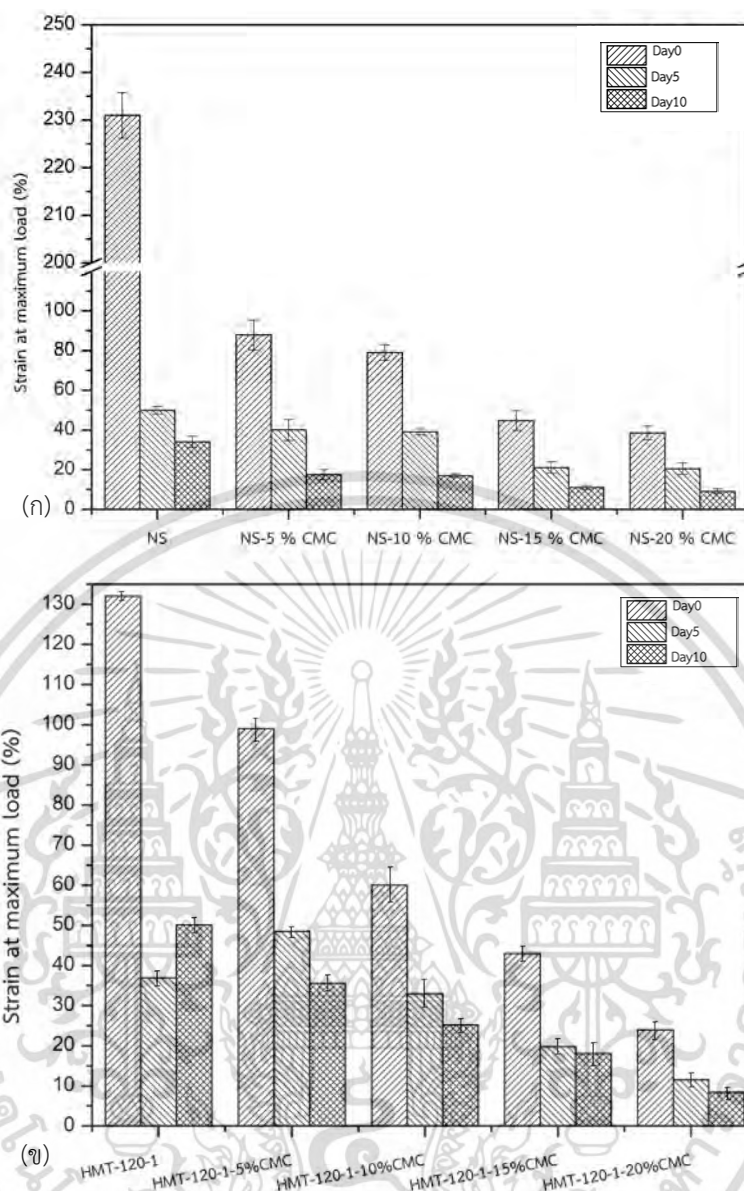
4.2.9 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)



รูปที่ 4.23 ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.24 ค่ามอดุลัสขึ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.25 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (ก) และผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

สูตร	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด
NS	40.20	52.20	78.40	58.24	85.42	74.59
NS-5%CMC	39.49	52.10	54.46	52.34	71.60	70.60
NS-10%CMC	35.43	45.80	50.48	49.52	69.06	69.06
NS-15%CMC	32.93	39.04	48.82	45.24	64.84	65.84
NS-20%CMC	29.76	37.04	46.81	39.70	58.31	58.31
HMT-120-1	30.12	40.45	72.94	46.54	89.69	62.09
HMT-120-1-5%CMC	14.12	29.43	51.81	25.25	48.49	64.72
HMT-120-1-10%CMC	13.66	28.44	45.53	22.79	46.73	58.06
HMT-120-1-15%CMC	11.35	25.47	54.77	19.76	42.54	67.73
HMT-120-1-20%CMC	8.02	24.82	52.88	13.78	40.45	65.59

รูปที่ 4.23 - 4.25 และภาคผนวก ฉ. แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง จากตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังการฝังดิน พบว่าฟิล์มแป้งที่ไม่มีการใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ หลังการฝังดินมากที่สุดในทุกช่วงเวลาของการทดสอบ และเมื่อใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง พบว่าเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากภายในดินมีความชื้นอยู่มาก เมื่อนำชิ้นงานฝังดินส่งผลให้ฟิล์มแป้งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสูงดูดความชื้นไว้มากทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส สายโซ่มอลกุลของแป้งจึงสั่นลงและรับแรงกระทำได้ลดลง แต่เมื่อใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งบางส่วนทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนที่ขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำจากดินและหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมีค่าน้อยกว่าฟิล์มแป้งที่ไม่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการดูดซับความชื้น

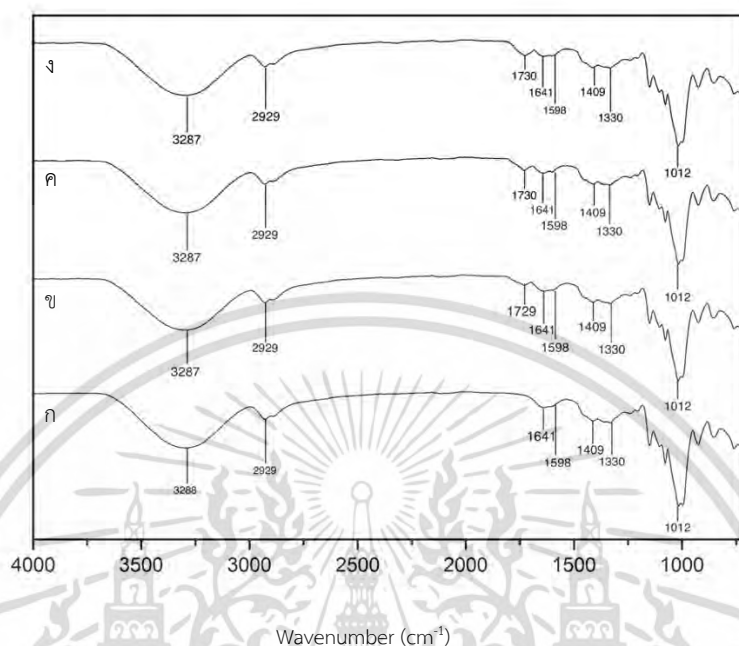
นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นเกิดการลดลงของสมบัติเชิงกลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปร

จากการศึกษา ตอนที่ 4.2 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณผลึก ความทนทานต่อความร้อน การบวมตัว การดูดซับความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำมีค่าลดลง แต่ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมต่อการนำไปศึกษาต่อที่สุด

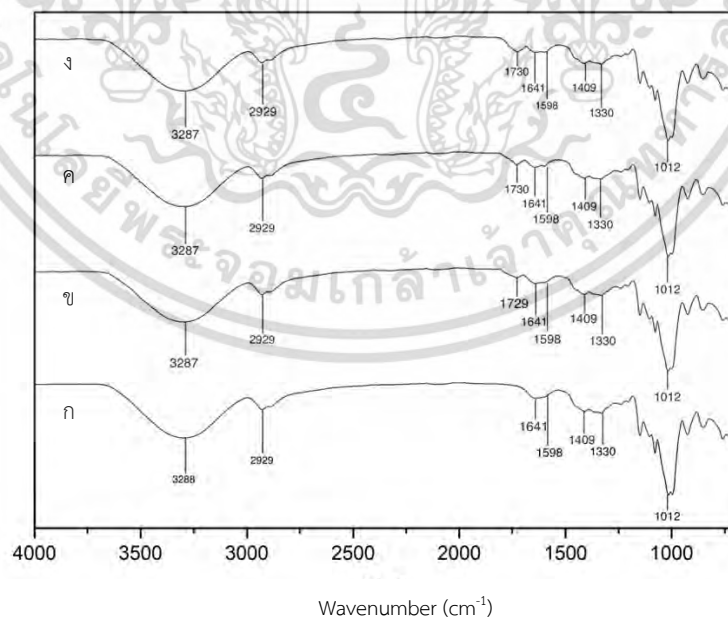
4.3 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

จากผลการศึกษาในตอนต้นที่ 2 ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีผลต่อฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลในปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยวิธีความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง (HMT120-1-10%CMC) มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรงที่พอเหมาะไม่แข็งเปราะจนมากเกินไป มีการบวมตัวและอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำ จึงนำสูตร HMT120-1-10%CMC มาศึกษาต่อในตอนต้นที่ 3 เป็นการศึกษาผลของการใส่ยูจินอลเพื่อต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และน้ำ เป็นสารที่มีขั้วจึงไม่สามารถเข้ากันได้กับยูจินอลที่เป็นสารไม่มีขั้ว จึงต้องใช้ Tween 80 ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาค

4.3.1 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total reflectance, ATR)



รูปที่ 4.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้น ใส่คาร์บอกซีเมทิลและยูจีนอลที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) NS-10%CMC (ข) NS -10%CMC-2Eu (ค) NS 1-10%CMC-3Eu และ (ง) NS -10%CMC-4Eu



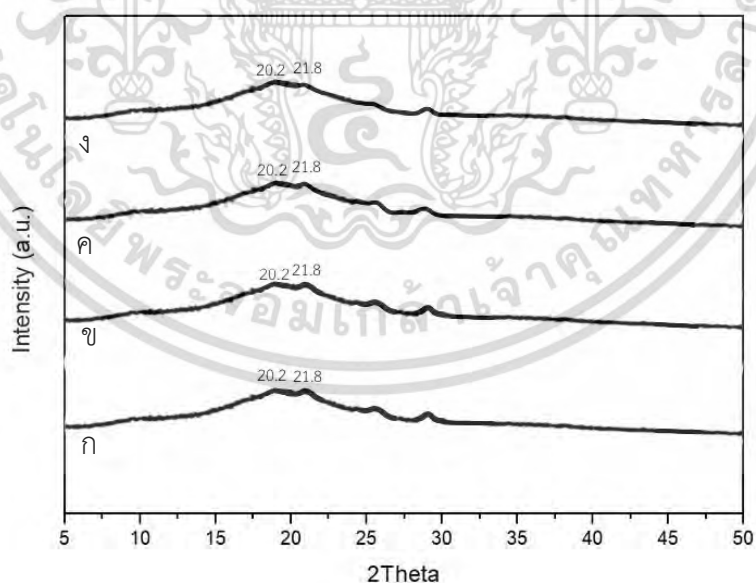
รูปที่ 4.27 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อน และใส่คาร์บอกซีเมทิลและยูจีนอลที่ปริมาณต่าง ๆ กัน (ก) HMT 120-1-10%CMC (ข) HMT 120-1-10%CMC-2Eu (ค) HMT 120-1-10%CMC-3Eu และ (ง) HMT 120-1-10%CMC-4Eu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

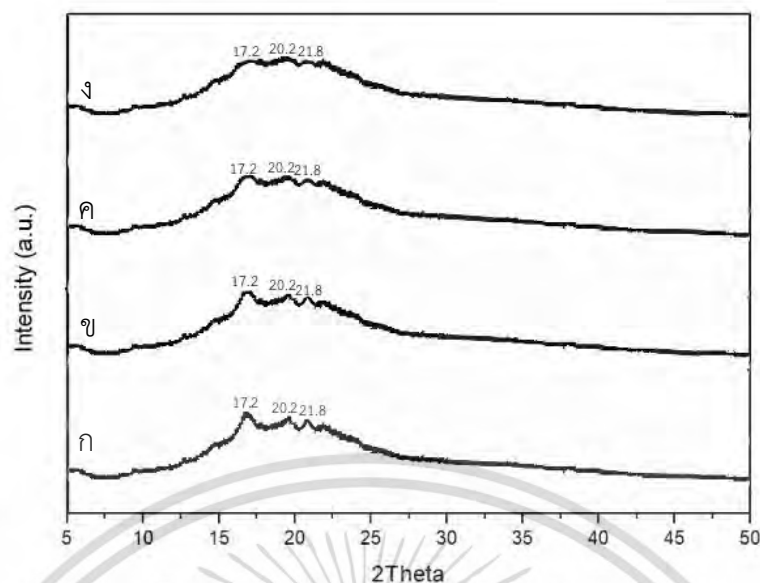
รูปที่ 4.26 – 4.27 และภาคผนวก ค. แสดงสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนัก และใส่ยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ได้แก่ 2 3 และ 4 phr จากผลการทดลอง พบว่า สเปกตรัมจากฟิล์มแป้งสูตรที่ไม่ใส่ยูจินอล และฟิล์มแป้งที่ใส่ยูจินอลใน มีลักษณะสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างของแป้งและกลีเซอรอล ดังนี้ พีคในช่วงความยาวคลื่น $3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ O-H stretching พีคที่ความยาวคลื่น $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ C-H stretching ของ CH_3 และ CH_2 ของแป้ง พีคช่วง 1628 cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในแป้ง พีคบริเวณความยาวคลื่น $1425\text{--}1485\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแป้ง [19] พีคช่วงความยาวคลื่น 1597 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ COO^- stretching

ผลของการใส่ยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4 phr รูปที่ 4.26 (ข)-(ง) และ รูปที่ 4.27 (ข)-(ง) พบว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของยูจินอล คือ พีคที่ความยาวคลื่น 1730 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C-O stretching ของหมู่แอลคอกซิล (Alkoxy) และ C=O stretching ของหมู่ คาร์บอนิล (Carbonyl) ซึ่งเกิดจากสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกของยูจินอล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng K. *et al.* ศึกษาฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากโคโคซานและยูจินอล ผลการทดลองพบว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างแป้งมันเทศกับยูจินอล โดยพบพีคเอกลักษณ์ของยูจินอลที่ 1730 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก [55]

4.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)



รูปที่ 4.28 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นเสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอล (ก) NS-10%CMC (ข) NS -10%CMC-2Eu (ค) NS 1-10%CMC-3Eu และ (ง) NS -10%CMC-4Eu



รูปที่ 4.29 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจีนอล (ก) HMT120-1-10%CMC (ข) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ค) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ง) HMT120-1-10%CMC-4Eu

ตารางที่ 4.10 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจีนอล ที่ปริมาณต่าง ๆ

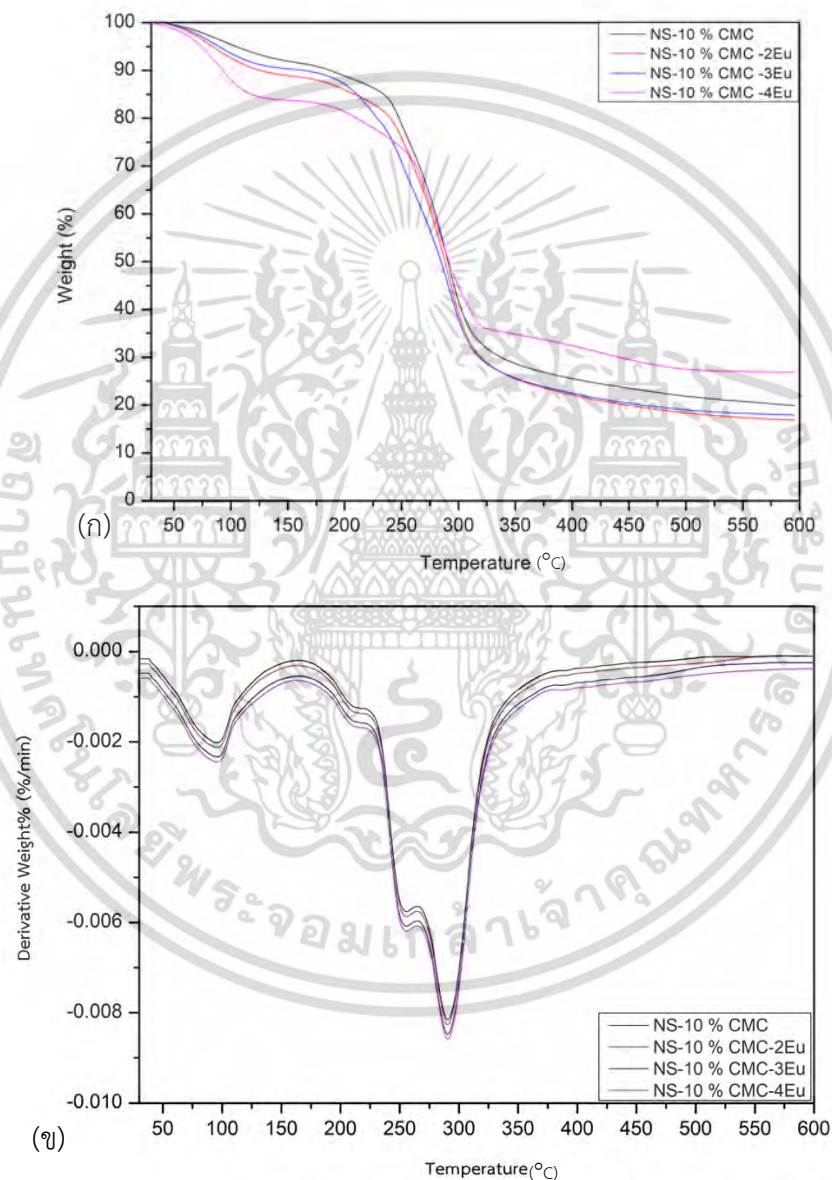
สูตร	ปริมาณผลึก (%) 10-30
NS-10%CMC	17.5
NS-10%CMC-2Eu	17.0
NS-10%CMC-3Eu	16.6
NS-10%CMC-4Eu	16.2
HMT-120-1-10%CMC	25.2
HMT-120-1-10%CMC-2Eu	24.8
HMT-120-1-5%CMC-3Eu	24.3
HMT-120-1-10%CMC-4Eu	23.9

จากรูปที่ 4.28 – 4.29 และภาคผนวก ก แสดงดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิ 120°C เสริมแรงด้วย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจีนอลที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 2 3 และ 4 phr พบว่า ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานแป้งมันสำปะหลังผ่านการดัดแปรที่ใส่ยูจีนอลพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 17.2° 20.2° และ 21.8° แต่ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ใส่

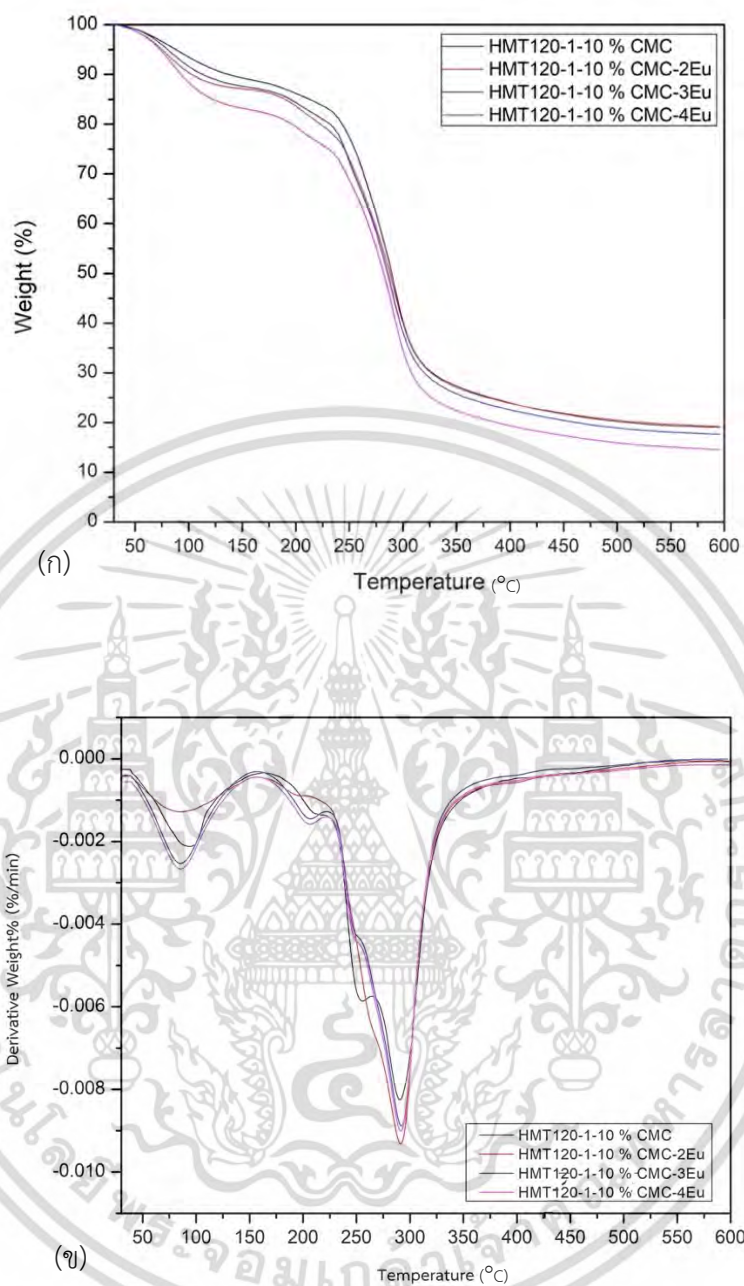
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูจีนอลทุกสูตรพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 20.2° และ 21.8° จากตารางที่ 4.10 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณยูจีนอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากยูจีนอลมีลักษณะเป็นน้ำมันเมื่อใส่ลงไป ในชิ้นงานส่งผลให้ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น สายโซ่โมเลกุลห่างกันมากขึ้นและจัดเรียงตัวกันได้ยากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจึงลดลง โดยชิ้นงานสูตร NS-10%CMC-4Eu มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำที่สุด

4.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.30 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจีนอลที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.31 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนชั้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)				น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส)	ช่วงที่ 4 (แป้ง- ยูจินอล)	
NS-10%CMC	97.45	199.56	258.52	290.68	78.92
NS-10%CMC-2Eu	98.68	200.63	256.79	289.38	79.13
NS-10%CMC-3Eu	99.28	199.75	255.97	288.56	79.87
NS-10%CMC-4Eu	99.83	198.74	255.08	286.72	80.36
HMT-120-1-10%CMC	88.50	215.97	260.83	298.46	72.94
HMT-120-1-10%CMC-2Eu	89.07	214.93	259.90	297.69	73.09
HMT-120-1-10%CMC-3Eu	89.87	214.37	258.05	297.37	74.37
HMT-120-1-10%CMC-4Eu	90.80	206.03	257.82	296.91	75.74

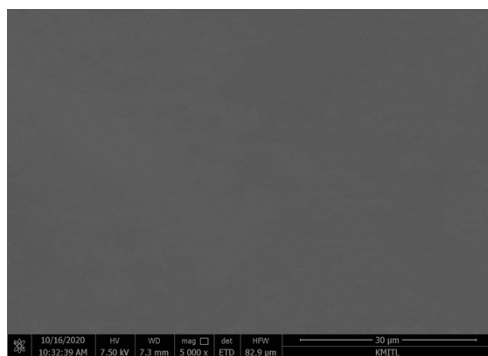
จากรูปที่ 4.30 – 4.31 ตารางที่ 4.11 และภาคผนวก ข. แสดงข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ผลของสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2 3 และ 4 phr จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานสูตรที่ใส่ยูจินอลมีอุณหภูมิในการสลายตัวแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำอยู่ในช่วง $88-90^{\circ}\text{C}$ ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ $198-215^{\circ}\text{C}$ ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ช่วงอุณหภูมิ 260°C ช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง-ยูจินอล ที่ช่วง $280-300^{\circ}\text{C}$ โดยยูจินอลมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 285.2°C [56] ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยูจินอลเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณยูจินอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากยูจินอลมีลักษณะคล้ายน้ำมันทำให้เข้าไปเพิ่มปริมาตรอิสระภายในโมเลกุลของชิ้นงาน สายโซ่โมเลกุลอยู่ห่างกันมากขึ้น สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง จึงส่งผลให้ชิ้นงานสูตรที่มียูจินอลมีความทนทานต่อความร้อนลดลง โดยงานวิจัยของ Navikaite et al. ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติฟิล์มจากแป้งเทอโรโมพลาสติกและเติมยูจินอล พบว่ายูจินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

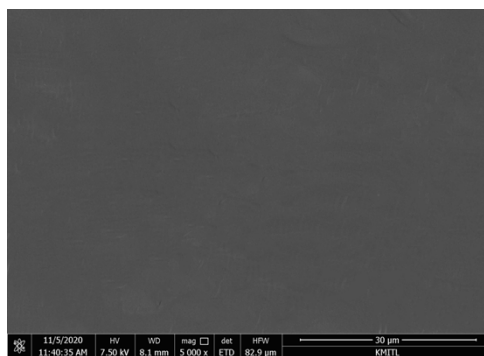
ส่งผลให้สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยูจินอลเข้าไปขัดขวางการก่อตัวของผลึกส่งผลให้ปริมาณผลึกมีค่าลดลง จึงทำให้ชิ้นงานสูตรที่มียูจินอลมีความทนทานต่อความร้อนลดลง [56]

4.3.4 การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยา

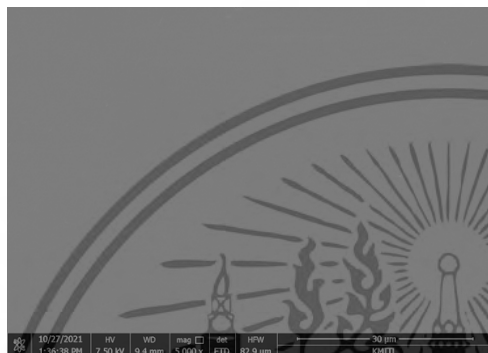
จากรูปที่ 4.32 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น และปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หลังจากนั้นใส่ยูจินอลที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่และไม่ใส่ยูจินอลทุกสูตร มีภาคตัดขวางที่คล้ายคลึงกัน คือมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากในขั้นตอนการผสมมีการใช้ Tween80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ทำให้ยูจินอลที่ไม่มีขั้วสามารถเข้ากับแป้ง CMC และน้ำที่มีขั้วได้ ซึ่งสอดคล้องกับ Zheng *et al.* ศึกษาฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากไคโตซานและยูจินอล พบว่ายูจินอลสามารถเข้ากับไคโตซานได้ดี แต่การเพิ่มขึ้นของยูจินอลที่มากเกินไปทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอภายในโครงสร้างและมีความขรุขระมากขึ้น [55] และเมื่อพิจารณาภาคตัดขวางของชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น พบว่ามีภาคตัดขวางที่เรียบไม่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร



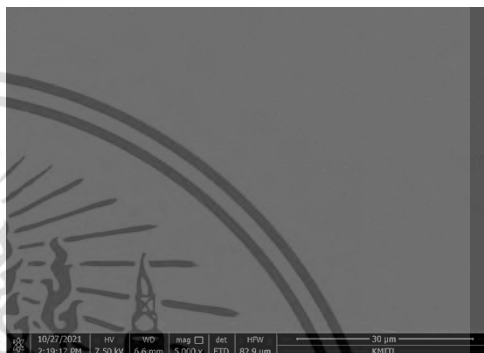
(ก) NS-10%CMC



(จ) HMT120-1-10%CMC



(ข) NS-10%CMC-2Eu



(ฉ) HMT120-1-10%CMC-2Eu



(ค) NS-10%CMC-3Eu



(ช) HMT120-1-10%CMC-3Eu



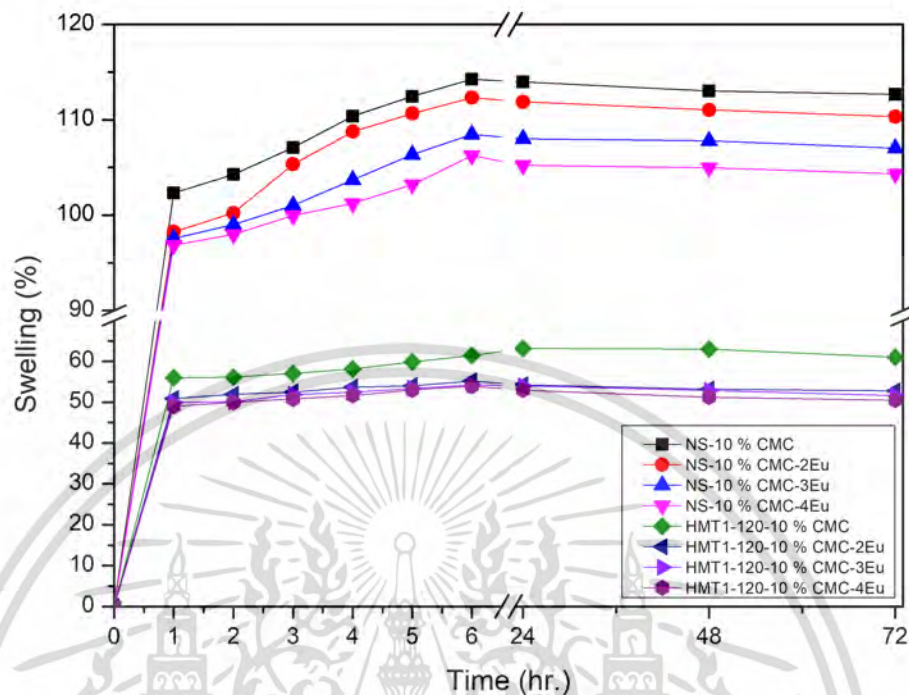
(ง) NS-10%CMC-4Eu



(ซ) HMT120-1-10%CMC-4Eu

รูปที่ 4.32 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางชิ้นงานที่กำลังขยาย 5000 เท่าของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนกัมมันต์เซลลูโลสที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) HMT120-1-10%CMC (ข) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ค) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ง) HMT120-1-10%CMC-4Eu เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 สมบัติการบวมตัว (Swelling)



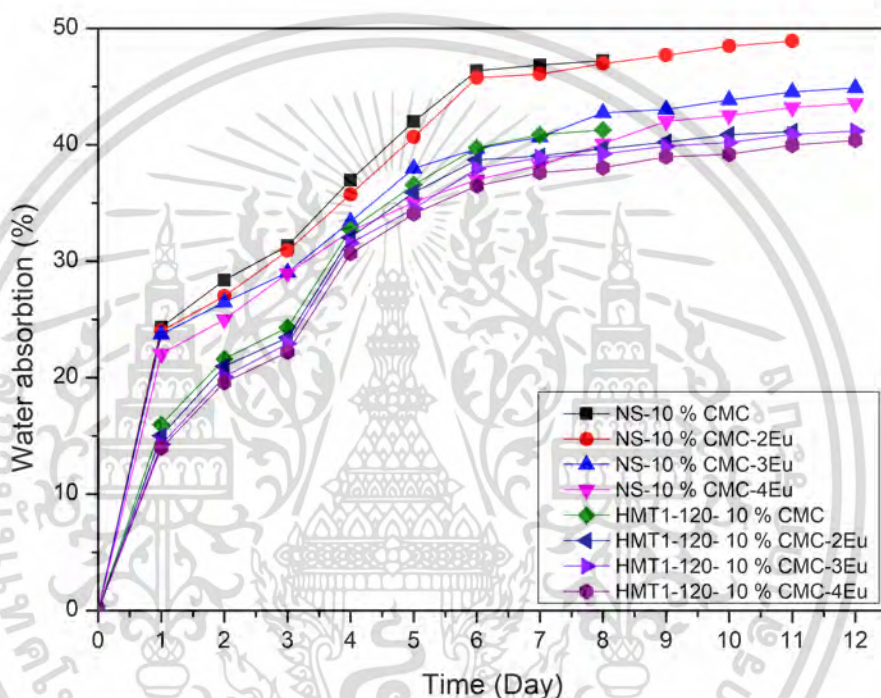
รูปที่ 4.33 เปอร์เซนต์การบวมตัวของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซนต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.33 และภาคผนวก ง. แสดงการบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่ยูจินอลในปริมาณต่างกันพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่และไม่ใส่ยูจินอล มีการบวมตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ ซึ่งอัตราเร็วมีแนวโน้มลดลงเมื่อการทดสอบผ่านไป นอกจากนี้พบว่า เมื่อปริมาณยูจินอลมากขึ้น ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากยูจินอล ซึ่งแสดงความไม่มีชีวิต เมื่อใส่ลงไปในฟิล์มแป้ง จึงเป็นการเพิ่มความไม่มีชีวิตให้กับชิ้นงาน ความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวจึงลดลง โดย Wang et al. รายงานผลการพัฒนาแผ่นรองด้านเชื้อแบคทีเรียจาก พอลิแลคติก-β-ไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ และยูจินอล พบว่ายูจินอลส่งผลให้ชิ้นงานดูดซับน้ำและความชื้นได้ลดลง เนื่องจากยูจินอลเข้าไปเพิ่มส่วนที่ไม่ชอบน้ำแก่ชิ้นงาน [57]

4.3.6 การดูดซับความชื้น (Water absorption)

จากรูปที่ 4.34 และภาคผนวก จ. แสดงการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และใส่ยูจินอลที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ความเร็วในการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งทุกสูตรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-4 วันแรกของการทดสอบ และความเร็วเริ่มคงที่หลังจากเวลาการทดสอบผ่านไป นอกจากนี้พบว่า การเติมยูจินอลส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นลดลงตามปริมาณยูจินอลที่มากขึ้น เนื่องจากยูจินอลแสดงความไม่มีชีวิต จึงมีสมบัติไม่เอื้ออำนวยเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชอบน้ำ เมื่อใส่ลงไปในฟิล์มแป้งจึงเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับฟิล์มแป้ง ส่งผลให้ค่าดูดซับความชื้นลดลงเมื่อ ยูจินอลเพิ่มขึ้น [57] ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการบวมตัว คือ เมื่อปริมาณยูจินอลเพิ่มขึ้นค่าการบวมตัวของ ชีงงานมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาชีงงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ ความร้อนขึ้น พบว่าชีงงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีการดูดซับ ความชื้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชีงงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากการดัด แปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการตัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ มากขึ้นจึงทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าในเม็ดแป้งได้ลดลง



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย วิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.7 การหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)

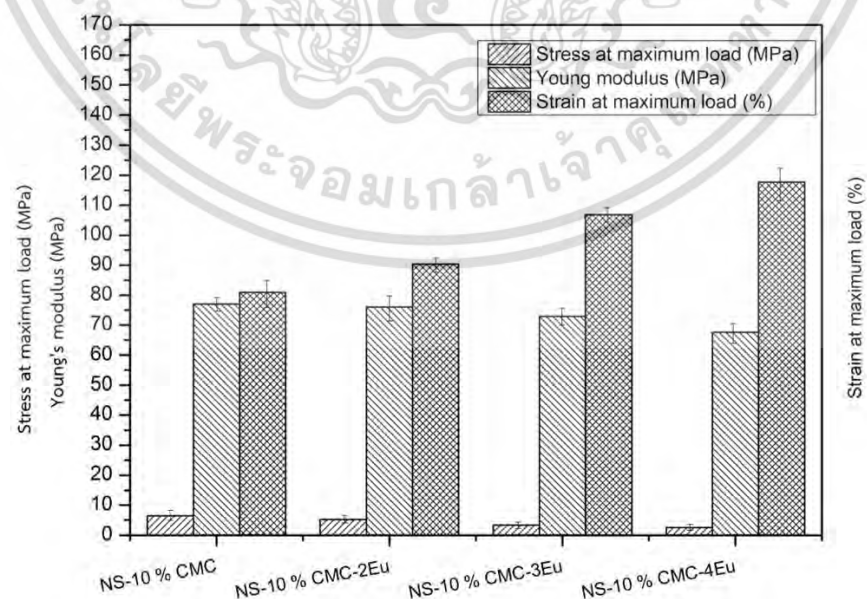
จากตารางที่ 4.12 แสดงผลอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และใส่ยูจินอลที่ปริมาณต่างๆ พบว่า อัตราการ ซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ และเริ่มลดลงเมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป นอกจากนี้พบว่า การเติมยูจินอลส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากยูจินอลมีสมบัติที่ไม่ ชอบน้ำ จึงเข้าไปเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้กับฟิล์มแป้ง จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง เมื่อ ปริมาณยูจินอลมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Emma et al. ศึกษาผลของยูจินอลต่อสมบัติเชิงกล ของฟิล์มจากแป้งข้าวโพด พบว่าการเพิ่มขึ้นของยูจินอลส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำของชีงงานลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากยูจินอลมีความไม่ชอบน้ำจึงเข้าไปเพิ่มส่วนที่ไม่ชอบน้ำในชั้นงาน [58] และผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำยังสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัวและการดูดซับความชื้น ที่เมื่อปริมาณยูจินอลเพิ่มขึ้นชั้นงานทำให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นสมบัติดังกล่าวจึงลดลง

ตารางที่ 4.12 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน

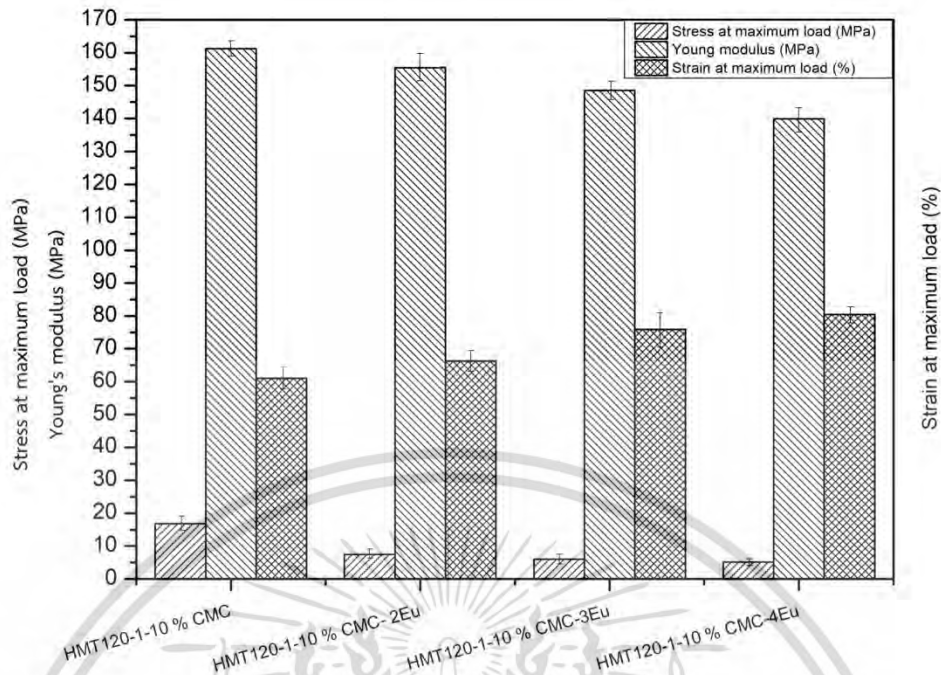
สูตร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม•มิลลิเมตร/ ตารางเมตร • วัน • กิโลปาสกาล)
NS-10%CMC	11.87
NS-10%CMC-2Eu	11.35
NS-10%CMC-3Eu	10.94
NS-10%CMC-4Eu	10.49
HMT-120-1-10%CMC	10.29
HMT-120-1-10%CMC-2Eu	10.07
HMT-120-1-10%CMC-3Eu	9.93
HMT-120-1-10%CMC-4Eu	9.89

4.3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)



รูปที่ 4.35 ก. สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

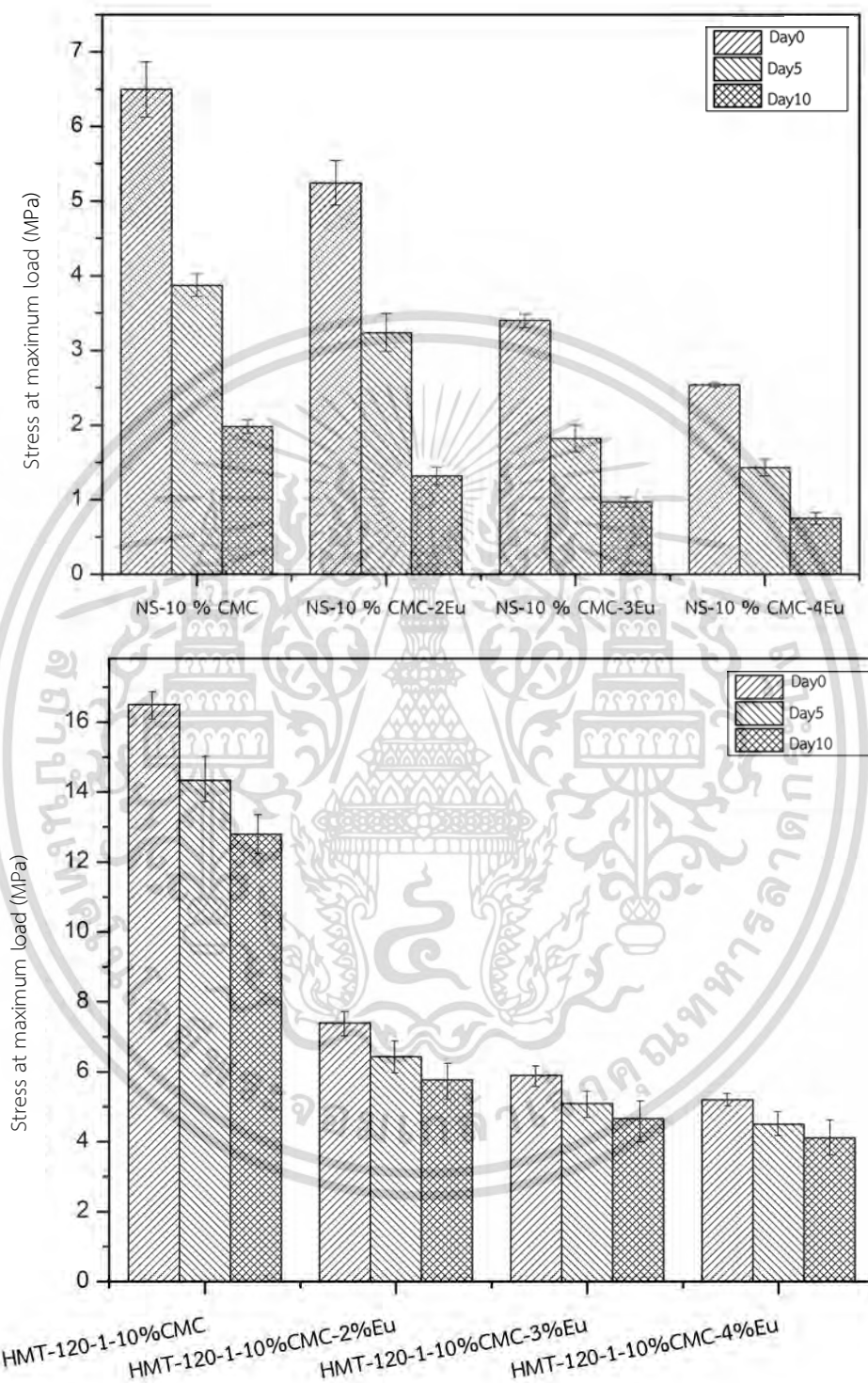
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ข. สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

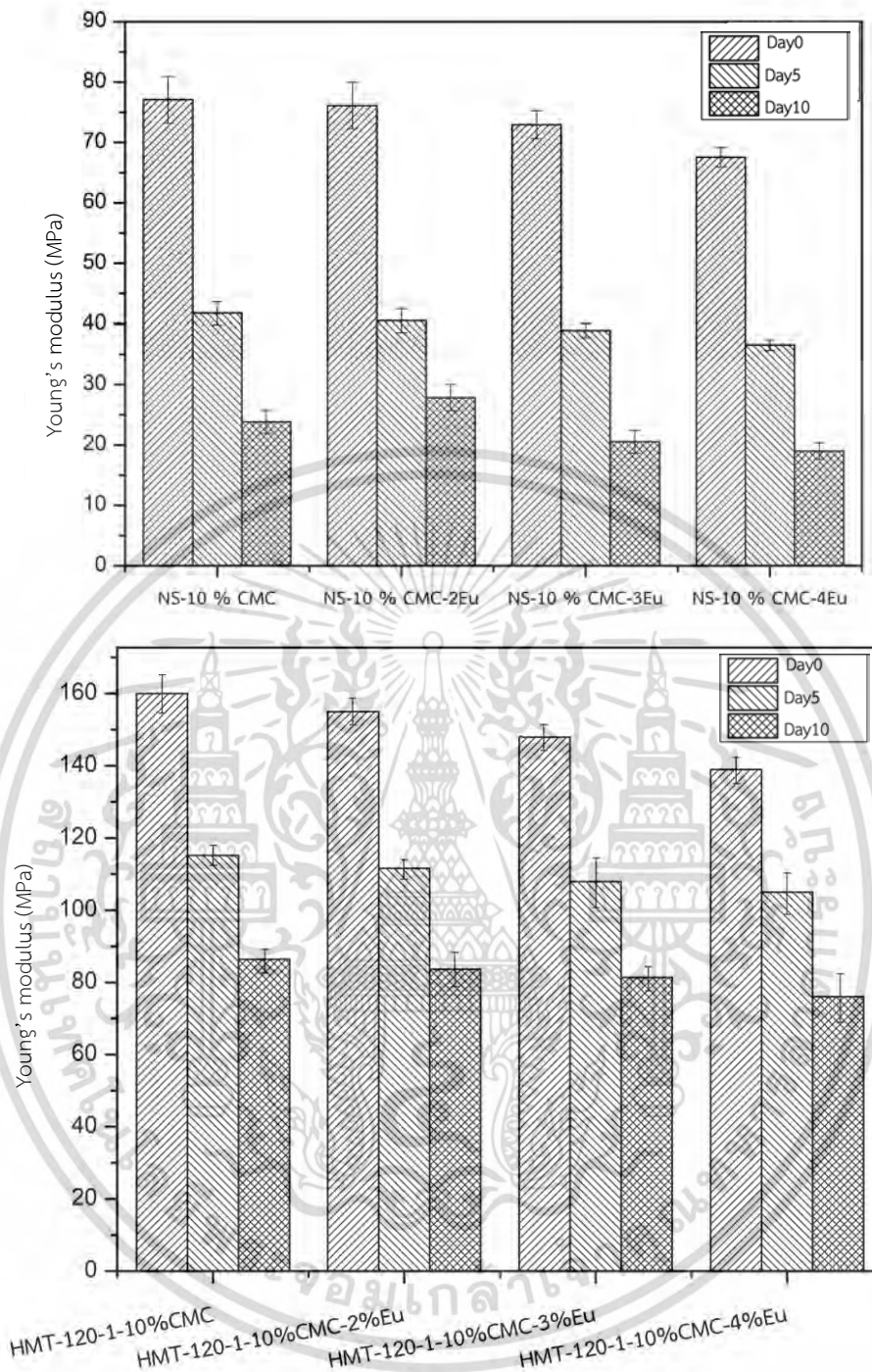
จากรูปที่ 4.35 และภาคผนวก ฉ. แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอลปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสูตรที่ใส่ยูจินอลทุกปริมาณ ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัส มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยูจินอลมากขึ้น แต่ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ใส่ยูจินอล เนื่องจากยูจินอลเข้าไปเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free Volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุล จัดเรียงตัวไม่แน่น ส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังรับแรงกระทำได้ลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรอิสระทำให้ฟิล์มแป้งมีความยืดมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jimenez et al. ที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มโพลิไฮดรอกซีบิวทีเรตที่เติมยูจินอล พบว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมจากยูจินอลมีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสลดลง เนื่องจากส่วนที่ไม่มีหัวของยูจินอล ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องหรือขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลภายในเม็ดแป้ง จึงส่งผลให้การรับแรงของชิ้นงานลดลง [59]

4.3.9 การย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

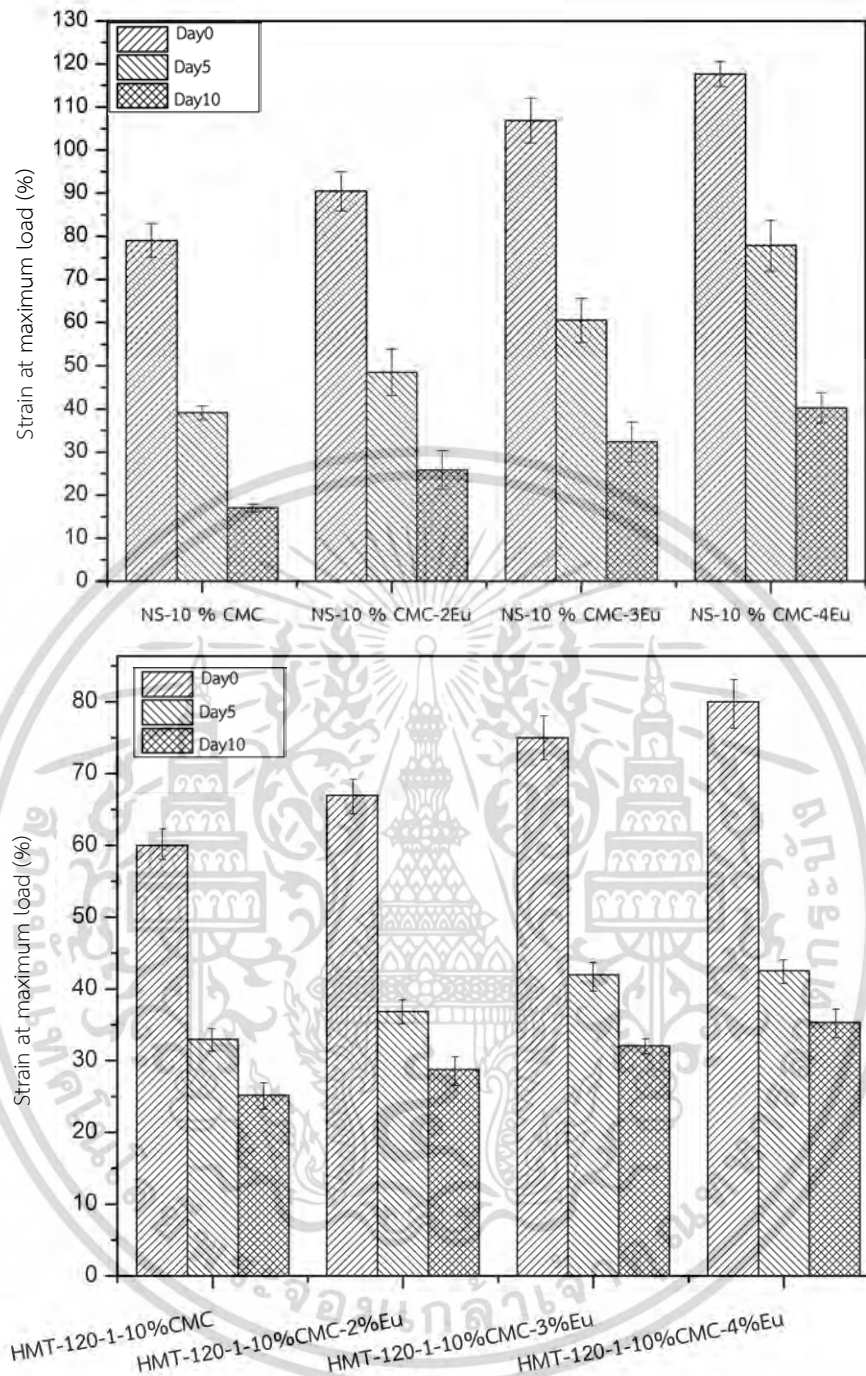


รูปที่ 4.36 ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ค่ามอดุลัสของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน



รูปที่ 4.38 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน หลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0 5 และ 10 วัน

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วย 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน

สูตร	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	5 วัน			10 วัน		
	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรง ดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยืด	ค่าความเค้น ณ จุดรับแรง ดึงสูงสุด	มอดุลัส	เปอร์เซ็นต์ การดึงยืด
NS-10%CMC	35.43	45.80	50.48	49.52	69.06	69.06
NS-10%CMC-2Eu	34.20	44.71	46.35	48.94	68.46	68.53
NS-10%CMC-3Eu	33.44	44.24	43.38	48.13	67.92	67.86
NS-10%CMC-4Eu	30.72	43.95	39.85	47.96	67.03	67.24
HMT-120-1-10% CMC	13.66	28.25	45.53	22.79	46.73	58.06
HMT-120-1-10%CMC-2Eu	13.09	28.16	45.12	22.28	46.29	57.78
HMT-120-1-10%CMC-3Eu	12.96	28.06	44.87	21.93	45.87	57.24
HMT-120-1-10%CMC-4Eu	12.39	27.47	44.02	21.17	45.22	56.83

รูปที่ 4.28 – 4.30 และภาคผนวก ฉ. แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และใส่ยูจินอลที่ปริมาณต่างกัน ภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 5 และ 10 วันพบว่า ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และตามตารางที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลหลังฝังดินพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่ยูจินอลมีเปอร์เซ็นต์การลดลงเชิงกลของชิ้นงานต่ำลงตามปริมาณยูจินอลที่เพิ่มขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ใส่ยูจินอลน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่ยูจินอล เนื่องจากฟิล์มแป้งสูตรที่ใส่ยูจินอลมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความชื้นในดินสามารถแทรกซึมเข้าไปในโมเลกุลของฟิล์มแป้งได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการดูดซับความชื้นที่ลดลงเมื่อปริมาณยูจินอลมากขึ้น

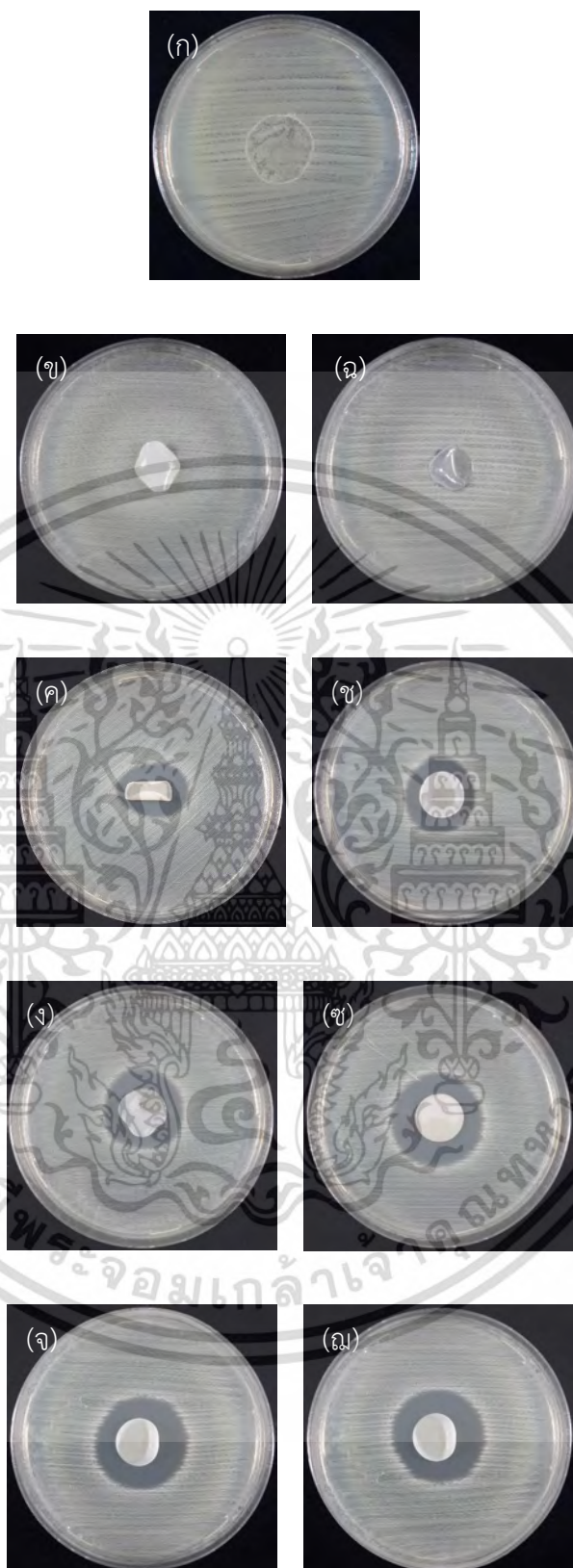
4.3.10 การทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial activity)

การทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรโดยการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และใส่ยูจินอลปริมาณต่างกัน คือ 2 3 และ 4 phr ซึ่งทำการทดสอบด้วยวิธี Agar diffusion เพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อจุลินทรีย์ชนิดแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* และชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.14 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่าน
ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ

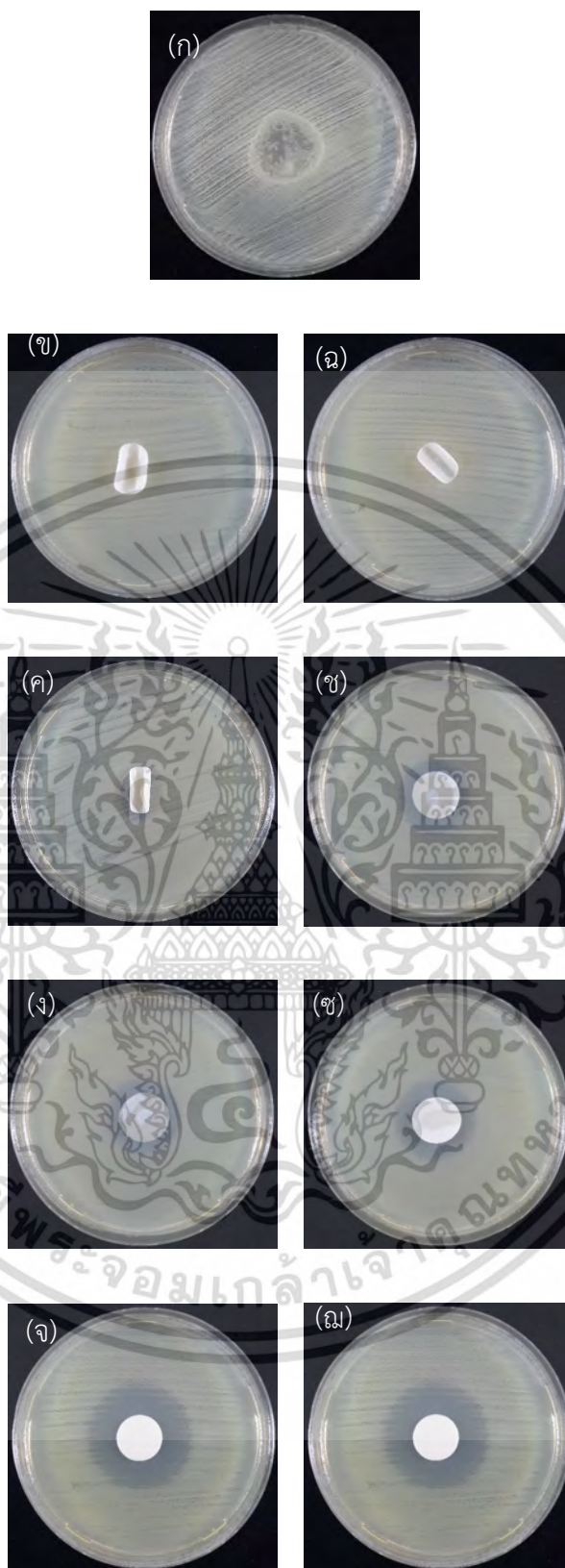
ตัวอย่าง	บริเวณการต้านทานเชื้อ (มิลลิเมตร)		การต้านทานเชื้อ
	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	
NS	-	-	Inactive
NS-10%CMC	-	-	Inactive
NS -10%CMC-2Eu	21.94	15.40	Active
NS -10%CMC-3Eu	27.15	22.21	Active
NS -10%CMC-4Eu	30.38	25.10	Active
HMT120-1-10%CMC	-	-	Inactive
HMT120-1-10%CMC-2Eu	22.51	16.34	Active
HMT120-1-10%CMC-3Eu	28.90	22.69	Active
HMT120-1-10%CMC-4Eu	30.49	26.24	Active

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจินอลต่อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* โดย (ก) NS (ข) NS-10%CMC (ค) NS-10%CMC-2Eu (ง) NS-10%CMC-3Eu (จ) NS-10%CMC-4Eu (ฉ) HMT120-1-10%CMC (ช) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ซ) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ณ) HMT120-1-10%CMC-4Eu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจีนอลต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* โดย (ก) NS (ข) NS-10%CMC (ค) NS-10%CMC-2Eu (ง) NS-10%CMC-3Eu (จ) NS-10%CMC-4Eu (ฉ) HMT120-1-10%CMC (ช) HMT120-1-10%CMC-2Eu (ซ) HMT120-1-10%CMC-3Eu และ (ณ) HMT120-1-10%CMC-4Eu เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 – 4.31 และตารางที่ 4.14 แสดงระยะการต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอลที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสูตรที่ไม่ใส่ยูจินอลไม่สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ แต่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใส่ยูจินอล สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยูจินอลมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pérez et al. ซึ่งอธิบายว่ากลไกการต้านทานแบคทีเรียของยูจินอลว่าเกิดจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของยูจินอล ทำให้ยูจินอลสามารถแทรกตัวเข้าไปในส่วนของไขมันซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียและไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) ทำให้ช่องการส่งผ่านสารเกิดความผิดปกติจึงไปยับยั้งการขนส่งแคลเซียมและโพแทสเซียมส่งผลให้ผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียแตกและเชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด [60]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาชนิดของแบคทีเรียที่มีผลต่อระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของยูจินอล พบว่ายูจินอลมีประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียแกรมบวกสูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบในทุกสูตรการทดลอง ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Watanabe et al. ที่อธิบายว่ายูจินอลสามารถออกฤทธิ์ในการต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้มากกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ เนื่องจากโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกันของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด โดยเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมีโครงสร้างผนังเชื้อที่ซับซ้อนแบคทีเรียแกรมบวก ทำให้ยูจินอลแทรกซึมเข้าไปที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบได้ยากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ยูจินอลจึงต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมลบได้น้อยกว่า [61] และเมื่อเปรียบเทียบระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบพบว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นมีระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรทั้งแกรมบวกและแกรมลบ

จากการศึกษา ตอนที่ 4.3 สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอลที่ปริมาณ 2, 3 และ 4 phr ซึ่งใช้ Tween80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่ายูจินอลส่งผลให้ปริมาณผลึก ความสามารถทนทานต่อความร้อน การบวมตัว การดูดซับความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้พบว่ายูจินอลสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวก (*S. aureus*) และแกรมลบ (*E. coli*)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นในสถานะที่แตกต่างกัน คือ ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้มีการเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งภายหลังจากการทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง สามารถสรุปผลการวิจัยทั้งหมดได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน พบว่าเมื่อเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีพีคเกิดใหม่ที่ช่วงความยาวคลื่น 1598 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ COO- stretching และเกิดการเคลื่อนที่ของพีคที่ช่วงความยาวคลื่น $3000\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้เมื่อเติมยูจินอลพบว่ามีพีคใหม่ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ช่วงความยาวคลื่น 1730 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C=O stretching ของหมู่แอลคอดีล และ C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิล

2. จากการศึกษาผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนทุกสถานะมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร นอกจากนี้พบว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอลมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลง

3. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น โดยอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง แต่เมื่อเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอล กลับให้ผลตรงกันข้าม คือ อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีภาพตัดขวางที่เรียบไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเติมยูจินอลส่งผลให้ภาพตัดขวางมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5. จากการศึกษาสมบัติการบวมตัว สมบัติการดูดซับความชื้น และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัว การดูดซับความชื้น และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและยูจินอล ส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มการบวมตัว การดูดซับความชื้น และอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงเล็กน้อย

6. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดขาดมีค่าลดลง การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และการเติมยูจินอลส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสลดลงเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

7. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการย่อยสลายช้าลง และเมื่อเติมยูจินอลทำให้ความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังช้าลงและการลดลงของสมบัติเชิงกลช้าลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้การสลายตัวมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น

8. จากการศึกษาสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถแสดงระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก *S. aureus* และแกรมลบ *E. coli* ได้ แต่เมื่อเติมยูจินอล พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสามารถแสดงระยะต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ โดยการเติมยูจินอลที่ปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียมากที่สุด

จากการทดลองสมบัติทั้งหมดนี้ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุดโดยพิจารณาจากสมบัติการบวมตัว การดูดซับความชื้น อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติเชิงกล และต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เสริมแรงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และยูจินอล สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ดังนี้

1. ศึกษาการใช้วิธีการดัดแปรแบบ 2 ขั้นตอน (Dual modification) คือนำแป้งไปดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นก่อนหลังจากนั้นจึงนำแป้งมาดัดแปรด้วยวิธีการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งทำให้ชิ้นงานสามารถทนทานต่อความร้อน ความชื้นและแรงกระทำได้มากขึ้น [62]

2. ศึกษาการใช้ พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ชนิดอื่น เช่น ไคโตซาน และผงวุ้น ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับชิ้นงาน และลดความแข็งเปราะของชิ้นงานที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว

3. แป้งมันสำปะหลัง น้ำ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่สามารถเข้ากับยูจินอลได้ เนื่องจากยูจินอลเป็นสารไม่มีขั้ว จึงต้องใช้ทวิน 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์เพื่อเชื่อมสารทั้ง 4 ชนิดเข้าด้วยกัน แต่ทวิน 80 ใช้ได้ในปริมาณที่จำกัด จึงต้องศึกษาวิธีการที่สามารถใช้ทวิน 80 ในปริมาณที่มากขึ้น เช่น 2-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง แป้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น้ำ และยูจินอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภิพร แสงกระจ่าง, ปัทมา พลอยสว่าง และปริญดา พรหมหิตาธร. 2556. “ผลกระทบของพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม.” *วารสารพิษวิทยาไทย*. 28(1) : 39-50.
- [2] ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และเกษมา จารุกัจจร. 2556. **การผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเพรตเทอแรพธารเรต**. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [3] Griffin, G.J.L. 1994. “Starch polymer blends.” *Polymer Degradation and Stability*. 45(2) : 241-247.
- [4] ฝ่ายบริหารคลังเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2554. **ยุทธศาสตร์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมมันสำปะหลังประเทศไทย (พ.ศ. 2555-2559) และโปรแกรมวิจัยและพัฒนามันสำปะหลังภายใต้แผนกลยุทธ์การวิจัยและพัฒนา สวทช. ระยะที่ 2 พ.ศ. 2554-2559 (Strategic Planning Alliance II : SPA II)**. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [5] Rosa Zavareze, E. and Dias, A. R. G. 2011. “Impact of Heat-Moisture Treatment and Annealing in Starches: A Review.” *Carbohydrate Polymers*. 83 : 317–328.
- [6] ปิยพร ร่มแสง, มัตติกา ไชยลังกา, รังสรรค์ กุณสะนา, วิชชากร กันทรณ, อนุวัฒน์ โรจน์สินทรัพย์ และ นพพล เล็กสวัสดิ์. **CMC Biopolymer**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [7] ภัสรา ขวประดิษฐ์. **กานพลู**. ส่วนส่งเสริมการผลิตผักไม้ดอกไม้ประดับและสมุนไพร กรมส่งเสริมการเกษตร.
- [8] Dudu, O. E., Oyediji, A. B., Oyeyinka, S. A. and Ma, Y. 2019. “Impact of steam-heat-moisture treatment on structural and functional properties of cassava flour and starch.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 126 : 1056-1064.
- [9] Tongdeesontorn, W., Mauer, L. J., Wongruong, S., Sriburi, P. and Rachtanapun, P. 2011. “Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films.” *Chemistry Central Journal*. 5(1) : 1-8.
- [10] วรยุทธ ยอดบุญ, ประเวทย์ ดุ้ยเต็มวงศ์ และขรรณี ดุ้ยเต็มวงศ์. 2555. **ผลของสารสกัดสมุนไพรในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [11] วิไลวรรณ โพล้งมี. 2552. “การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาเรช.” **ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ไพโรจน์ ใบตาเฮ. 2555. “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [13] จินตภา เต็มสีคราม. 2558. “สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลกติก และกรดมาลิก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 255 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [15] จุฑากานต์ บุญมี. ม.ป.พ. “พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastics) ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.” *วารสารสิ่งแวดล้อม*. 16(2) : 15-19
- [16] ศิริวิมล สุขสวัสดิ์. 2556. “การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลกไทด์ที่ผ่านการใช้งานโดยเอกติโนมายซิสต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [17] กล้านรงค์ ศรีรอท และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [18] Whistler, R.L. Bemiller, J.N. and Paschall, E. F. 1984. *Starch : chemistry and technology*. 2nd ed. Florida : Academic Press.
- [19] Ma, X. Chang, P.R. Yu, J. and Stumborg, M. 2009. “Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites.” *Carbohydrate Polymers*. 75 : 1-8.
- [20] คีนจันท์ ณ นคร. 2552. “ผลของปริมาณอะไมโลสและสภาวะการผลิตต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชข้าวพรีเจลาติไนซ์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [21] นรดิษฐ์ จันทรกุล. 2547. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [22] Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L. and Li, L. 2009. “Thermal processing of starch-based polymers.” *Progress in polymer science*. 34(12) : 1348-1368.
- [23] Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K. and Delcour, J. A. 1997. “Effects of hydrothermal treatments of the rheological properties of potato starch.” *Carbohydrate Polymers*. 297 : 347-356.

- [24] Bueso Ucles, F. J. 2003. "Antistaling properties of amylases, wheat gluten and CMC on corn tortilla." Ph. D. Dissertation. Texas A&M University, College Station, TX.
- [25] บุหรัน พันธุ์สุวรรณ. 2556. "อนุมูลอิสระ สารต้านอนุมูลอิสระ และการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ". วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 21(3) : 226-227.
- [26] Alves, V.D. Mali, S. Belei, A. Victoria, M. and Grossman, E. 2007. "Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties." *Food engineering*. 78 : 941-946.
- [27] Mouton, J., Mercier, G., and Blais, J.F. 2009. "Amphoteric surfactants for PAH and Lead polluted-soil treatment using flotation." *Water Air Soil Pollution*. 197: 381-393.
- [28] Alves, V.D. Mali, S. Belei, A. Victoria, M. and Grossman, E. 2007. "Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties." *Food engineering*. 78 : 941-946.
- [29] Gunaratne, A. and Hoover. R. 2002. "Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches." *Carbohydrate Polymers*. 49(4) : 425-437.
- [30] Hoover, R. and Vasanthan, T. 1994. "Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, legume and tuber starches." *Carbohydrate Polymers*. 252 : 33-53.
- [31] Ghanbarzadeh, B., Almasi, H. and Entezami, A. A. 2010. "Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films." *Innovative food science & emerging technologies*. 11(4) : 697-702.
- [32] Ma, X., Chang, P. R. and Yu, J. 2008. "Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites." *Carbohydrate Polymers*. 72(3) : 369-375.
- [33] Zheng, K., Xiao, S., Li, W., Wang, W., Chen, H., Yang, F., and Qin, C. 2019. "Chitosan-acorn starch-eugenol edible film: Physico-chemical, barrier, antimicrobial, antioxidant and structural properties." *International Journal of Biological Macromolecules*. 135 : 344-352.
- [34] Homsaard, N., Kodsangma, A., Jantrawut, P., Rachtanapun, P., Leksawasdi, N., Phimolsiripol, Y. and Jantanasakulwong, K. 2021. "Efficacy of cassava starch blending with gelling agents and palm oil coating in improving egg shelf life." *International Journal of Food Science & Technology*. 56(8) : 3655-3661

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [35] Narayanan, A., and Ramana, K. V. 2013. "Synergized antimicrobial activity of eugenol incorporated polyhydroxybutyrate films against food spoilage microorganisms in conjunction with pediocin." *Applied biochemistry and biotechnology*. 170(6) : 1379-1388.
- [36] Raigond, P., Sood, A., Kalia, A., Joshi, A., Kaundal, B., Raigond, B. and Chakrabarti, S. K. 2019. "Antimicrobial activity of potato starch-based active biodegradable nanocomposite films." *Potato Research*. 62(1) : 69-83.
- [37] Majzoobi, M., Pesaran, Y., Mesbahi, G., Golmakani, M. T. and Farahnaky, A. 2015. "Physical properties of biodegradable films from heat-moisture-treated rice flour and rice starch." *Starch-Stärke*. 67(11-12) : 1053-1060.
- [38] Cheng, J., Wang, H., Xiao, F., Xia, L., Li, L. and Jiang, S. 2021. "Functional effectiveness of double essential oils@ yam starch/microcrystalline cellulose as active antibacterial packaging." *International Journal of Biological Macromolecules*. 186 : 873-885.
- [39] Almasi, H., Ghanbarzadeh, B., and Entezami, A. A. 2010. "Physicochemical properties of starch-CMC-nanoclay biodegradable films." *International journal of biological macromolecules*, 46(1) : 1-5.
- [40] Wilpiszewska, K., Antosik, A. K., Schmidt, B., Janik, J., & Rokicka, J. (2020). "Hydrophilic Films based on carboxymethylated derivatives of starch and cellulose." *Polymers*, 12(11), 2447.
- [41] Jiang, G., Hou, X., Zeng, X., Zhang, C., Wu, H., Shen, G. and Zhang, Z. 2020. "Preparation and characterization of indicator films from carboxymethyl-cellulose/starch and purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) lam) anthocyanins for monitoring fish freshness." *International Journal of Biological Macromolecules*, 143 : 359-372.
- [42] Sun, Q., Si, F., Xiong, L., and Chu, L. 2013. "Effect of dry heating with ionic gums on physicochemical properties of starch." *Food chemistry*, 136(3-4) : 1421-1425.
- [43] Cheng, J., Wang, H., Kang, S., Xia, L., Jiang, S., Chen, M. and Jiang, S. 2019. "An active packaging film based on yam starch with eugenol and its application for pork preservation." *Food Hydrocolloids*. 96 : 546-554.
- [44] Li, S., Ward, R. and Gao, Q. 2011. "Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch." *Food Hydrocolloids*. 25(7) : 1702-1709.

- [45] Chung, H. J., Liu, Q. and Hoover, R. 2010. "Effect of single and dual hydrothermal treatments on the crystalline structure, thermal properties, and nutritional fractions of pea, lentil, and navy bean starches." *Food Research International*. 43(2) : 501-508.
- [46] Indrianti, N., Pranoto, Y. and Abbas, A. 2018. "Preparation and characterization of edible films made from modified sweet potato starch through heat moisture treatment." *Indonesian Journal of Chemistry*. 18(4) : 679-687.
- [47] Majzoobi, M., Pesaran, Y., Mesbahi, G., Golmakani, M. T. and Farahnaky, A. 2015. "Physical properties of biodegradable films from heat-moisture-treated rice flour and rice starch." *Starch-Stärke*. 67(11-12) : 1053-1060.
- [48] Cagnin, C., Simões, B. M., Yamashita, F., de Carvalho, G. M., & Grossmann, M. V. E. (2021). pH sensitive phosphate crosslinked films of starch-carboxymethyl cellulose. *Polymer Engineering & Science*, 61(2), 388-396.
- [49] Tavares, K. M., de Campos, A., Mitsuyuki, M. C., Luchesi, B. R. and Marconcini, J. M. 2019. "Corn and cassava starch with carboxymethyl cellulose films and its mechanical and hydrophobic properties." *Carbohydrate polymers*. 223 : 115055.
- [50] Suriyatem, R., Auras, R. A. and Rachtanapun, P. 2019. "Utilization of carboxymethyl cellulose from durian rind agricultural waste to improve physical properties and stability of rice starch-based film." *Journal of Polymers and the Environment*. 27(2) : 286-298.
- [51] Pelissari, F. M., Andrade-Mahecha, M. M., do Amaral Sobral, P. J. and Menegalli, F. C. 2017. "Nanocomposites based on banana starch reinforced with cellulose nanofibers isolated from banana peels." *Journal of colloid and interface science*. 505 : 154-167.
- [52] Leksawasdi, N., Chaiyaso, T., Rachtanapun, P., Thanakkasaranee, S., Jantrawut, P., Ruksiriwanich, W. and Jantanasakulwong, K. 2021. "Corn starch reactive blending with latex from natural rubber using Na⁺ ions augmented carboxymethyl cellulose as a crosslinking agent." *Scientific Reports*. 11(1) : 1-10.
- [53] Ghanbarzadeh, B., Almasi, H. and Entezami, A. A. 2010. "Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films." *Innovative food science & emerging technologies*. 11(4) : 697-702.
- [54] Li, S., Ma, Y., Ji, T., Sameen, D. E., Ahmed, S., Qin, W. and Liu, Y. 2020. "Cassava starch/carboxymethylcellulose edible films embedded with lactic acid bacteria to extend the shelf life of banana". *Carbohydrate Polymers*. 248 : 116805.

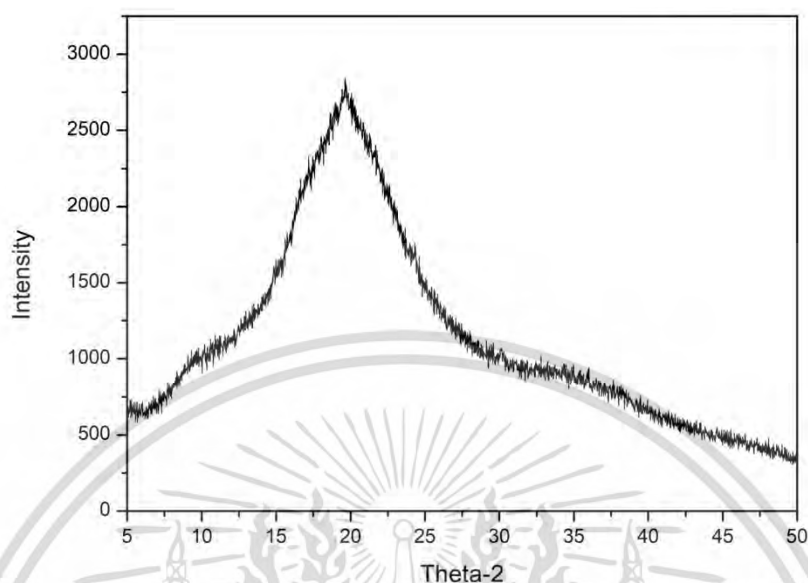
- [55] Zheng, K., Xiao, S., Li, W., Wang, W., Chen, H., Yang, F. and Qin, C. 2019. "Chitosan-acorn starch-eugenol edible film: Physico-chemical, barrier, antimicrobial, antioxidant and structural properties." *International journal of biological macromolecules*. 135 : 344-352.
- [56] Navikaite-Snipaitiene, V., Ivanauskas, L., Jakstas, V., Rüegg, N., Rutkaite, R., Wolfram, E. and Yildirim, S. 2018. "Development of antioxidant food packaging materials containing eugenol for extending display life of fresh beef." *Meat science*. 145 : 9-15.
- [57] Wang, C., Wu, L., Zhang, Y., Xu, M., Saldaña, M. D., Fan, X. and Sun, W. 2022. "A Water-absorbent Mat Incorporating β -cyclodextrin/eugenol Inclusion Complex for Preservation of Cold Fresh Mutton." *Food Biophysics*. 1-11.
- [58] Emma, E., Vargas, M., Chiralt, A. and González-Martínez, C. 2019. "Eugenol incorporation into thermoprocessed starch films using different encapsulating materials." *Food Packaging and Shelf Life*. 21 : 100326.
- [59] Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P. and Chiralt, A. 2013. "Phase transitions in starch based films containing fatty acids. Effect on water sorption and mechanical behaviour." *Food Hydrocolloids*. 30(1) : 408-418.
- [60] Pérez-Córdoba, L. J., Norton, I. T., Batchelor, H. K., Gkatzionis, K., Spyropoulos, F. and Sobral, P. J. 2018. "Physico-chemical, antimicrobial and antioxidant properties of gelatin-chitosan based films loaded with nanoemulsions encapsulating active compounds." *Food Hydrocolloids*. 79 : 544-559.
- [61] Watanabe, H., Takahashi, M., Kihara, H. and Yoshida, M. 2018. "Biobased coatings based on eugenol derivatives." *ACS Applied Bio Materials*. 1(3) : 808-813.
- [62] Zeng, F., Ma, F., Kong, F., Gao, Q. and Yu, S. 2015. "Physicochemical properties and digestibility of hydrothermally treated waxy rice starch." *Food Chemistry*, 172 : 92-98.



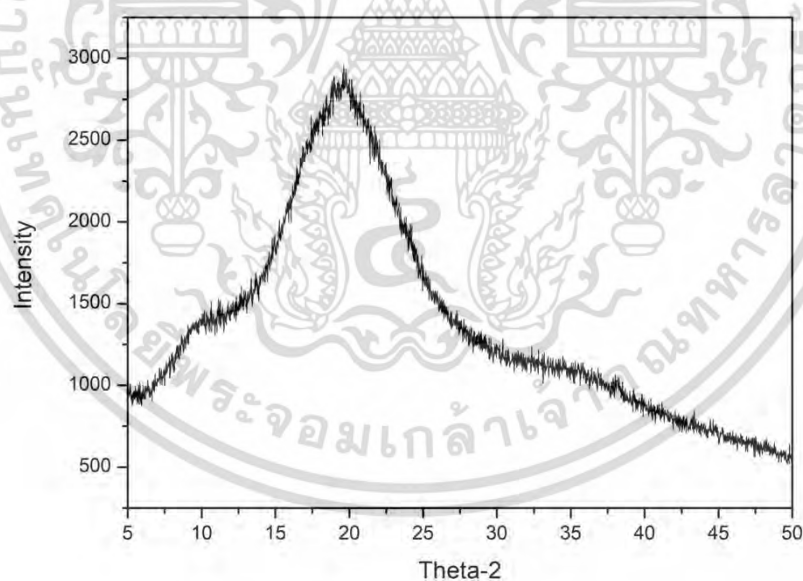
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

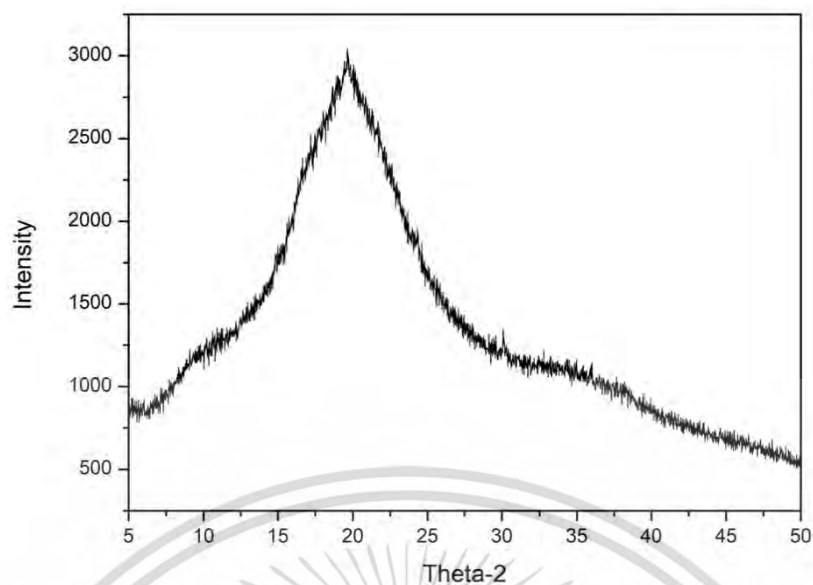


รูปที่ ก. 1 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น

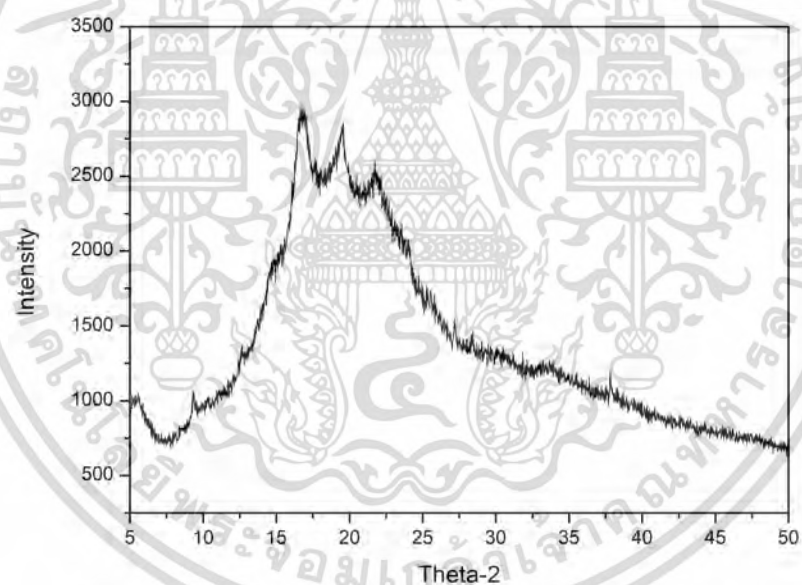


รูปที่ ก. 2 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

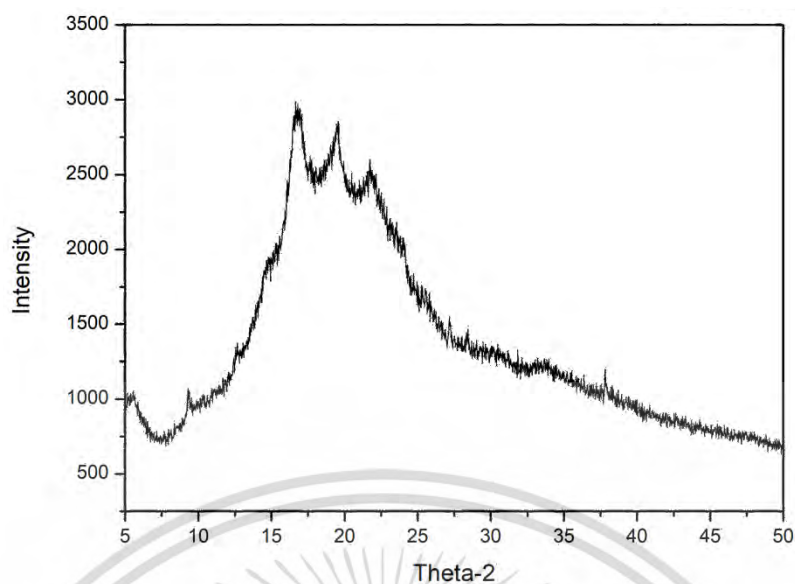


รูปที่ ก. 3 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

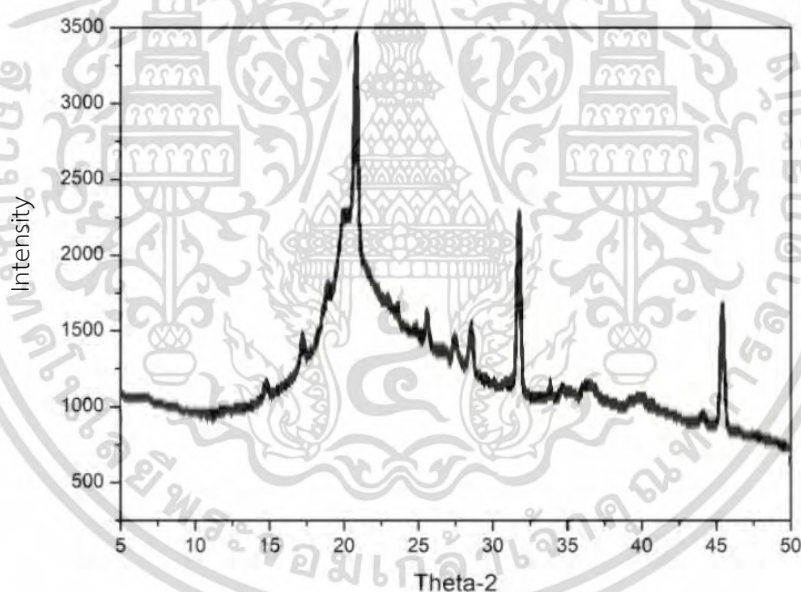


รูปที่ ก. 4 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

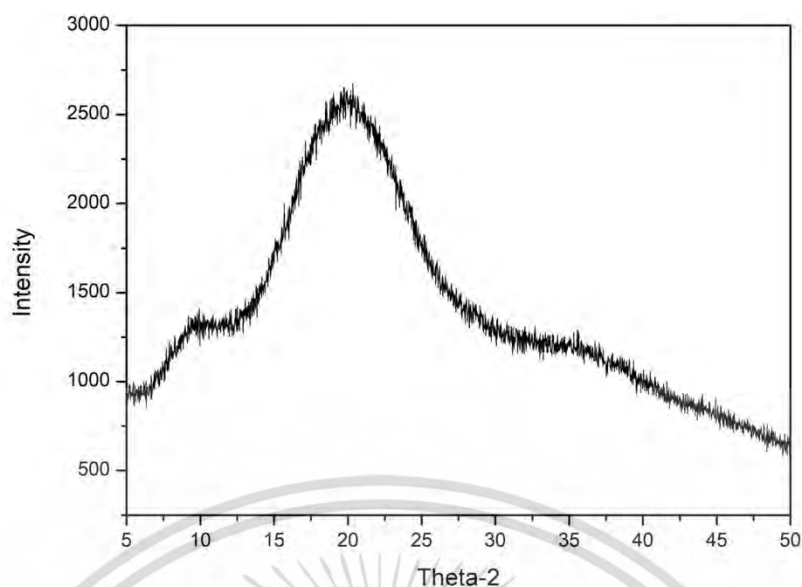


รูปที่ ก. 5 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

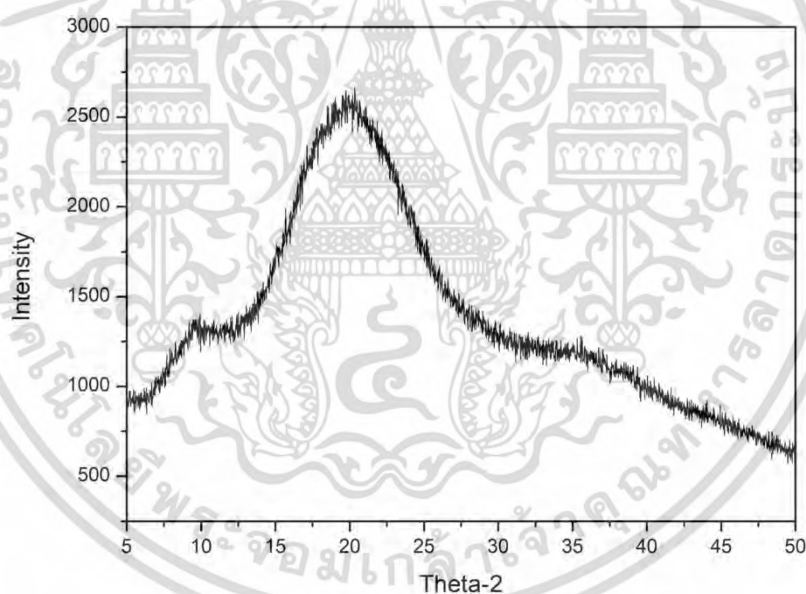


รูปที่ ก. 6 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

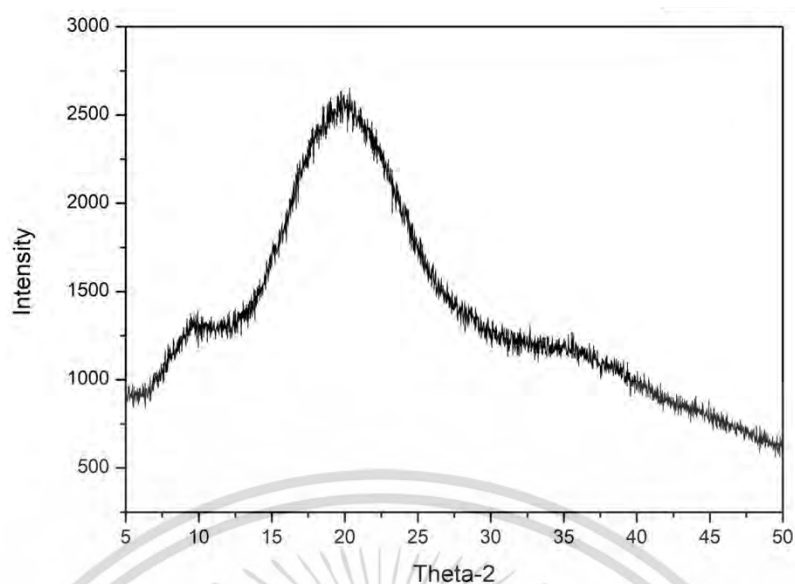


รูปที่ ก. 7 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC 5% โดยน้ำหนัก

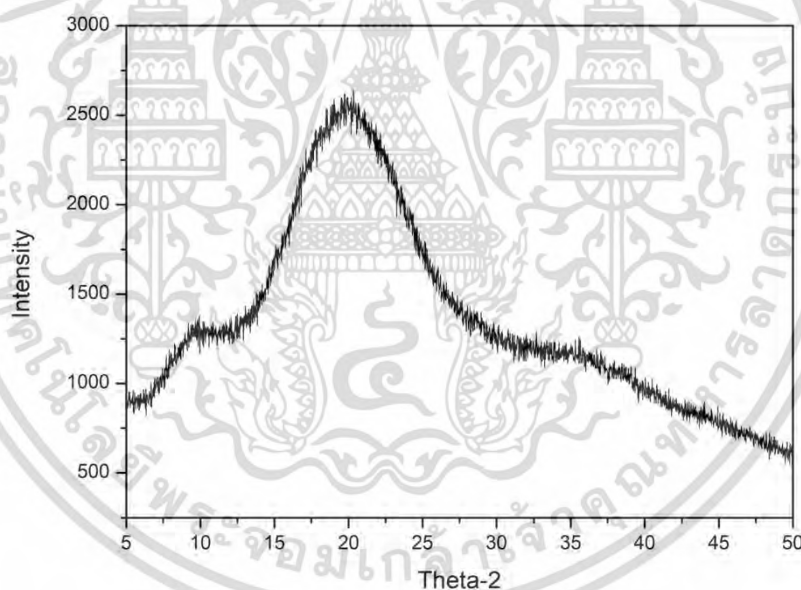


รูปที่ ก. 8 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

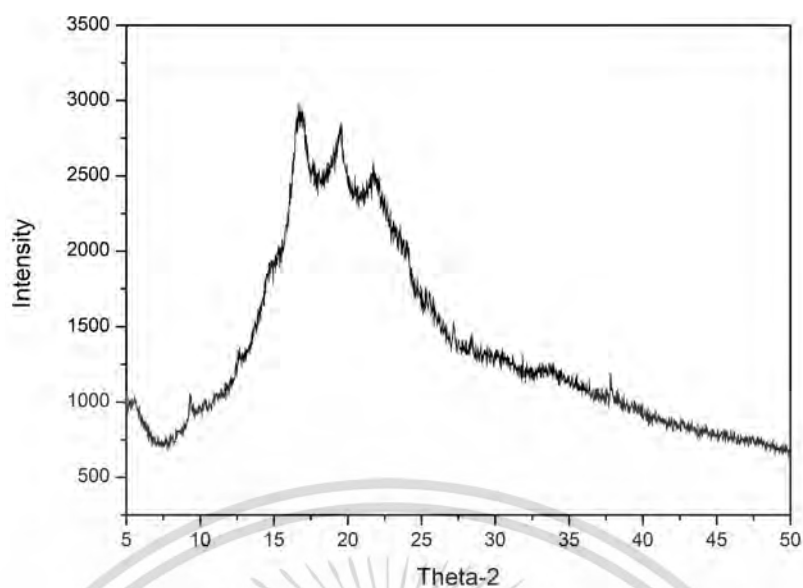


รูปที่ ก. 9 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC 15% โดยน้ำหนัก

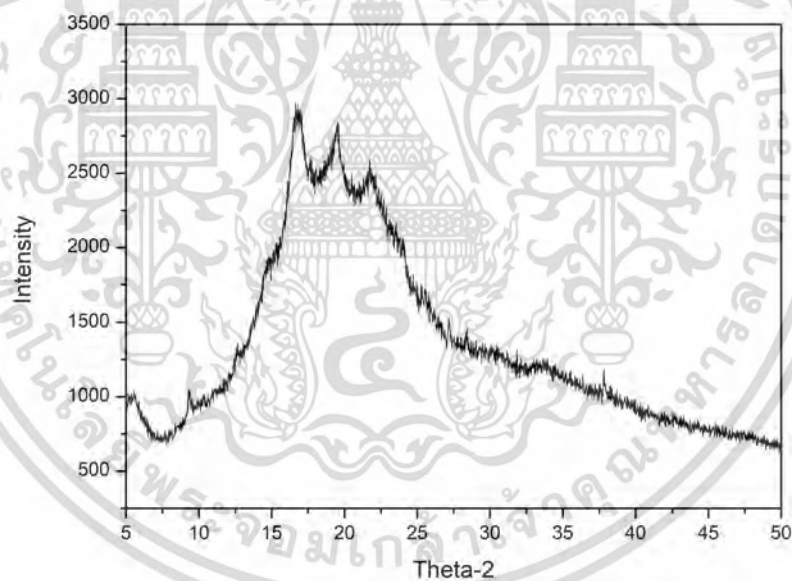


รูปที่ ก. 10 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

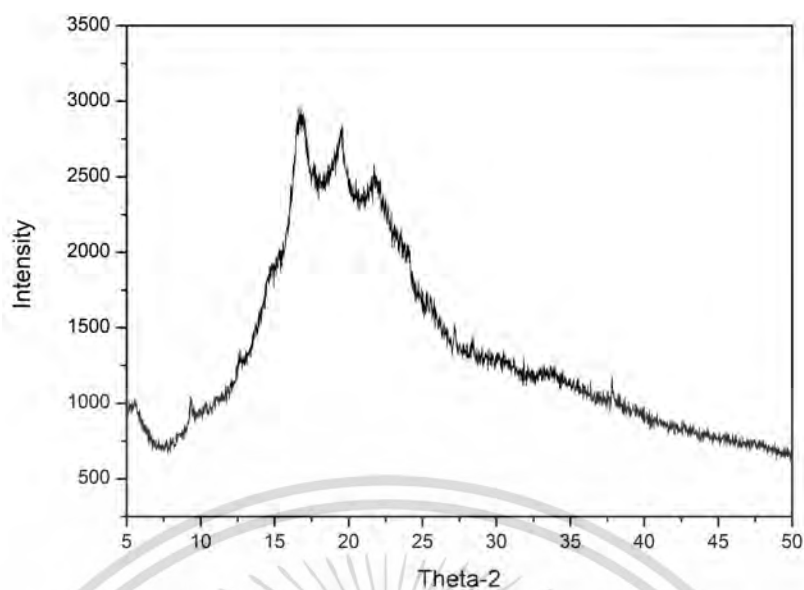


รูปที่ ก. 11 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 5% โดยน้ำหนัก

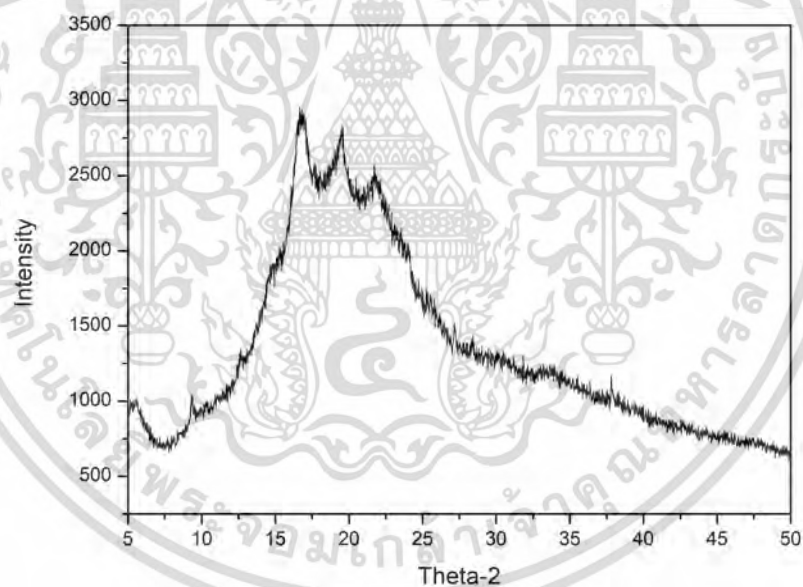


รูปที่ ก. 12 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

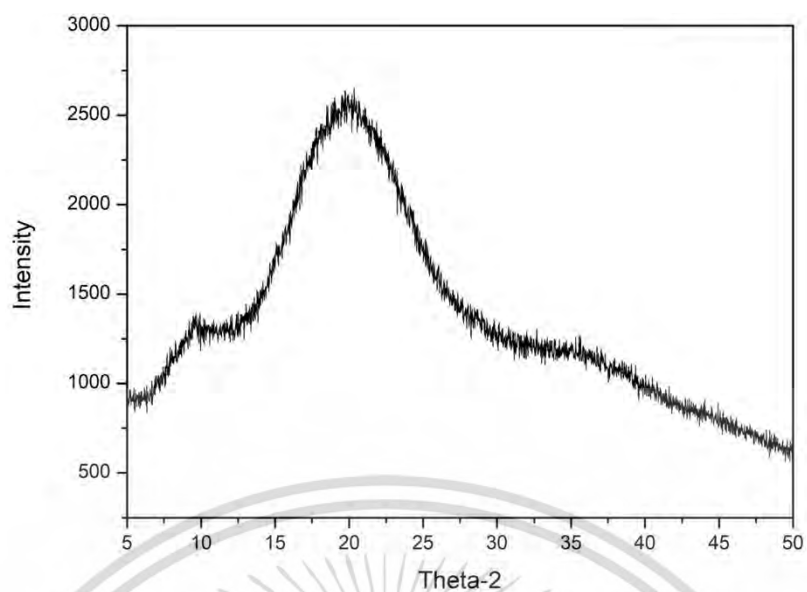


รูปที่ ก. 13 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 15% โดยน้ำหนัก

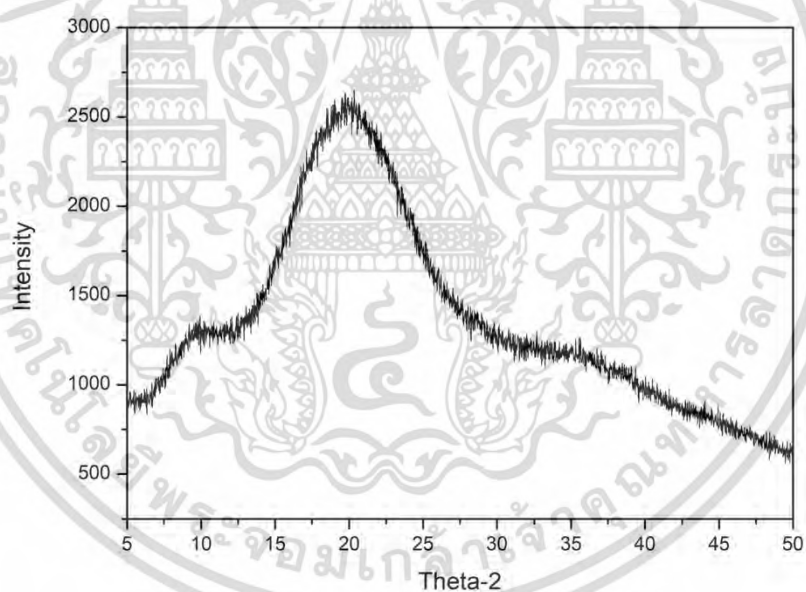


รูปที่ ก. 14 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

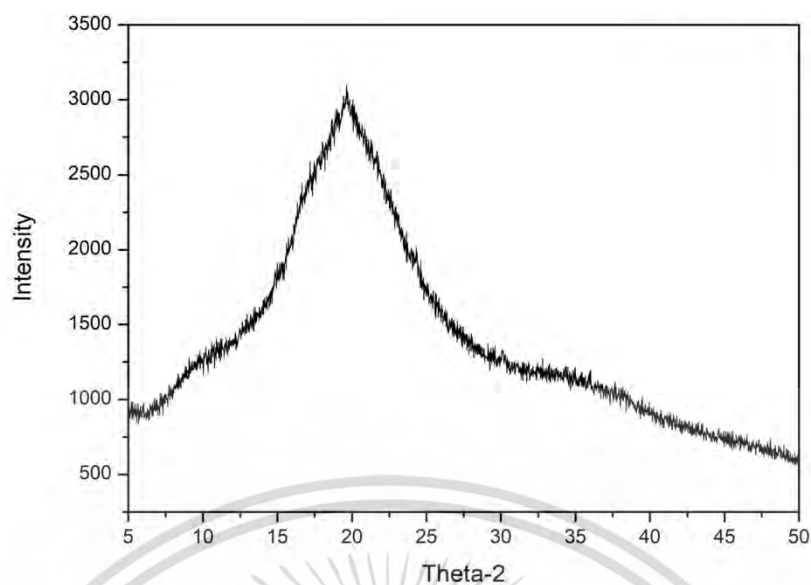


รูปที่ ก. 15 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 2%

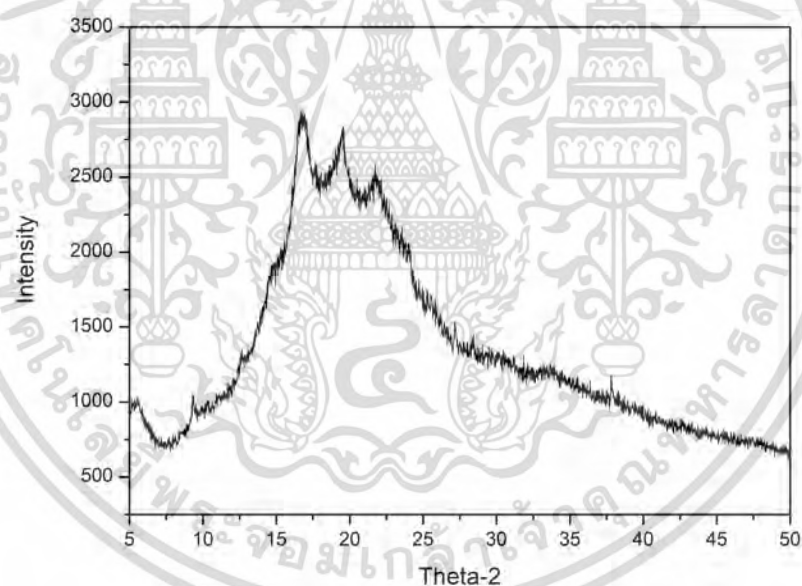


รูปที่ ก. 16 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

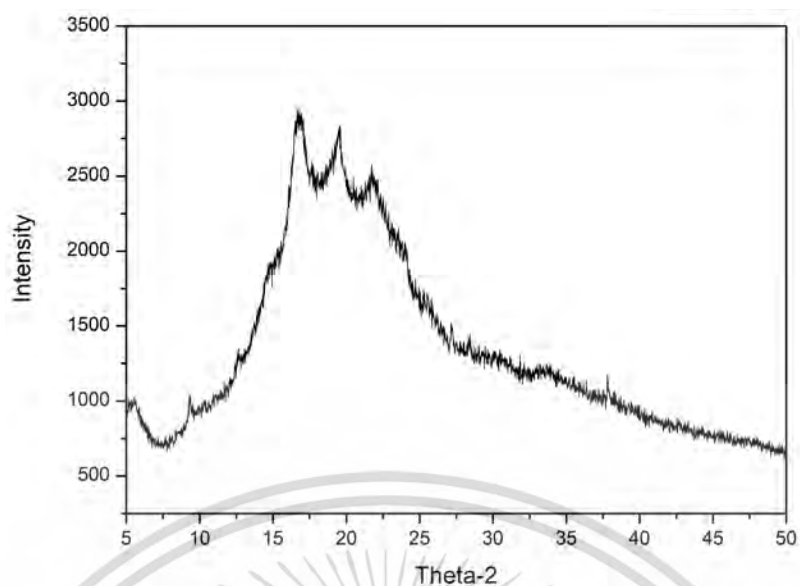


รูปที่ ก. 17 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 4%

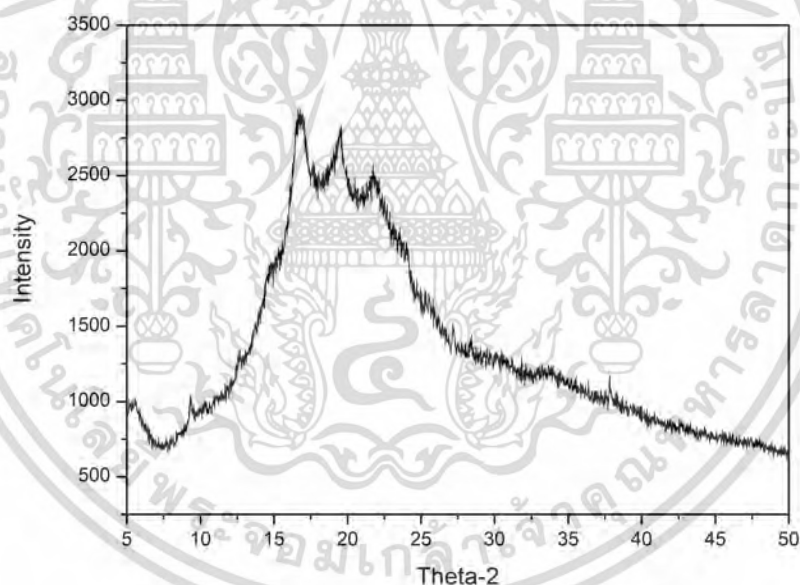


รูปที่ ก. 19 ดิฟแฟร็กโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



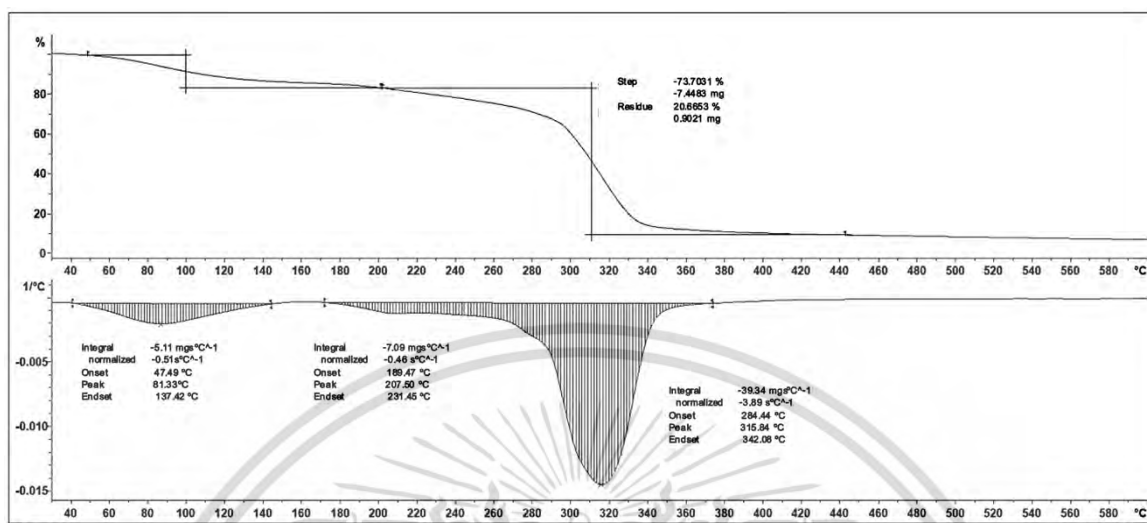
รูปที่ ก. 19 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 3%



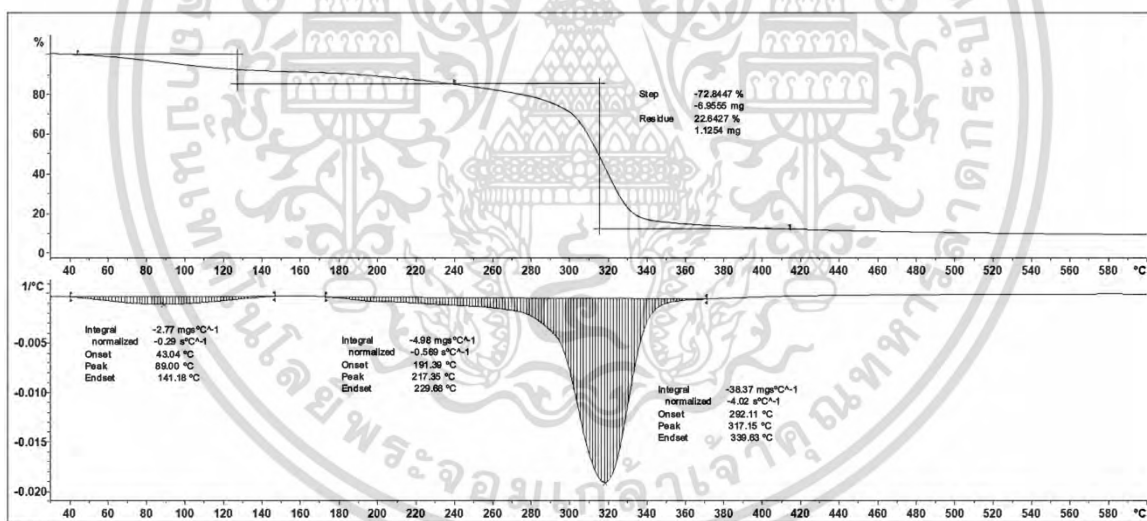
รูปที่ ก. 20 ดิฟแฟรกโทแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนั และยูจินอล 4%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

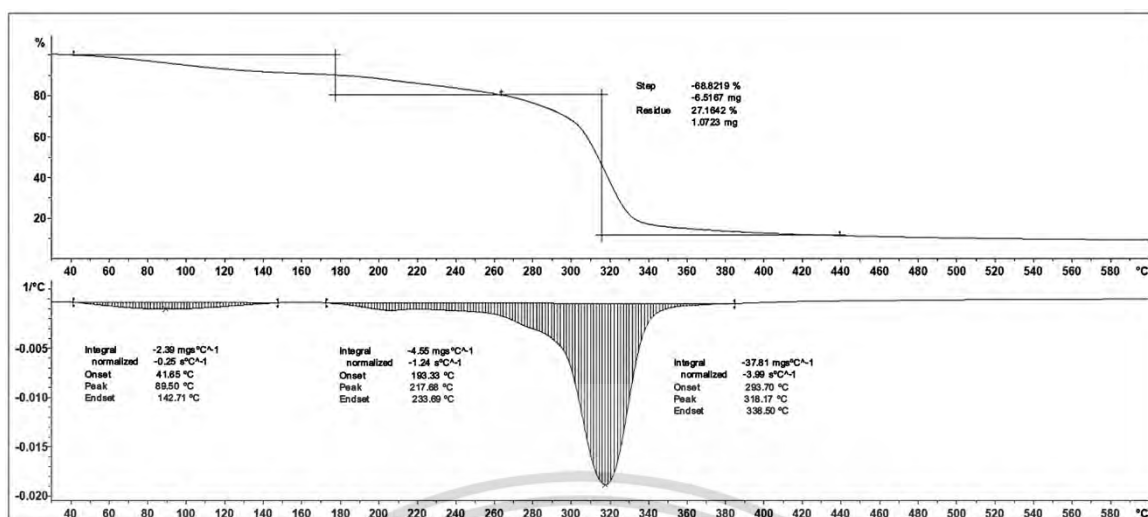


รูปที่ ข. 1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

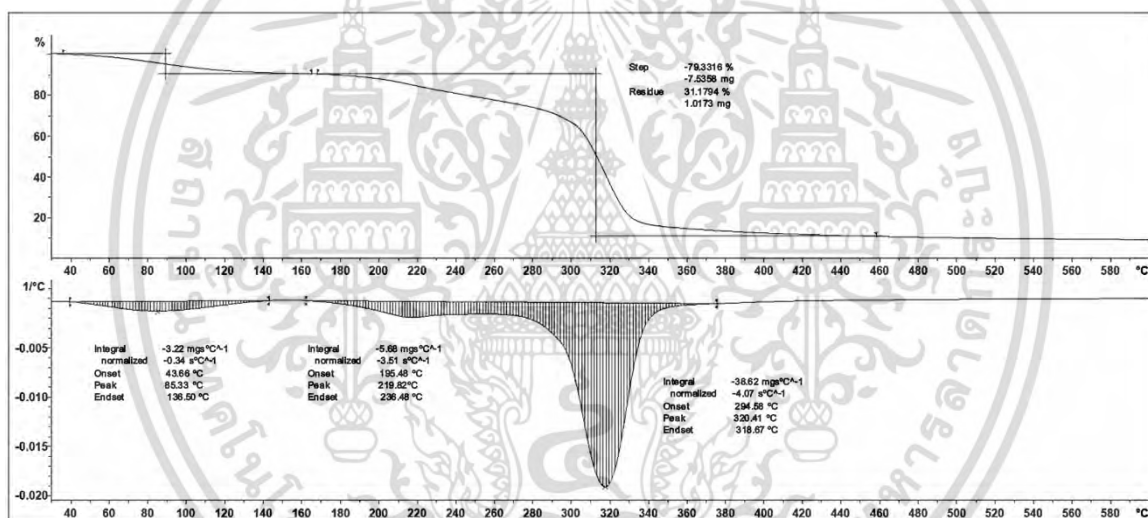


รูปที่ ข. 2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

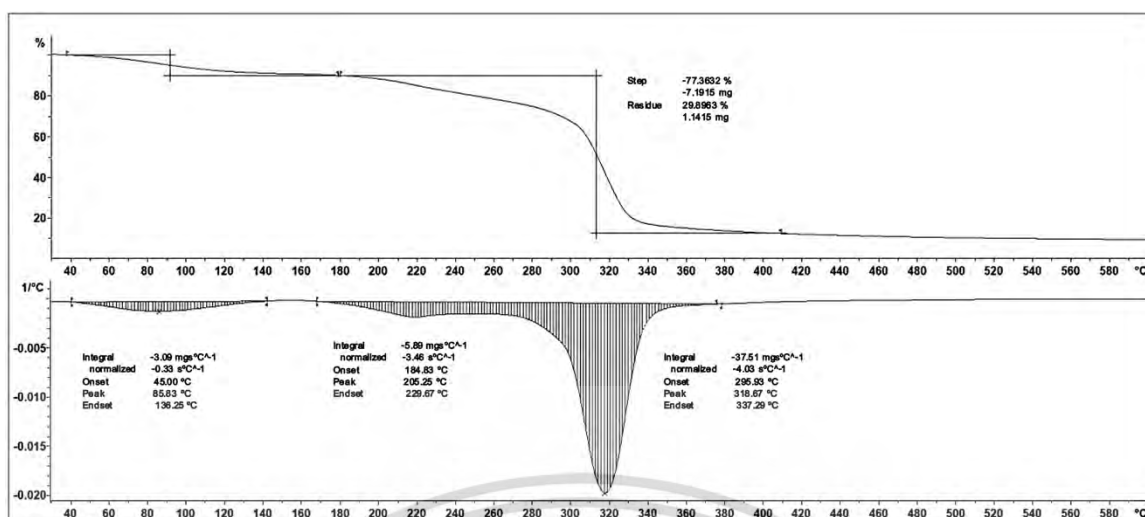


รูปที่ ข. 3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

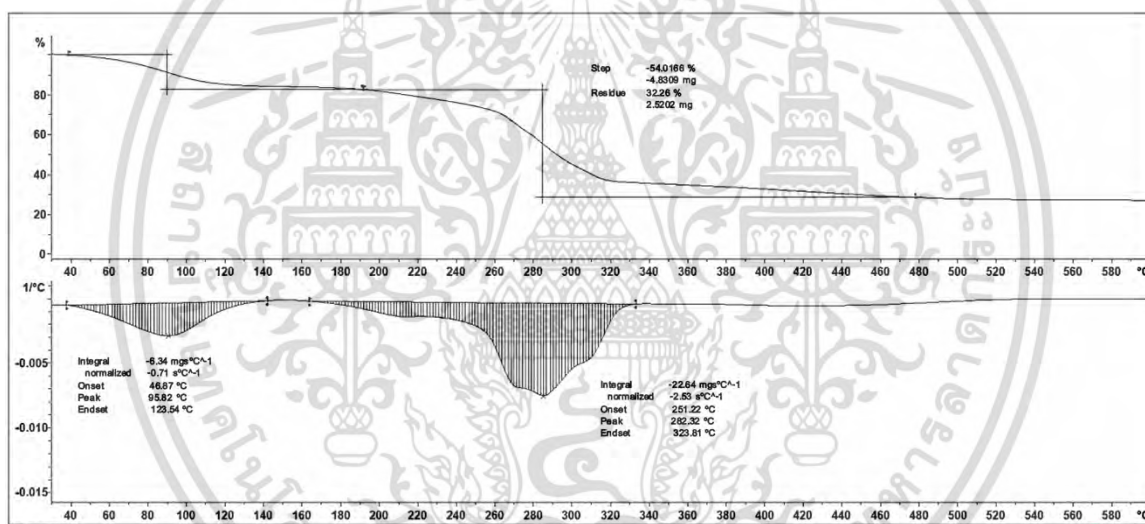


รูปที่ ข. 4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

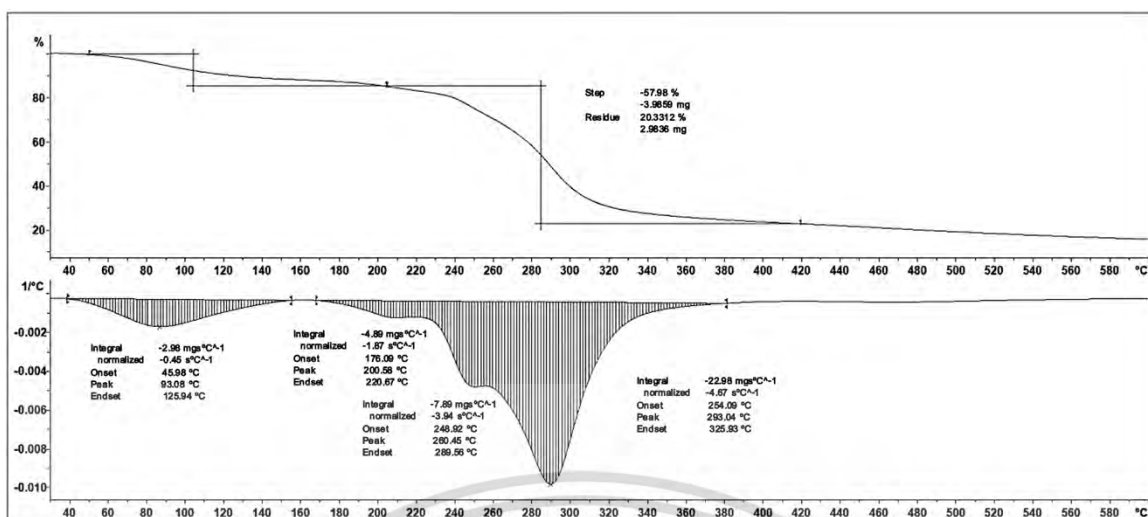


รูปที่ ข. 5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

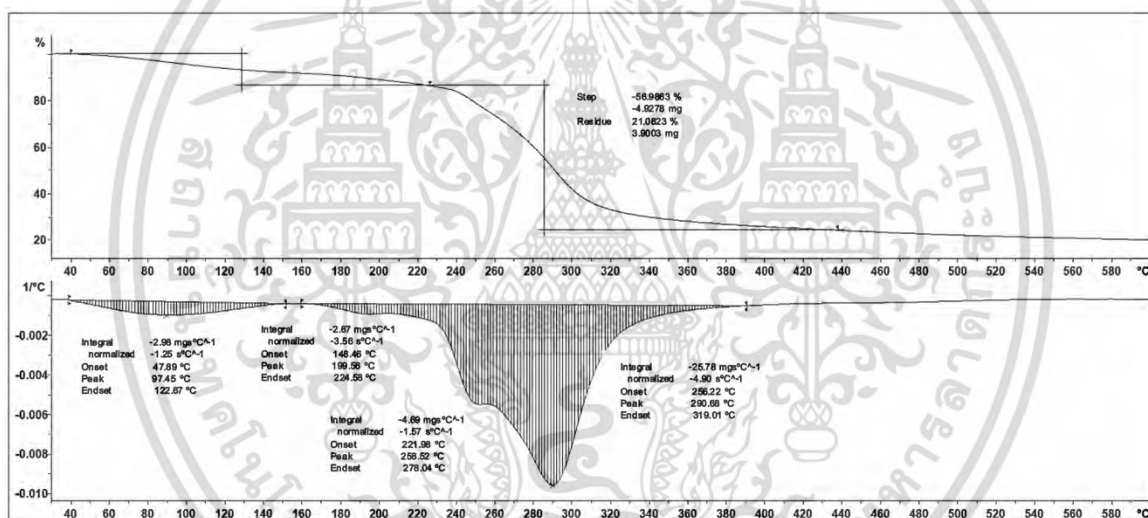


รูปที่ ก. 6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

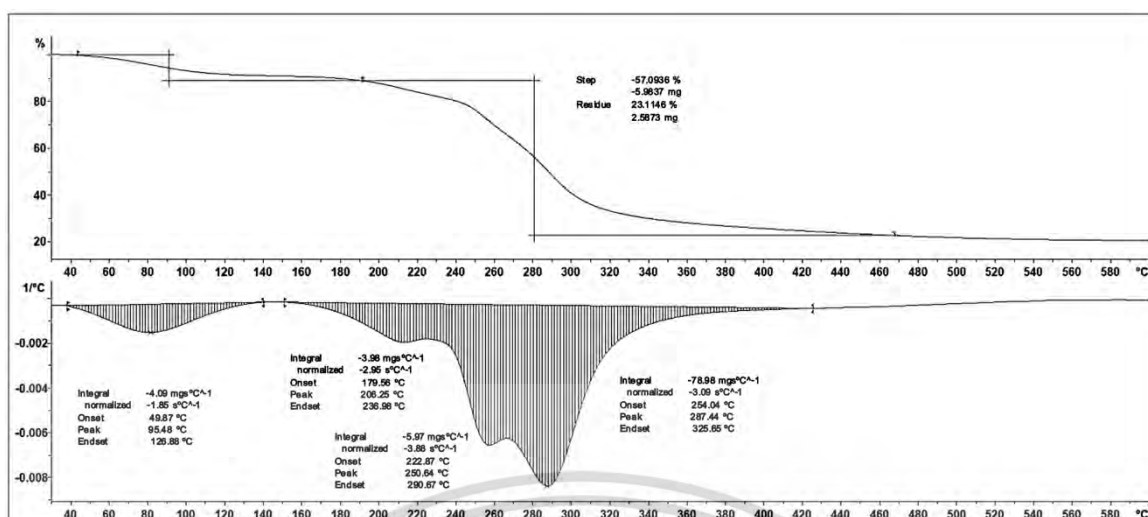


รูปที่ ข. 7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเติม CMC 5% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

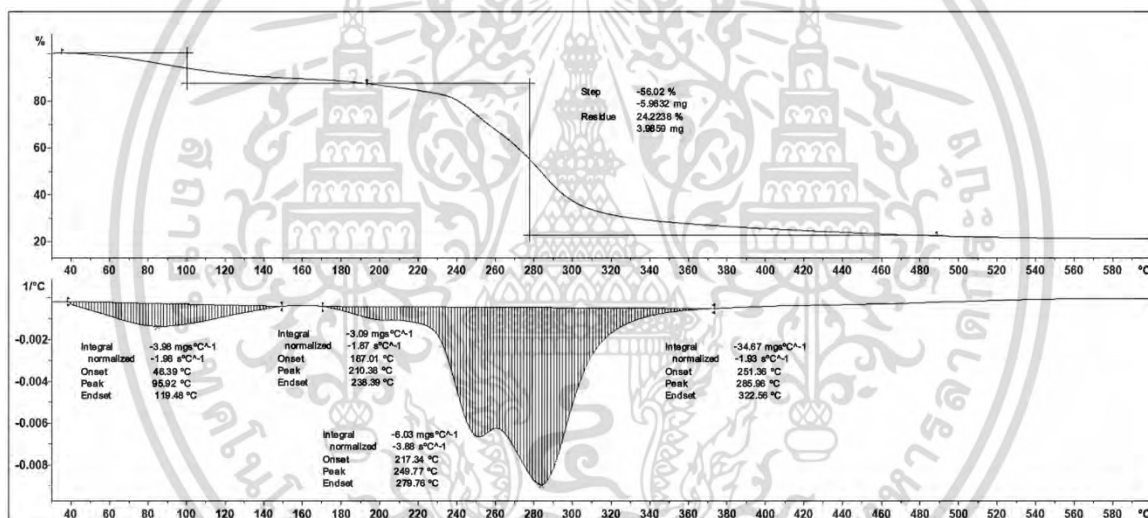


รูปที่ ข. 8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเติม CMC 10% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

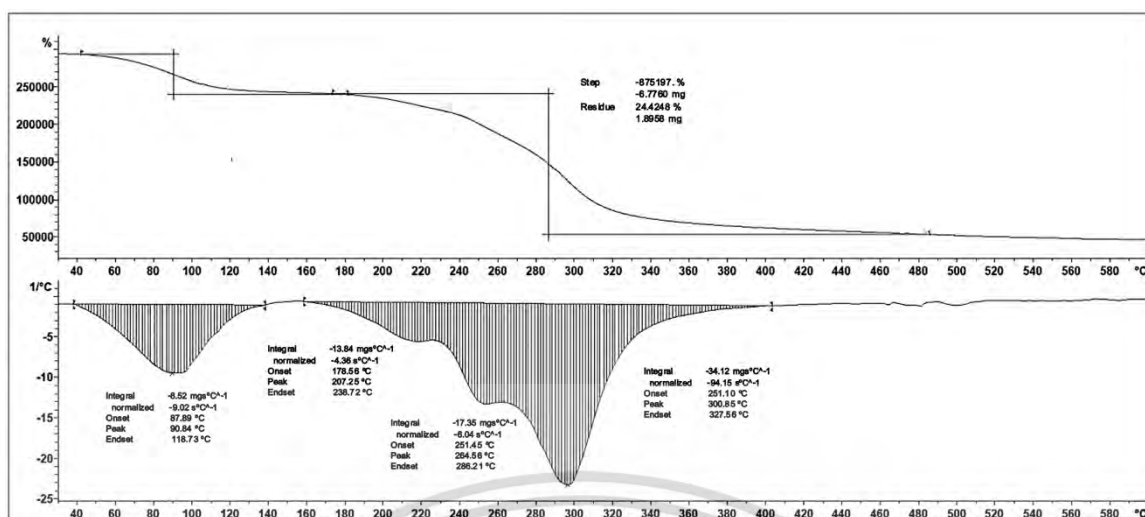
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



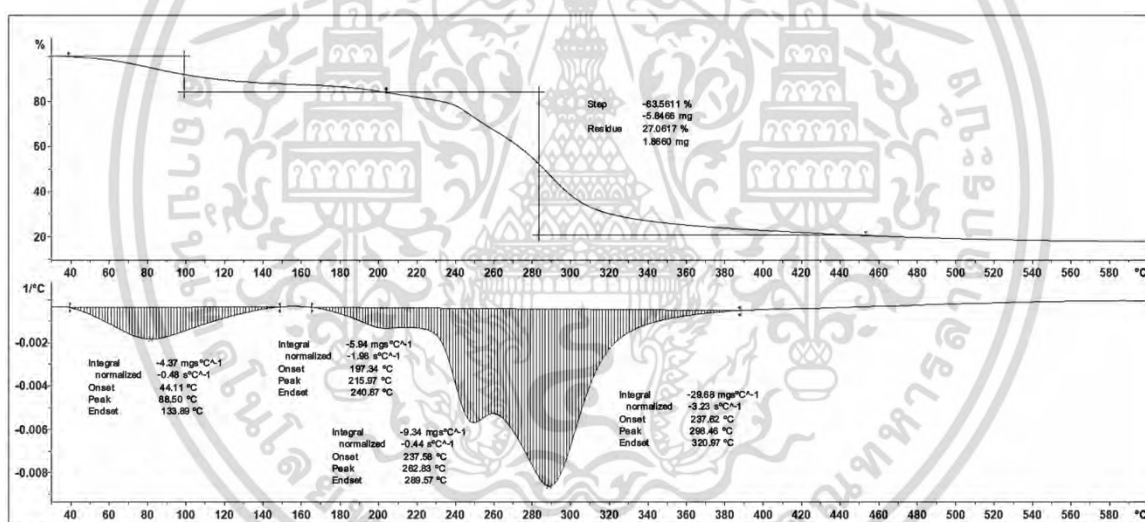
รูปที่ ข. 9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเติม CMC 15% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



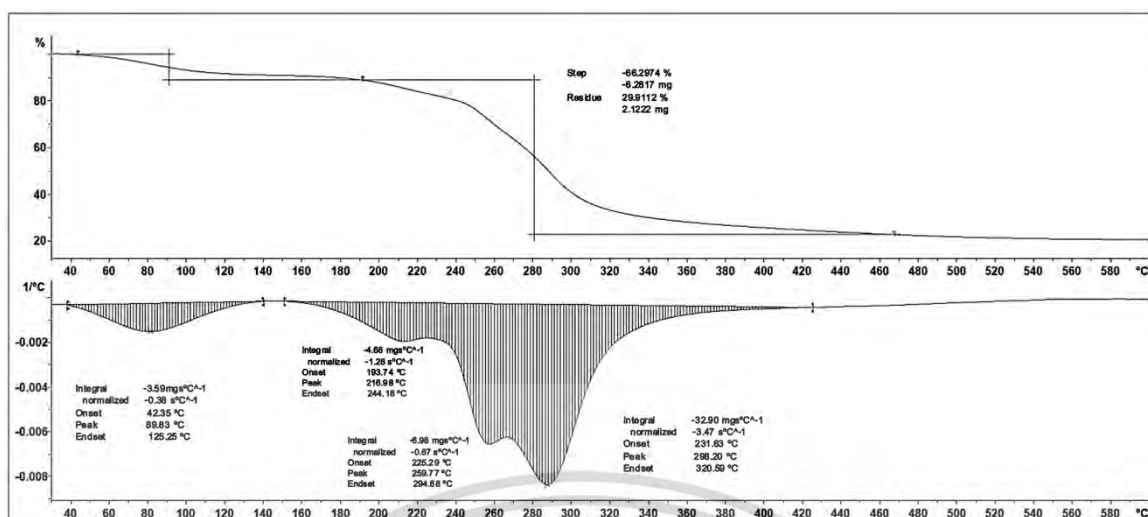
รูปที่ ข. 10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเติม CMC 20% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



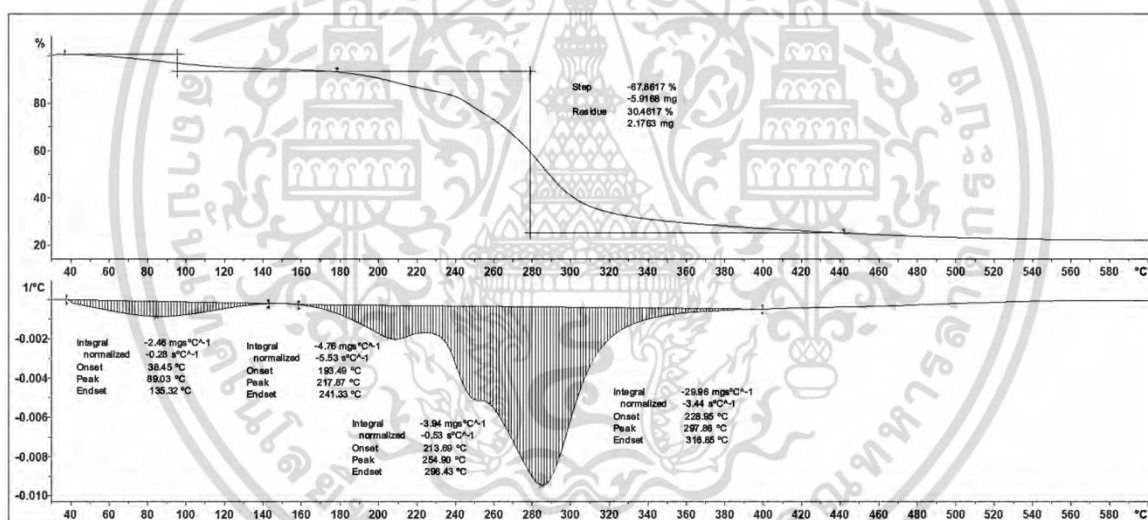
รูปที่ ข. 11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 5% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



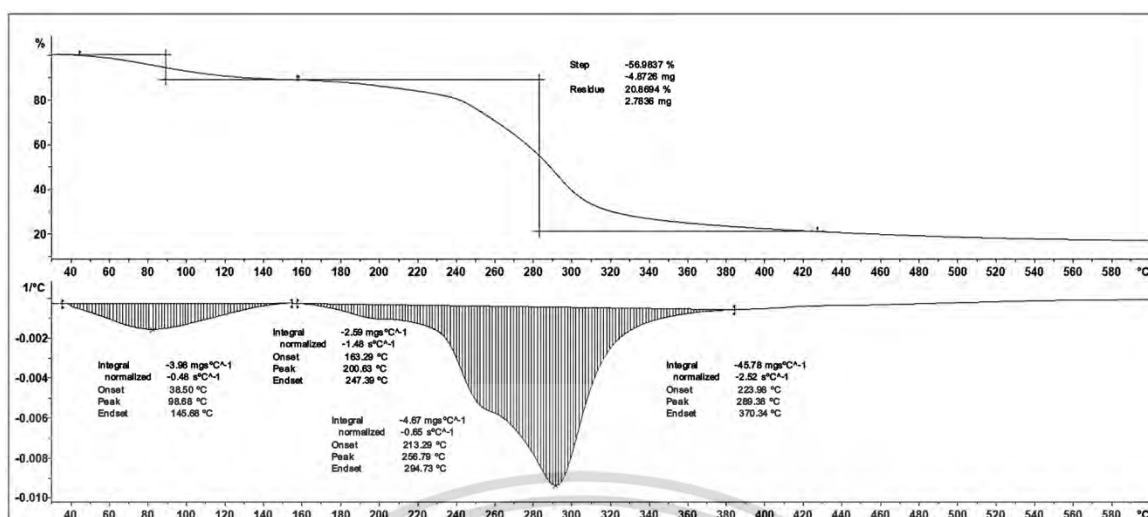
รูปที่ ข. 12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 10% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



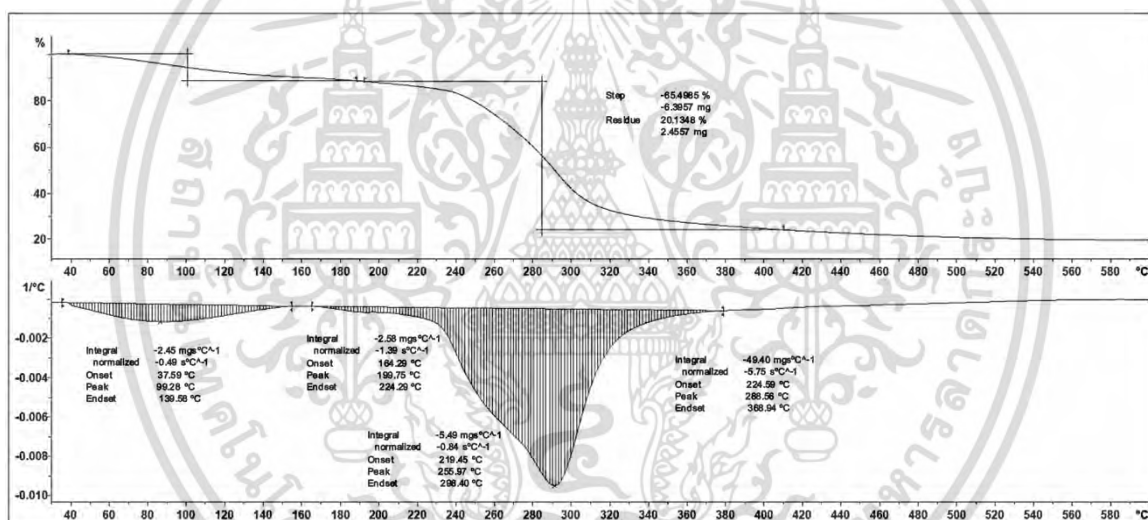
รูปที่ ข. 13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 15% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



รูปที่ ข. 14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC 20% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

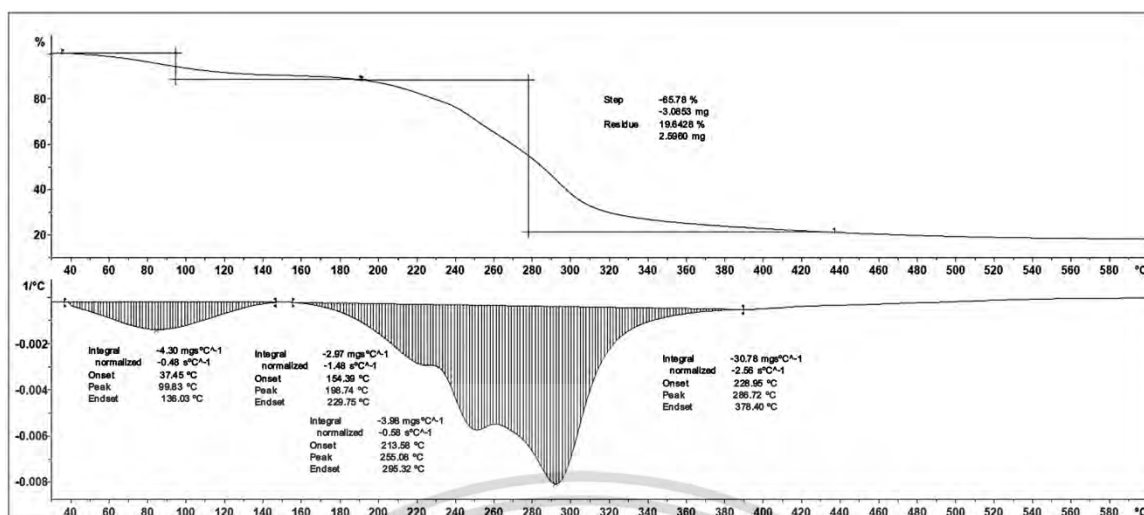


รูปที่ ข. 15 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร เติม CMC 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอล 2% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

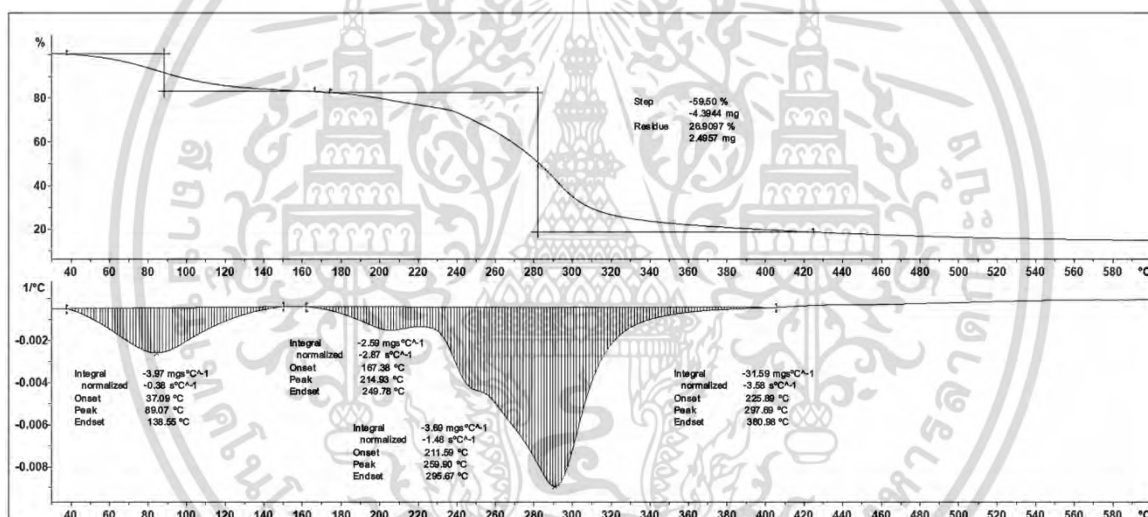


รูปที่ ข. 16 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร เติม CMC 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอล 3% โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

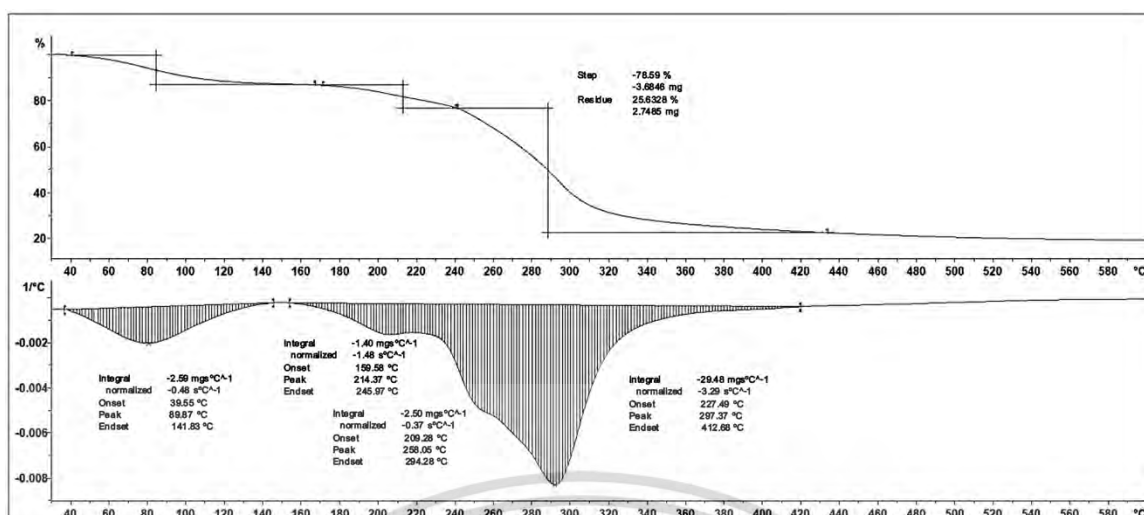
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



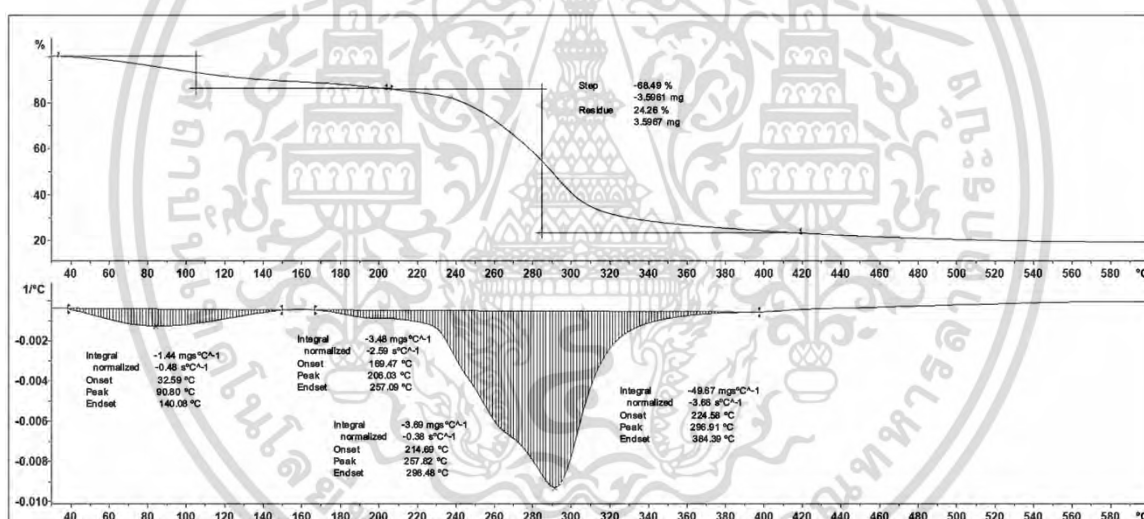
รูปที่ ข. 17 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร เติม CMC 10% โดยน้ำหนักรวม และยูจินอล 4% โดยน้ำหนักรวม โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C



รูปที่ ข. 18 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนักรวม และยูจินอล 2% โดยน้ำหนักรวม โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

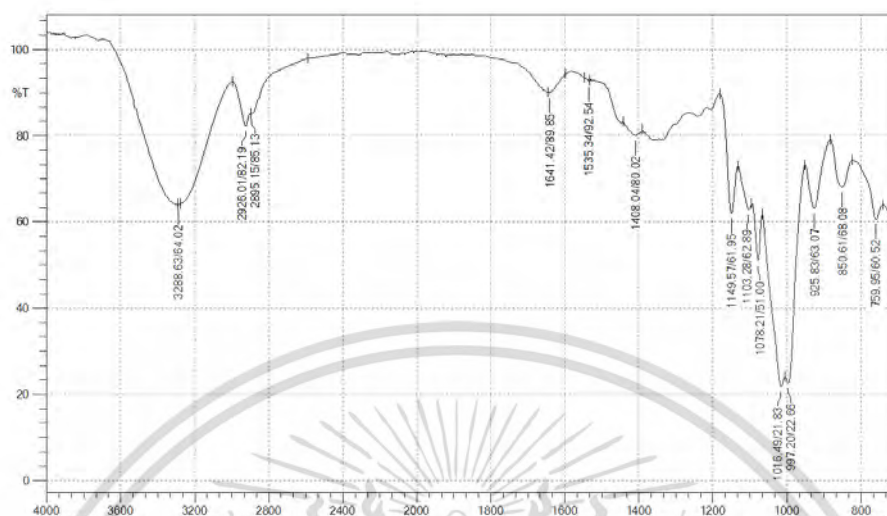


รูปที่ ข. 19 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอล 3% โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

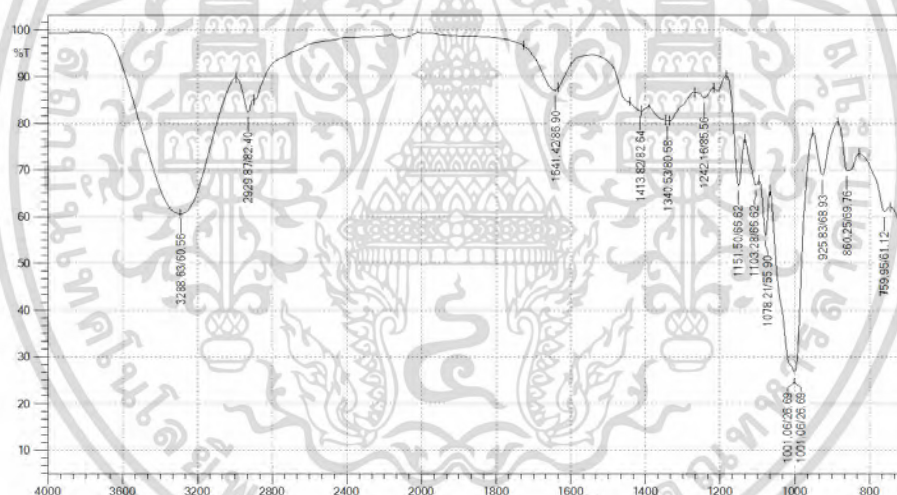


รูปที่ ข. 20 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติม CMC 10% โดยน้ำหนัก และยูจินอล 4% โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิสูงสุด 600°C

ภาคผนวก ค.

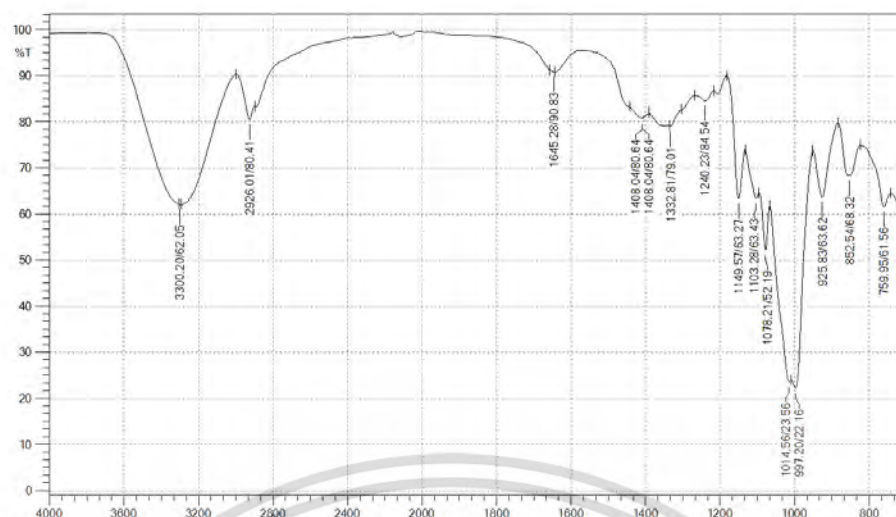


รูปที่ ค. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป

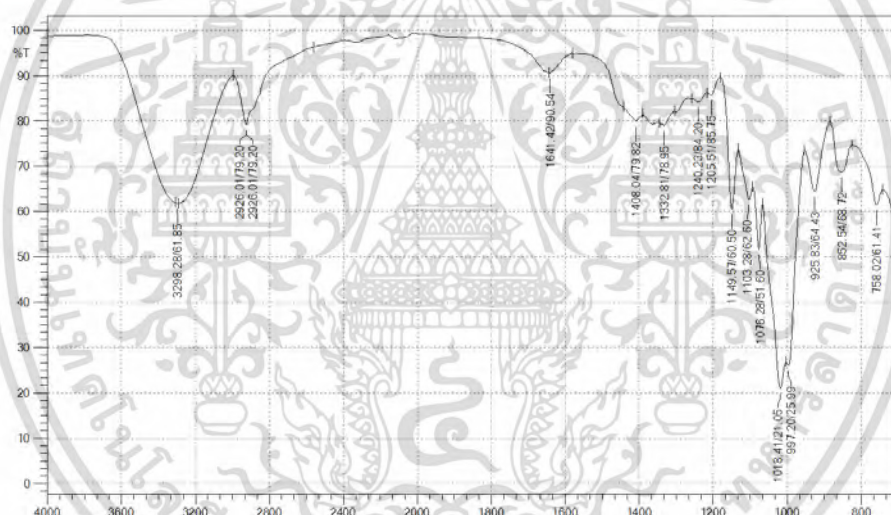


รูปที่ ค. 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยวิธีการใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

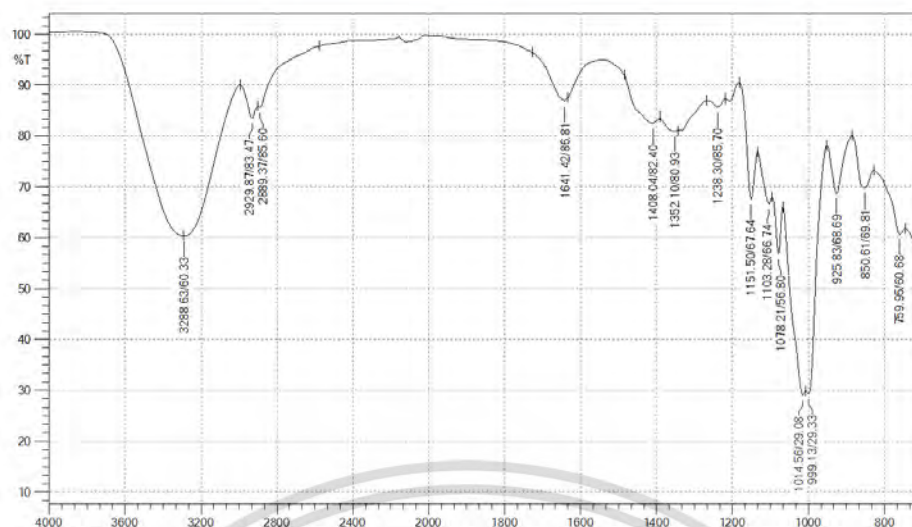


รูปที่ ค. 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

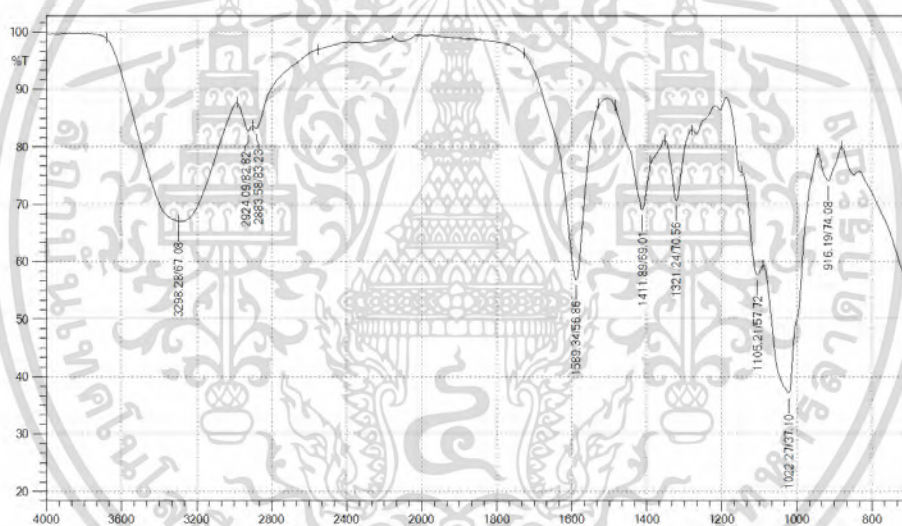


รูปที่ ค. 4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

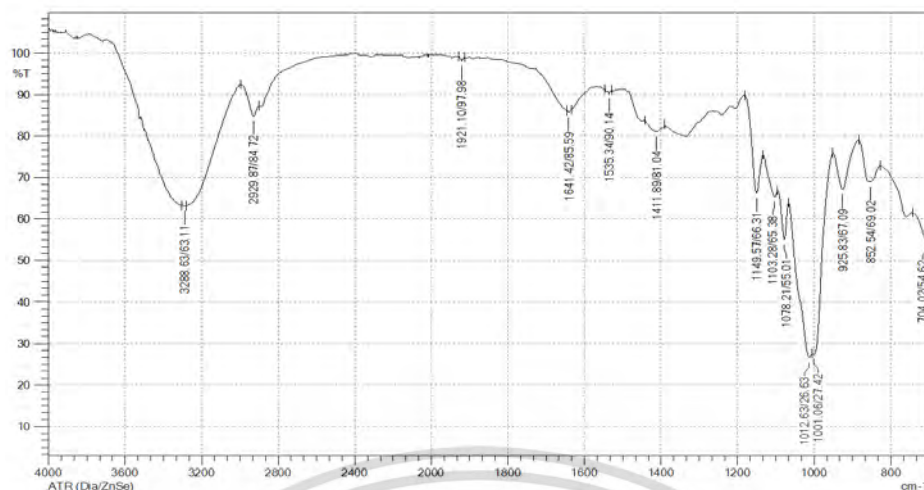


รูปที่ ค. 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ค. 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

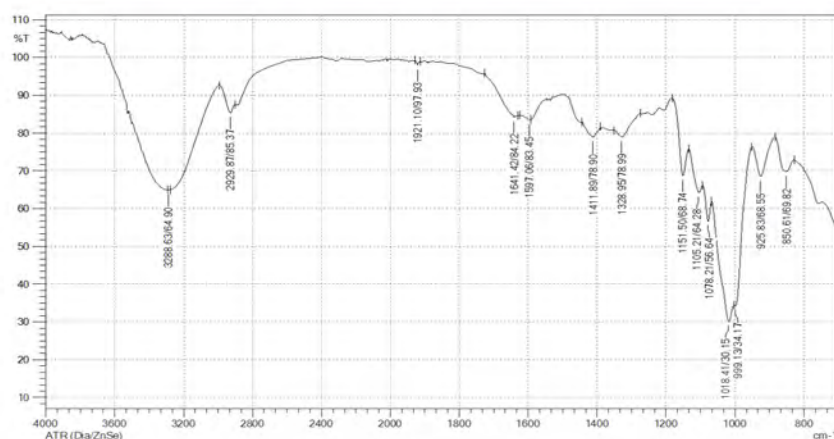


รูปที่ ค. 7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

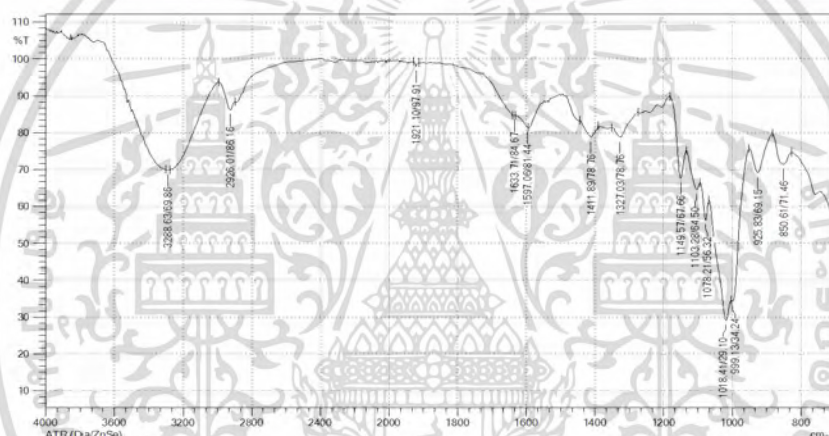


รูปที่ ค. 8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

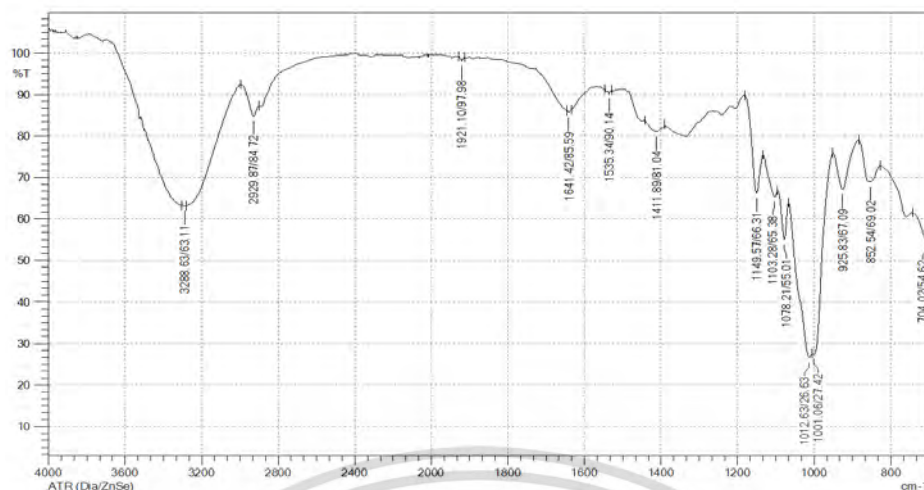


รูปที่ ค. 9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

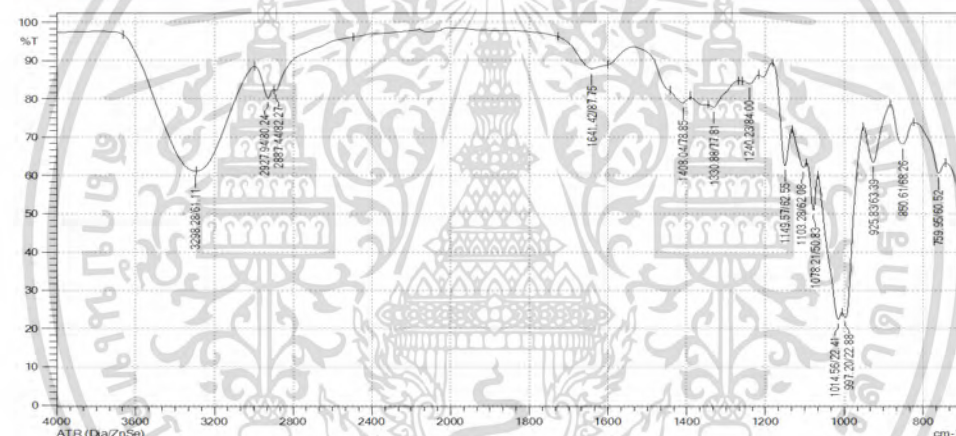


รูปที่ ค. 10 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

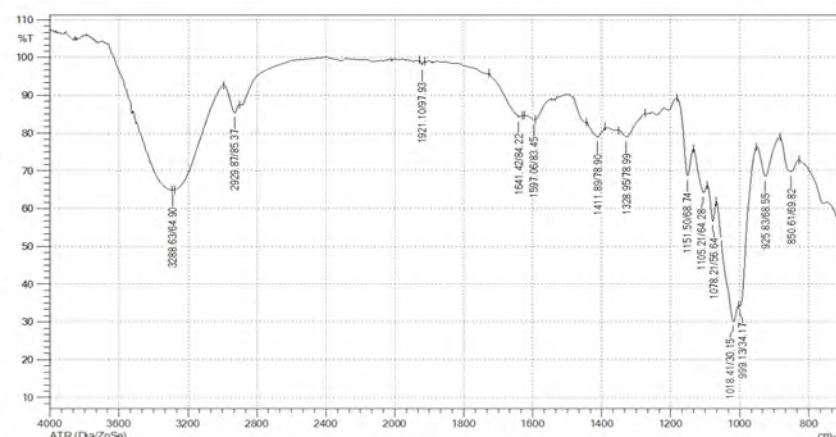


รูปที่ ค. 11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

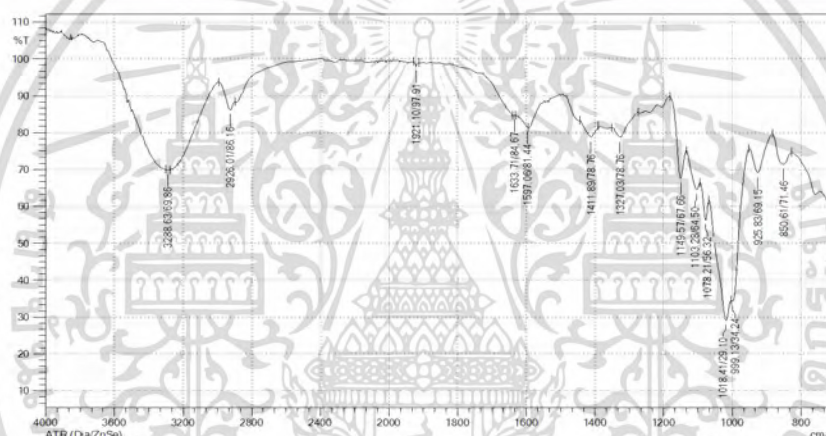


รูปที่ ค. 12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

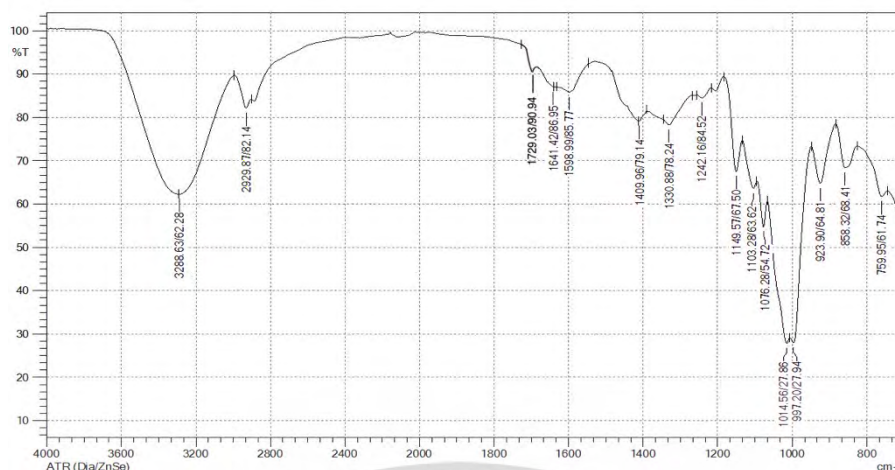


รูปที่ ค. 13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

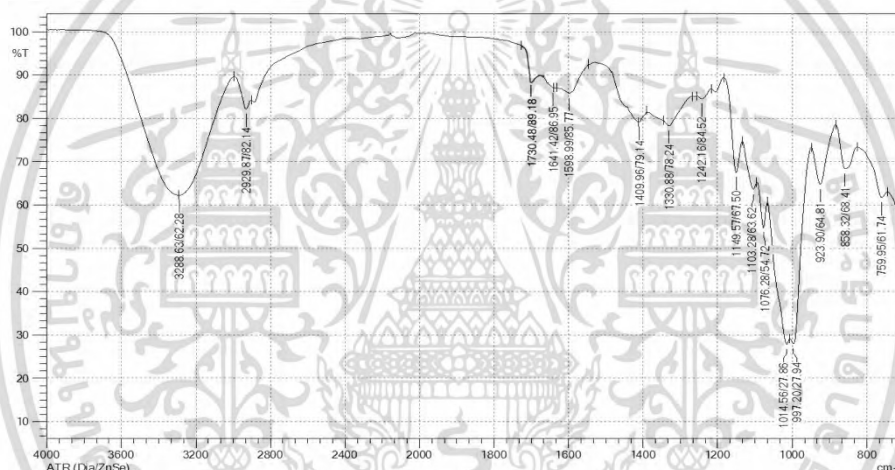


รูปที่ ค. 14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นและปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

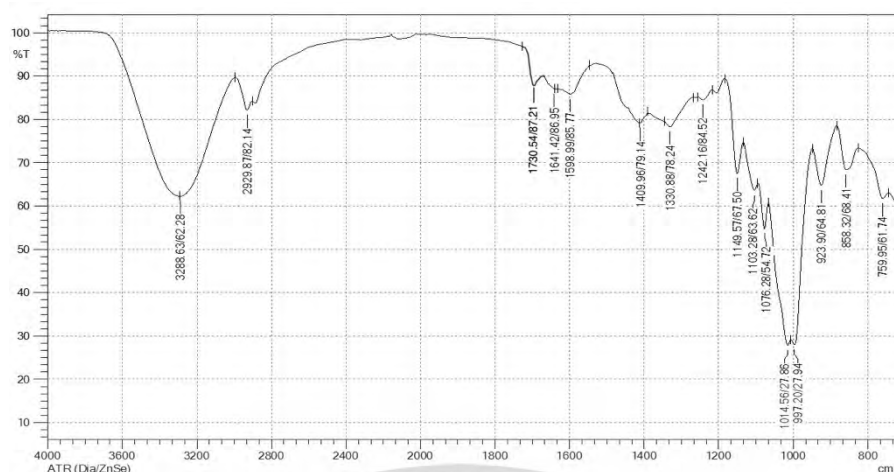


รูปที่ ค. 15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 2% โดยน้ำหนัก

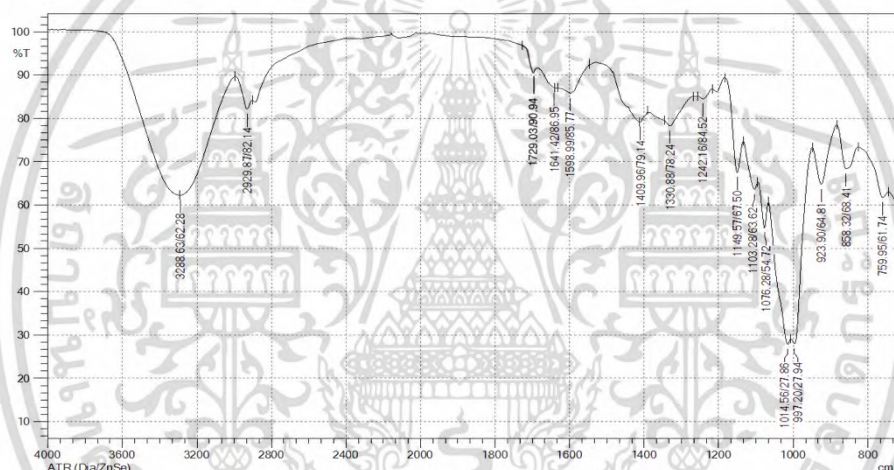


รูปที่ ค. 16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 3% โดยน้ำหนัก

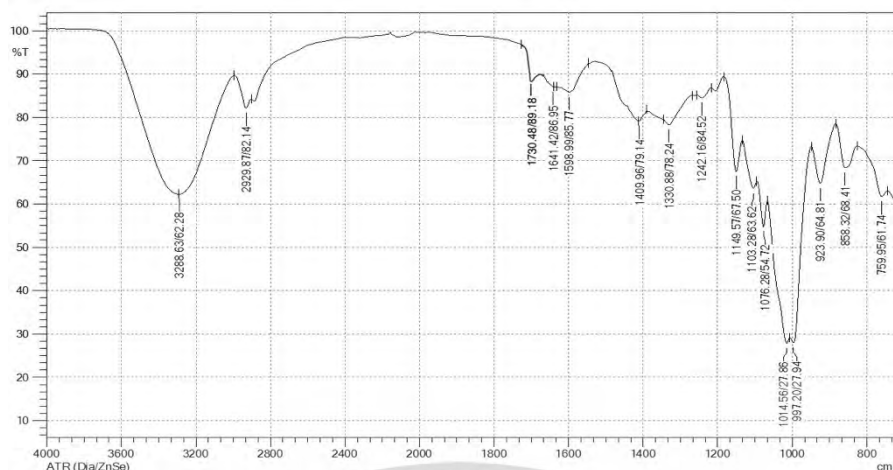
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



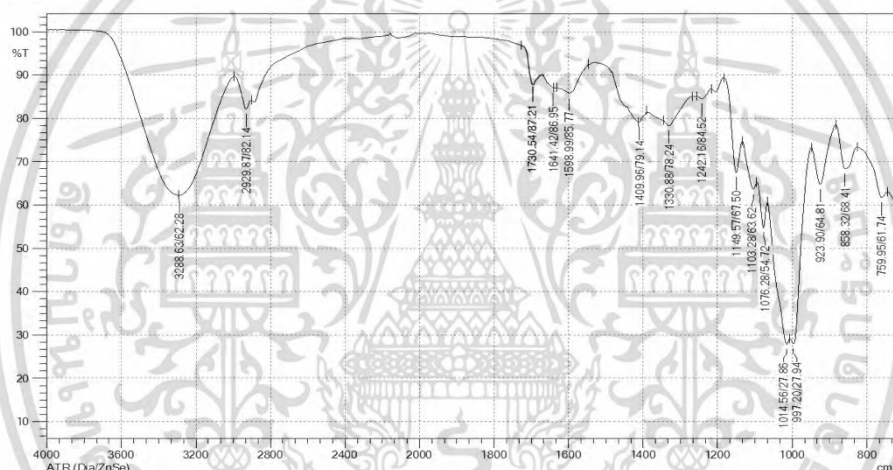
รูปที่ ค. 17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 4% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค. 18 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 2% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค. 19 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 3% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค. 20 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยูจินอล 4% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ตารางที่ ง. 1 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

เวลา (hr.)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)				
	NS	HMT110- 1	HMT110- 2	HMT120- 1	HMT120- 2
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	123.21	91.95	81.18	56.82	74.88
2	125.94	94.82	83.47	60.12	77.61
3	128.13	96.17	86.77	63.41	81.43
4	130.98	99.01	87.33	67.69	83.25
5	134.47	100.24	89.97	70.28	87.33
6	138.03	101.35	91.11	72.78	92.19
24	135.07	99.48	89.93	71.23	90.08
48	129.14	95.06	87.12	69.98	88.24
72	119.87	93.68	83.55	66.14	85.63

ตารางที่ ง. 2 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก

เวลา (hr.)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)				
	NS	NS -5%CMC	NS -10%CMC	NS -15%CMC	NS -20%CMC
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	123.21	105.26	102.32	99.26	96.26
2	125.94	107.32	104.26	101.32	97.99
3	128.13	110.04	107.08	103.99	100.23
4	130.98	112.03	110.36	106.32	102.88
5	134.47	114.22	112.44	108.36	104.59
6	138.03	116.39	114.27	109.98	106.39
24	135.07	116.03	113.98	109.26	106.98
48	129.14	115.23	113.03	109.54	108.53
72	119.87	114.32	112.65	108.67	108.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง. 3 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก

เวลา (hr.)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)				
	HMT120-1	HMT120-1- 5%CMC	HMT120-1- 10%CMC	HMT120-1- 15%CMC	HMT120-1- 20%CMC
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	74.88	56.88	55.96	51.39	48.42
2	77.61	57.72	56.12	54.44	49.47
3	81.43	59.95	57.03	55.83	51.72
4	83.25	61.43	58.13	57.91	52.83
5	87.33	63.47	59.87	58.73	54.61
6	92.19	65.32	61.44	60.46	57.25
24	90.08	64.25	63.18	62.87	56.47
48	88.24	62.01	62.99	61.88	55.63
72	85.63	61.57	61.04	60.27	54.87

ตารางที่ ง. 4 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก

เวลา (hr.)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)			
	NS-10%CMC	NS-10%CMC - 2Eu	NS-10%CMC - 3Eu	NS-10%CMC - 4Eu
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	102.32	50.83	49.88	48.78
2	104.26	51.92	50.13	49.92
3	107.08	52.47	51.87	50.75
4	110.36	53.64	52.44	51.61
5	112.44	54.03	53.36	52.98
6	114.27	55.17	54.23	53.89
24	113.98	54.24	53.98	52.94
48	113.03	53.16	52.86	51.23
72	112.65	52.73	51.63	50.47

ตารางที่ ง. 5 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก

เวลา (hr.)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%)			
	HMT120-1- 10CMC	HMT120-1- 10CMC-2Eu	HMT120-1- 10CMC-3Eu	HMT120-1- 10CMC-4Eu
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	123.21	50.83	49.88	48.99
2	125.94	51.92	50.13	49.92
3	128.13	52.47	51.87	50.75
4	130.98	53.64	52.44	51.61
5	134.47	54.03	53.36	52.98
6	138.03	55.17	54.23	53.89
24	135.07	54.24	53.98	52.94
48	129.14	53.16	52.86	51.23
72	119.87	52.73	51.63	50.47

ภาคผนวก จ.

ตารางที่ จ. 1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	NS	HMT110-1	HMT110-2	HMT120-1	HMT120-2
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	33.93	26.21	21.44	16.48	19.89
2	36.24	28.48	23.54	22.89	23.48
3	43.19	30.53	25.70	26.14	26.01
4	49.74	32.59	28.73	27.66	29.54
5	65.16	40.99	38.69	37.87	39.83
6	68.28	42.87	39.11	38.97	42.14
7	70.53	43.33	40.03	39.87	42.43
8	72.03	44.87	41.34	40.53	44.12

ตารางที่ จ. 2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	NS	NS 5%CMC	NS 10%CMC	NS 15%CMC	NS 20%CMC
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	33.93	15.92	14.89	13.01	11.46
2	36.24	16.32	16.02	14.97	12.12
3	43.19	19.55	18.74	16.53	14.32
4	49.74	28.34	21.32	18.97	16.59
5	65.16	30.15	29.85	27.52	24.02
6	68.28	31.83	30.53	28.03	25.27
7	70.53	32.44	31.24	29.14	26.05
8	72.03	33.59	32.69	30.58	27.08

ตารางที่ จ. 3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชั้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	HMT120-1	HMT120-1- 5%CMC	HMT120-1- 10%CMC	HMT120-1- 15%CMC	HMT120-1- 20%CMC
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	16.48	25.04	24.35	20.23	19.32
2	22.89	29.18	28.39	25.23	25.00
3	26.14	32.19	31.33	29.38	28.99
4	27.66	39.65	39.96	35.34	34.59
5	37.87	42.69	41.99	40.32	39.45
6	38.97	47.26	46.36	45.32	44.97
7	39.87	47.95	46.85	45.98	45.25
8	40.53	48.03	47.23	46.23	45.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ. 4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นตัวของชั้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)			
	NS-10%CMC	NS-10%CMC - 2Eu	NS-10%CMC - 3Eu	NS-10%CMC - 4Eu
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	24.35	24.03	23.73	22.05
2	28.39	27.01	26.48	25.02
3	31.33	30.01	29.85	28.91
4	39.96	35.75	33.43	32.58
5	41.99	40.67	37.99	35.07
6	46.36	45.77	39.67	36.98
7	46.85	46.08	40.68	38.23
8	47.23	46.97	42.47	40.08
9	-	47.70	43.03	42.21
10	-	48.48	43.84	42.51
11	-	-	44.55	43.21

ตารางที่ จ. 5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นตัวของชั้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจีนอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)			
	HMT120-1- 10CMC	HMT120-1- 10CMC-2Eu	HMT120-1- 10CMC-3Eu	HMT120-1- 10CMC-4Eu
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	14.89	13.22	12.98	11.76
2	16.02	15.42	14.87	13.88
3	18.74	17.83	16.73	15.93
4	21.32	20.27	19.89	18.03
5	29.85	28.53	27.87	26.95
6	30.53	29.02	28.59	27.89
7	31.24	29.97	29.23	28.44
8	32.69	30.43	29.98	29.07
9	-	31.24	30.56	29.89
10	-	-	31.98	30.32
11	-	-	31.99	31.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

ตารางที่ ฉ. 1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่าน การดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	NS	1.74 ± 0.53	0.97 ± 0.04	0.61 ± 0.02
	HMT110-1	2.93 ± 0.89	1.87 ± 0.03	1.39 ± 0.04
	HMT110-2	3.37 ± 0.76	2.27 ± 0.03	1.63 ± 0.07
	HMT120-1	4.47 ± 0.58	3.94 ± 0.61	2.39 ± 0.12
	HMT120-2	3.98 ± 0.89	2.47 ± 0.43	1.83 ± 0.17
มอดุลัส (MPa)	NS	10.89 ± 1.55	5.89 ± 0.95	2.56 ± 0.09
	HMT110-1	58.34 ± 1.39	30.97 ± 1.34	14.91 ± 0.97
	HMT110-2	65.88 ± 2.95	37.13 ± 1.98	22.34 ± 2.35
	HMT120-1	81.76 ± 3.55	49.98 ± 2.44	32.86 ± 3.03
	HMT120-2	78.44 ± 2.85	45.94 ± 3.17	36.09 ± 3.74
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	NS	231 ± 10.76	49.94 ± 2.03	33.99 ± 2.85
	HMT110-1	164.43 ± 5.94	43.76 ± 1.07	30.13 ± 2.57
	HMT110-2	156.44 ± 3.78	40.69 ± 1.39	28.8 ± 1.95
	HMT120-1	132.67 ± 5.78	34.76 ± 2.55	14.54 ± 0.97
	HMT120-2	142.89 ± 7.55	37.05 ± 2.63	17.05 ± 1.07

ตารางที่ ๒. สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	NS	1.74 ± 0.53	0.97 ± 0.04	0.61 ± 0.02
	NS-5%CMC	4.81 ± 0.95	1.95 ± 0.13	0.85 ± 0.06
	NS-10%CMC	6.49 ± 1.27	3.87 ± 0.75	1.98 ± 0.09
	NS-15%CMC	7.34 ± 1.48	4.92 ± 0.87	2.99 ± 0.25
	NS-20%CMC	9.51 ± 3.69	6.73 ± 1.44	3.67 ± 0.28
	HMT120-1	4.47 ± 0.58	3.94 ± 0.61	2.39 ± 0.12
	HMT120-1-5CMC	18.62 ± 1.93	11.37 ± 1.04	9.35 ± 0.82
	HMT120-1-10CMC	16.84 ± 1.77	14.49 ± 0.98	12.64 ± 1.83
	HMT120-1-15CMC	20.72 ± 2.86	18.31 ± 1.32	17.23 ± 2.32
	HMT120-1-20CMC	24.13 ± 3.64	22.13 ± 0.94	21.07 ± 4.63
มอดุลัส (MPa)	NS	10.89 ± 1.55	5.89 ± 0.95	2.56 ± 0.09
	NS-5%CMC	62.92 ± 3.28	30.14 ± 1.17	17.87 ± 0.85
	NS-10%CMC	77.08 ± 5.87	41.78 ± 2.89	23.85 ± 0.93
	NS-15%CMC	117.78 ± 7.56	60.03 ± 2.03	33.17 ± 1.81
	NS-20%CMC	124.38 ± 8.77	65.87 ± 3.87	39.42 ± 1.55
	HMT120-1	81.76 ± 3.55	49.98 ± 2.44	32.86 ± 3.03
	HMT120-1-5CMC	112.35 ± 9.33	77.82 ± 3.77	57.81 ± 2.34
	HMT120-1-10CMC	161.23 ± 7.89	113.24 ± 5.87	87.43 ± 3.49
	HMT120-1-15CMC	255.97 ± 10.83	189.41 ± 7.38	148.37 ± 5.93
	HMT120-1-20CMC	248.56 ± 8.37	225.98 ± 8.57	153.97 ± 6.57
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	NS	231 ± 10.76	49.94 ± 2.03	33.99 ± 2.85
	NS-5%CMC	87.90 ± 5.53	40.03 ± 2.22	17.53 ± 1.03
	NS-10%CMC	79.02 ± 4.95	39.13 ± 2.57	17.03 ± 1.53
	NS-15%CMC	44.74 ± 2.89	21.11 ± 1.92	10.97 ± 0.96
	NS-20%CMC	38.96 ± 1.51	20.53 ± 1.93	9.13 ± 0.84
	HMT120-1	132.67 ± 5.78	34.76 ± 2.55	14.54 ± 0.97
	HMT120-1-5CMC	98.73 ± 5.87	48.95 ± 3.36	35.84 ± 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ. 2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม CMC ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 และ 20% โดย น้ำหนัก ก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน (ต่อ)

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	HMT120-1-10CMC	61.03 ± 7.41	34.83 ± 4.93	26.03 ± 3.89
	HMT120-1-15CMC	44.89 ± 3.85	20.13 ± 1.93	18.97 ± 1.85
	HMT120-1-20CMC	24.78 ± 3.96	11.98 ± 1.85	9.78 ± 1.55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ. 3 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	NS-10%CMC	6.49 ± 1.27	3.87 ± 0.75	1.98 ± 0.09
	NS-10%CMC-2Eu	5.24 ± 0.83	3.24 ± 0.45	1.32 ± 0.09
	NS-10%CMC-3Eu	3.39 ± 0.89	1.82 ± 0.01	0.97 ± 0.06
	NS-10%CMC-4Eu	2.54 ± 0.74	1.43 ± 0.11	0.75 ± 0.08
	HMT120-1-10CMC	16.84 ± 1.77	14.49 ± 0.98	12.64 ± 1.83
	HMT120-1-10CMC-2Eu	7.49 ± 0.97	6.58 ± 1.23	5.76 ± 0.85
	HMT120-1-10CMC-3Eu	5.97 ± 0.89	5.17 ± 1.17	4.78 ± 0.32
	HMT120-1-10CMC-4Eu	5.13 ± 0.65	4.32 ± 1.08	4.06 ± 0.87
มอดุลัส (MPa)	NS-10%CMC	77.08 ± 5.87	41.78 ± 2.89	23.85 ± 0.93
	NS-10%CMC-2Eu	76.11 ± 3.83	40.56 ± 1.98	27.85 ± 1.17
	NS-10%CMC-3Eu	72.95 ± 3.34	39.95 ± 1.13	20.56 ± 1.03
	NS-10%CMC-4Eu	67.58 ± 3.63	36.54 ± 2.89	18.99 ± 1.13
	HMT120-1-10CMC	161.23 ± 7.89	113.24 ± 5.87	87.43 ± 3.49
	HMT120-1-10CMC-2Eu	155.42 ± 7.88	112.57 ± 8.87	85.13 ± 7.81
	HMT120-1-10CMC-3Eu	148.53 ± 8.11	108.34 ± 9.88	80.95 ± 8.10
	HMT120-1-10CMC-4Eu	139.91 ± 9.05	102.55 ± 11.08	74.53 ± 7.17
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	NS-10%CMC	79.02 ± 4.95	39.13 ± 2.57	17.03 ± 1.53
	NS-10%CMC-2Eu	90.45 ± 6.55	48.53 ± 3.39	25.83 ± 2.52
	NS-10%CMC-3Eu	106.56 ± 8.55	48.53 ± 2.39	25.83 ± 1.52
	NS-10%CMC-4Eu	117.68 ± 9.85	77.85 ± 3.83	40.03 ± 2.54
	HMT120-1-10CMC	61.03 ± 7.41	34.83 ± 4.93	26.03 ± 3.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ. 3 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรับปรุงด้วย CMC 10 % โดยน้ำหนัก และเติมยูจินอลที่ปริมาณ 2 3 และ 4% โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 5 และ 10 วัน(ต่อ)

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	5	10
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	HMT120-1-10CMC-2Eu	66.21 ± 5.68	28.21 ± 3.17	28.21 ± 3.17
	HMT120-1-10CMC-3Eu	75.87 ± 7.83	42.13 ± 4.35	32.08 ± 1.83
	HMT120-1-10CMC-4Eu	80.52 ± 9.17	44.89 ± 4.42	34.62 ± 4.89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาว นิชกานต์ ฉายยะ
วัน เดือน ปีเกิด	21 กันยายน 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	1055 ซ.กรุงธนบุรี 4 ถนนกรุงธนบุรี แขวงบางลำพูล่าง เขตคลองสาน กรุงเทพฯ 10600
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี (2561) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบังเกรดเฉลี่ย 3.10 ระดับปริญญาโท (2565) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิ- เมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบังเกรดเฉลี่ย 3.56
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมแบบเหมาจ่าย
ผลงานทางวิชาการ	Chaya, N. and Prachayawarakorn, J. 2021. "Effect of Temperatures and Times on Properties of Heat-moisture Treated Starch Films" The Proceeding of In International Polymer Conference of Thailand 2021 (PCT-11), 120-124.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้