

สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท  
แคปทาการจีแนน และกรดแมนดีลิก  
PROPERTIES OF STARCH FILM MODIFIED BY VINYL ACETATE,  
KAPPA-CARRAGEENAN AND MANDELIC ACID



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2567  
KMUTL-2024-SC-M-012-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF STARCH FILM MODIFIED BY VINYL ACETATE,  
KAPPA-CARRAGEENAN AND MANDELIC ACID



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

2024

KMITL-2024-SC-M-012-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |                                                                                            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท แคปทา<br>คาราจีแนน และกรดแมนดีลิก |
| ชื่อนักศึกษา                | นางสาววิมลสิริ ศรีโพธิ์ชัย                                                                 |
| รหัสประจำตัว                | 62605075                                                                                   |
| ปริญญา                      | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)                                                   |
| ภาควิชา                     | เคมี                                                                                       |
| พ.ศ.                        | 2567                                                                                       |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รองศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญารากร                                                    |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตท แคปทา คาราจีแนน และกรดแมนดีลิก โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง จากผลการศึกษาพบว่าจำนวนหมู่เอซิติลและองค์การแทนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งพบพีคใหม่บริเวณ  $1724\text{ cm}^{-1}$  และ  $1242\text{ cm}^{-1}$  ของการสั่นแบบ C=O stretching และ C-O stretching และฟิล์มมีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้นหลังจากปริมาณของไวนิลอะซิเตทเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ดัด ยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด การดูดซับความชื้น การบวมตัว และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทสูงกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่ปริมาณความ เป็นผลึก ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง นอกจากนี้ศึกษาผลของปริมาณแคปทา คาราจีแนนที่ปริมาณ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ แป้ง พบว่าการผสมแคปทา คาราจีแนนทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างประจุ โดยเลขคลื่น เคลื่อนที่ลดลงในช่วงการสั่นของ O-H stretching ซึ่งความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส การดูดซับ ความชื้น การบวมตัว และการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณความเป็นผลึก เปอร์เซ็นต์ดัดยึด ณ จุด รับแรงดึงสูงสุด และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลงเมื่อปริมาณแคปทา คาราจีแนนมากขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างประจุ ซึ่งฟิล์มแป้งที่ผสมแคปทา คาราจีแนน ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และสมบัติความชอบน้ำมาก ที่สุด นอกจากนี้มีการเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณ 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งและ แคปทา คาราจีแนน ในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทา คาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพีคบริเวณ

1724  $\text{cm}^{-1}$  มีความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณความเป็นผลึก ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส การดูดซับความชื้น การบวมตัว การซึมผ่านไอน้ำ และอุณหภูมิ การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการดูดซับความชื้นและการบวมตัวของฟิล์ม แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แป้งที่เติมกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้นแสดงแนวโน้มที่ตรงข้ามกัน เนื่องจากกรดแมนดีลิกสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้ง 30VA ได้ดีกว่าแป้ง NS อีกทั้งปริมาณผลึกและอัตราการซึมผ่านไอน้ำยังคงแสดงค่าที่ไม่แตกต่างกันเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมกรดแมนดีลิก 20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักในฟิล์มสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ได้อย่างดีและไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ HaCat จากงานวิจัยนี้ฟิล์มสูตร 30VA-30CAR-20MA แสดงสมบัติทั้งหมดเหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น การบวมตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำ และสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

**คำสำคัญ :** กรดแมนดีลิก แคปซาคารจีแนน แป้งมันสำปะหลัง แป้งอะซิทิลเลท วัสดุปิดแผล

|                       |                                                                                          |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thesis Title</b>   | Properties of starch film modified by vinyl acetate, kappa-carrageenan and mandelic acid |
| <b>Student Name</b>   | Wimolsiri Sripochai                                                                      |
| <b>Student ID</b>     | 62605075                                                                                 |
| <b>Degree</b>         | Master of Science (Polymer Technology)                                                   |
| <b>Department</b>     | Chemistry                                                                                |
| <b>Year</b>           | 2024                                                                                     |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn                                                |

### Abstract

This research studied properties of cassava starch films modified with vinyl acetate (VA), kappa-carrageenan (CAR) and mandelic acid (MA). Native cassava starch (NS) was modified with 10%, 20% and 30% VA by weight of the starch. The results showed an increase in the number of acetyl groups and degree of substitution. In addition, new IR wavenumbers at  $1724\text{ cm}^{-1}$  and  $1242\text{ cm}^{-1}$ , assigned for C=O stretching and C-O stretching vibrations, were observed. The surface of film became smoother with the increase of VA content. However, elongation at maximum load, moisture absorption, swelling and water vapor permeability of the modified starch films were higher than those of NS film. In contrast, the crystallinity, stress at maximum load, Young's modulus and thermal decomposition temperature decreased. Additionally, the effect of CAR at 10%, 20% and 30% by weight of starch weight was studied in both NS and 30VA films. The incorporation of CAR resulted in hydrogen bonding and electrostatic bond, with the decrease in wavenumber in the O-H stretching vibration region. The stress at maximum load, Young's modulus, moisture absorption, swelling and water vapor permeability increased, while the crystallinity, elongation at maximum load and thermal decomposition temperature decreased as the amount of CAR increased due to the formation of hydrogen bonds and electrostatic interactions. The film with 30% CAR by weight exhibited the highest stress at maximum load, Young's modulus and hydrophilic properties. Moreover, MA was added 10%, 15% and 20% by weight of starch and CAR weight to both NS and 30VA films

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with 30% CAR. The IR peak intensity at  $1724\text{ cm}^{-1}$  increased with the increasing amount of MA. However, the crystallinity, stress at maximum load, Young's modulus, moisture absorption, swelling, water vapor permeability and thermal decomposition temperature decreased. However, moisture absorption and swelling of both NS and 30VA films with MA showed opposite trends with the addition of MA since MA interacted more effectively with 30VA than with NS. Additionally, the crystallinity and water vapor permeability remained unchanged despite of the increase in MA content. The addition of 20% MA by weight to the film effectively inhibited *S. aureus* and *E. coli* bacteria and was non-toxic to HaCat cells. From this study, 30VA-30CAR-20MA film showed the greatest overall properties by considering of morphology, mechanical properties, moisture absorption, swelling, water vapor permeability and antibacterial properties.

**Keywords :** Acetylated starch, Cassava starch, Kappa-carrageenan, Mandelic acid, Wound dressing

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความกรุณาจาก รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ และ รศ.ดร. ปานไพลิน สีหราช ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมีอาคารปฏิบัติการตึกจุฬารักษ์ 1 และอาคารสำนักงานคณบดี เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาเคมี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ รวมถึงอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ในระดับมหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาเคมีทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือซึ่งมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

วิมลสิริ ศรีโพธิ์ชัย

# สารบัญ

|                                                   | หน้า     |
|---------------------------------------------------|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                              | ก        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                           | ค        |
| กิตติกรรมประกาศ.....                              | จ        |
| สารบัญ.....                                       | ฉ        |
| สารบัญตาราง.....                                  | ฐ        |
| สารบัญรูป.....                                    | ณ        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>                          | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....             | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                             | 3        |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....                        | 4        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                | 4        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b> | <b>5</b> |
| 2.1 วัสดุปิดแผล (Wound dressing).....             | 5        |
| 2.1.1 ชนิดของวัสดุปิดแผล.....                     | 6        |
| 2.1.1.1 ก๊อซ (Gauze).....                         | 6        |
| 2.1.1.2 ผ้าตาข่าย (Tulles).....                   | 6        |
| 2.1.1.3 ฟิล์ม (Film).....                         | 6        |
| 2.1.1.4 โฟม (Foam).....                           | 6        |
| 2.1.1.5 ไฮโดรเจล (Hydrogel).....                  | 6        |
| 2.1.1.6 ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid).....         | 7        |
| 2.1.1.7 อัลจิเนต (Alginates).....                 | 7        |
| 2.1.1.8 Antimicrobial dressings.....              | 7        |
| 2.2 กระบวนการหายของบาดแผล.....                    | 7        |
| 2.2.1 ระยะห้ามเลือด (Hemostasis phase).....       | 8        |
| 2.2.2 ระยะอักเสบ (Inflammatory phase).....        | 8        |
| 2.2.3 ระยะงอกขยาย (Proliferative phase).....      | 8        |
| 2.3 แป้ง (Starch).....                            | 9        |
| 2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง.....                      | 9        |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2 องค์ประกอบของแป้ง.....                                | 10 |
| 2.3.2.1 อะไมโลส.....                                        | 11 |
| 2.3.2.2 อะไมโลเพกทิน.....                                   | 11 |
| 2.3.2.3 องค์ประกอบอื่น ๆ.....                               | 12 |
| 2.3.3 สมบัติของแป้ง.....                                    | 13 |
| 2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย.....             | 13 |
| 2.3.3.2 ความหนืดของแป้ง.....                                | 14 |
| 2.3.3.3 เจลาติไนเซชัน (Gelatinization).....                 | 14 |
| 2.3.3.4 รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation).....                 | 15 |
| 2.3.4 แป้งดัดแปร (Modified starch).....                     | 16 |
| 2.3.4.1 ประเภทของการดัดแปรแป้ง.....                         | 16 |
| 2.3.5 แป้งอะซิเตท (Acetated starch).....                    | 17 |
| 2.4 फिल्मแป้ง.....                                          | 18 |
| 2.4.1 สมบัติของฟิล์มแป้ง.....                               | 19 |
| 2.4.2 การเกิดฟิล์ม.....                                     | 20 |
| 2.4.3 การขึ้นรูปฟิล์ม.....                                  | 20 |
| 2.4.3.1 การเทสารละลายลงบนวัสดุต่าง ๆ (Solvent casting)..... | 20 |
| 2.4.3.2 การเอกซ์ทรูชัน (Extrusion).....                     | 21 |
| 2.4.3.3 การทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (Calendering).....            | 21 |
| 2.5 มันสำปะหลัง.....                                        | 21 |
| 2.5.1 องค์ประกอบของหัวมันสำปะหลัง.....                      | 21 |
| 2.5.2 แป้งมันสำปะหลัง.....                                  | 22 |
| 2.6 ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate).....                       | 23 |
| 2.7 คาราจีแนน (Carrageenan).....                            | 24 |
| 2.7.1 แคปปาคาราจีแนน (Kappa-carrageenan).....               | 25 |
| 2.7.2 ไอโอต้าคาราจีแนน (Iota-carrageenan).....              | 25 |
| 2.7.3 แลมบ์ดาคาราจีแนน (Lambda-carrageenan).....            | 26 |
| 2.8 กรดแมนดีลิก (Mandelic acid).....                        | 26 |
| 2.9 การต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial agent).....       | 28 |
| 2.9.1 เชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวสัมผัส.....   | 28 |

|                                                                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.9.1.1 Staphylococcus aureus.....                                                                                                                                       | 28        |
| 2.9.1.2 Escherichia coli.....                                                                                                                                            | 29        |
| 2.9.2 กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....                                                                                                                     | 30        |
| 2.9.2.1. ผนังเซลล์ (Cell wall).....                                                                                                                                      | 30        |
| 2.9.2.2. เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane).....                                                                                                                             | 30        |
| 2.9.2.3. สารสังเคราะห์ไนโตรโพลัสซิม.....                                                                                                                                 | 30        |
| 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                                                                                                          | 30        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>                                                                                                                                | <b>36</b> |
| 3.1 สารเคมี.....                                                                                                                                                         | 36        |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....                                                                                                                                            | 36        |
| 3.3 วิธีการทดลอง.....                                                                                                                                                    | 37        |
| 3.3.1 การเตรียมแป้งอะซิทิลเลทจากแป้งมันสำปะหลัง.....                                                                                                                     | 40        |
| 3.3.2 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งอะซิทิลเลท.....                                                                                                                              | 40        |
| 3.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งอะซิทิลเลท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งกับแคลปาคาราจีแนนปริมาณต่าง ๆ.....                                             | 40        |
| 3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งอะซิทิลเลท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งกับแคลปาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ<br>กรดแมนดีลิกปริมาณต่าง ๆ..... | 41        |
| 3.4 การทดสอบ.....                                                                                                                                                        | 43        |
| 3.4.1 การหาจำนวนหมู่อะซิทิลและองค์การแทนที่.....                                                                                                                         | 43        |
| 3.4.2 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันโดย FTIR.....                                                                                                                         | 43        |
| 3.4.3 การทดสอบการละลายของรังสีเอกซ์.....                                                                                                                                 | 44        |
| 3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....                                                                                                                                      | 44        |
| 3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....                                                                                                                                          | 44        |
| 3.4.6 การดูดซับความชื้น.....                                                                                                                                             | 45        |
| 3.4.7 การบวมตัว.....                                                                                                                                                     | 46        |
| 3.4.8 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....                                                                                                                                  | 46        |
| 3.4.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....                                                                                                                                     | 46        |
| 3.4.10 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย.....                                                                                                                                | 47        |
| 3.4.11 ความเป็นพิษต่อเซลล์.....                                                                                                                                          | 47        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.12 วิเคราะห์ผลทางสถิติ.....                                                                                                                                                                                                                                         | 48        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....</b>                                                                                                                                                                                                                      | <b>49</b> |
| 4.1 การหาจำนวนหมู่เอซิทิลและองค์การแทนที่.....                                                                                                                                                                                                                          | 53        |
| 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....                                                                                                                                                                                                                        | 54        |
| 4.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                                | 54        |
| 4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งและแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                 | 57        |
| 4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....               | 59        |
| 4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....                                                                                                                                                                                                                         | 62        |
| 4.3.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่<br>ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                  | 62        |
| 4.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่<br>ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท<br>30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ...                                                   | 64        |
| 4.3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่<br>ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท<br>30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 66        |
| 4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....                                                                                                                                                                                                                                        | 69        |
| 4.4.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                                 | 69        |
| 4.4.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                               | 70        |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....       | 73 |
| 4.5 สมบัติเชิงกล.....                                                                                                                                                                                                                                       | 76 |
| 4.5.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่<br>ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                                | 76 |
| 4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                     | 77 |
| 4.5.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....      | 79 |
| 4.6 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น.....                                                                                                                                                                                                                      | 81 |
| 4.6.1 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                               | 81 |
| 4.6.2 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการ<br>ดัดแปรและฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                 | 83 |
| 4.6.3 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการ<br>ดัดแปรและฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดย<br>น้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 84 |
| 4.7 การวิเคราะห์การบวมตัว.....                                                                                                                                                                                                                              | 86 |
| 4.7.1 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                       | 86 |
| 4.7.2 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และฟิล์มเป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักเป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                        | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.7.3 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปร<br>และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....            | 89         |
| 4.8 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....                                                                                                                                                                                                                      | 91         |
| 4.8.1 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง<br>ด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                               | 91         |
| 4.8.2 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน<br>การตัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                 | 92         |
| 4.8.3 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน<br>การตัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 94         |
| 4.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....                                                                                                                                                                                                                         | 95         |
| 4.9.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง<br>ด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                  | 95         |
| 4.9.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน<br>การตัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                    | 98         |
| 4.9.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน<br>การตัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30<br>เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....    | 101        |
| 4.10 สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....                                                                                                                                                                                                                       | 105        |
| 4.11 ความเป็นพิษต่อเซลล์.....                                                                                                                                                                                                                                  | 110        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>113</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....                                                                                                                                                                                                                                        | 113        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                                                                                                                                                                                                                                            | 116        |
| เอกสารอ้างอิง.....                                                                                                                                                                                                                                             | 117        |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| ภาคผนวก ก.....       | 125 |
| ภาคผนวก ข.....       | 133 |
| ภาคผนวก ค.....       | 141 |
| ภาคผนวก ง.....       | 143 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 151 |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                                                                                                                                           | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 องค์ประกอบของแป้ง.....                                                                                                                                                                                                                                         | 11   |
| 2.2 กำลังการพองตัวและการละลายในแป้งแต่ละชนิดที่ 95 °C.....                                                                                                                                                                                                         | 13   |
| 2.3 สมบัติโดยทั่ว ๆ ไปของเม็ดแป้งจากพืชบางชนิด.....                                                                                                                                                                                                                | 15   |
| 2.4 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด.....                                                                                                                                                                                                                            | 20   |
| 2.5 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง.....                                                                                                                                                                                                                            | 22   |
| 3.1 อัตราส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม.....                                                                                                                                                                                                         | 42   |
| 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้.....                                                                                                                                                                                               | 44   |
| 4.1 อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....                                                                                                                                                                                                     | 49   |
| 4.2 จำนวนหมู่อะซิทธิลและองค์การแทนที่.....                                                                                                                                                                                                                         | 54   |
| 4.3 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏของแป้งอะซิทธิลเลท.....                                                                                                                                                                                                                    | 55   |
| 4.4 ความสูงและอัตราส่วนความสูงพิกจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                            | 56   |
| 4.5 ความสูงและอัตราส่วนความสูงพิกจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                  | 57   |
| 4.6 ความสูงและอัตราส่วนความสูงพิกจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนักและเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 61   |
| 4.7 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                          | 63   |
| 4.8 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                | 64   |
| 4.9 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                              | 68   |

|      |                                                                                                                                                                                                                     |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.10 | ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                 | 82 |
| 4.11 | ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                   | 83 |
| 4.12 | ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 85 |
| 4.13 | ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                         | 86 |
| 4.14 | ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                           | 88 |
| 4.15 | ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....         | 90 |
| 4.16 | อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                 | 92 |
| 4.17 | อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                   | 93 |
| 4.18 | อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 94 |
| 4.19 | อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์ม<br>แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                          | 97 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.20 | อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์ม<br>แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนนที่ปริมาณ<br>ต่าง ๆ.....                                  | 98  |
| 4.21 | อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์ม<br>แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30%<br>โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ..... | 104 |
| 4.22 | ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร<br>และแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                               | 106 |
| 4.23 | ผลการทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ HaCat ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุง<br>ด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30%<br>โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                              | 110 |

## สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                                                                                                                   | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1    | รูปของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ.....                                                                                                                                     | 10   |
| 2.2    | โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส.....                                                                                                                                   | 11   |
| 2.3    | โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกทิน.....                                                                                                                              | 12   |
| 2.4    | การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งระหว่างการต้มสุก.....                                                                                                                | 14   |
| 2.5    | กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส.....                                                                                                                         | 15   |
| 2.6    | การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างแป้งและไวนิลอะซิเตท.....                                                                                                  | 18   |
| 2.7    | โครงสร้างโมเลกุลของไวนิลอะซิเตท.....                                                                                                                              | 23   |
| 2.8    | โครงสร้างโมเลกุลของคาราจีแนนชนิดต่าง ๆ.....                                                                                                                       | 25   |
| 2.9    | โครงสร้างโมเลกุลของกรดแมนดีลิก.....                                                                                                                               | 26   |
| 2.10   | ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดแมนดีลิกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ<br>แมนดีโลไนไตรล์.....                                                                                 | 27   |
| 2.11   | ลักษณะของเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i> .....                                                                                                                 | 29   |
| 2.12   | ลักษณะของ <i>Escherichia coli</i> .....                                                                                                                           | 29   |
| 3.1    | แผนภาพขั้นตอนการเตรียมแป้งอะซิทิลเลท.....                                                                                                                         | 37   |
| 3.2    | แผนภาพขั้นตอนการขึ้นรูปและการทดสอบฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผสม<br>แคปตาการาจีแนนและกรดแมนดีลิกในสูตรต่าง ๆ.....                                                     | 38   |
| 3.3    | แผนภาพขั้นตอนการขึ้นรูปและการทดสอบฟิล์มแป้งอะซิทิลเลท 30 เปอร์เซนต์โดย<br>น้ำหนักแป้งที่ผสมแคปตาการาจีแนนและกรดแมนดีลิกในสูตรต่าง ๆ.....                          | 39   |
| 4.1    | อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จาก<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท.....                                        | 51   |
| 4.2    | อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จาก<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปตาการาจีแนน.....                    | 52   |
| 4.3    | อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จาก<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปตาการาจีแนน และ<br>กรดแมนดีลิก..... | 53   |
| 4.4    | อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                  | 55   |

|      |                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5  | อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับ<br>แคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                        | 58 |
| 4.6  | อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30%<br>โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                              | 58 |
| 4.7  | อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับ<br>แคปทาการาจีแนนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                      | 60 |
| 4.8  | อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30%<br>โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก<br>ที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                        | 60 |
| 4.9  | ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                       | 62 |
| 4.10 | ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับ<br>แคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                            | 65 |
| 4.11 | ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30%<br>โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                  | 65 |
| 4.12 | ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับ<br>แคปทาการาจีแนนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                          | 67 |
| 4.13 | ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดย<br>น้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก<br>ที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                           | 67 |
| 4.14 | สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและ<br>แข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X<br>(ก) NS (ข) 10VA (ค) 20VA และ 30VA.....                                   | 69 |
| 4.15 | สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสม<br>กับแคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) NS (ข) NS-10CAR<br>(ค) NS-20CAR และ (ง) NS-30CAR.....                                        | 71 |
| 4.16 | สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย<br>ไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนนนที่ปริมาณต่าง ๆ ที่<br>กำลังขยาย 5000X (ก) 30VA (ข) 30VA-10CAR (ค) 30VA-20CAR และ<br>(ง) 30VA-30CAR..... | 72 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.17 | สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) NS-30CAR (ข) NS-30CAR-10MA (ค) NS-30CAR-15MA และ (ง) NS-30CAR-20MA.....                                    | 74  |
| 4.18 | สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) 30VA-30CAR (ข) 30VA-30CAR-10MA (ค) 30VA-30CAR-15MA และ (ง) 30VA-30CAR-20MA..... | 75  |
| 4.19 | สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                       | 76  |
| 4.20 | สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                                             | 78  |
| 4.21 | สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                                  | 78  |
| 4.22 | สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                                                           | 80  |
| 4.23 | สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แบ่งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ.....                                                                                                               | 80  |
| 4.24 | เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG.....                                                                                                                                    | 96  |
| 4.25 | เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG.....                                                                                                                                                          | 99  |
| 4.26 | เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แบ่งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG.....                                                                                                                              | 100 |
| 4.27 | เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ DTG.....                                                                                                                            | 102 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.28 | เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดย<br>น้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่<br>ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG.....                                                                                                                             | 103 |
| 4.29 | ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของกรดแมนดีลิกต่อแบคทีเรียแกรมบวก<br><i>Staphylococcus aureus</i> โดย (ก) NS (ข) 30VA (ค) NS-30CAR<br>(ง) 30VA-30CAR (จ) NS-30CAR-10MA (ฉ) 30VA-30CAR-10MA<br>(ช) NS-30CAR-15MA (ซ) 30VA-30CAR-15MA (ฌ) NS-30CAR-20MA และ<br>(ญ) 30VA-30CAR-20MA.....                                    | 107 |
| 4.30 | ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของกรดแมนดีลิกต่อแบคทีเรียแกรมลบ<br><i>Escherichia coli</i> โดย (ก) NS (ข) 30VA (ค) NS-30CAR (ง) 30VA-30CAR<br>(จ) NS-30CAR-10MA (ฉ) 30VA-30CAR-10MA (ช) NS-30CAR-15MA<br>(ซ) 30VA-30CAR-15MA (ฌ) NS-30CAR-20MA และ<br>(ญ) 30VA-30CAR-20MA.....                                          | 108 |
| 4.31 | ภาพถ่ายการเจริญของเซลล์ HaCat หลังทดสอบกับตัวอย่างของฟิล์ม<br>แป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับ<br>แคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ โดย<br>(ก) Control (ข) 3VA (ค) 30VA-30CAR (ง) 30VA-30CAR-10MA<br>(จ) 30VA-30CAR-15MA (ฉ) 30VA-30CAR-20MA..... | 111 |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

วัสดุปิดแผล (Wound dressing) ที่เหมาะสำหรับการรักษาบาดแผลควรมีสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ ประการแรกควรส่งเสริมสภาพแวดล้อมที่ชุ่มชื้นสำหรับการรักษาบาดแผล โดยการยอมให้น้ำในปริมาณที่เหมาะสมผ่านเข้าไปเพื่อช่วยดูดซับของเหลวส่วนเกินและการอักเสบจากบาดแผล วัสดุปิดแผลควรมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและต้านเชื้อจุลินทรีย์เพื่อป้องกันการติดเชื้อและช่วยในกระบวนการรักษาบาดแผล นอกจากนี้วัสดุปิดแผลควรสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย และวัสดุปิดแผลควรสามารถถอดออกจากผิวหนังบาดแผลได้ง่าย [1] ซึ่งฟิล์มแผ่นปิดแผลจากธรรมชาติสามารถทำจากพอลิเมอร์ชีวภาพต่าง ๆ เช่น ไคโตซาน (Chitosan) เจลาติน (Gelatin) แป้ง (Starch) เป็นต้น [2]

แป้ง (Starch) เป็นวัตถุดิบที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ หาได้ง่าย สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และมีสมบัติที่ต้องการต่าง ๆ เช่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี และไม่เป็นพิษ [3, 4] โดยแป้งในธรรมชาติมีการใช้งานที่จำกัดเนื่องจากสมบัติของแป้งซึ่งแป้งสามารถปรับปรุงและทำให้มีความหลากหลายมากขึ้นได้โดยการปรับปรุงด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) กระบวนการอีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เป็นต้น โดยที่กระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ได้รับความสนใจอย่างมากในการวิจัยแป้ง [5]

การใช้งานแป้งอะซิทิเลชันได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากมีสมบัติในการทำให้อาหารขุ่นขึ้น และระดับการแทนที่ (Degree of substitution; DS) ของหมู่อะซิทิล (Acetyl group) ที่ใช้ในอาหารจะเลือกที่ระดับต่ำ โดยระดับการแทนที่ (DS) ที่สูงที่สุดที่สามารถใช้ในอาหารได้ตามที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US Food and Drug Administration; FDA) กำหนดไว้ในปี ค.ศ. 1980 เท่ากับ 0.2 [6] ซึ่งแป้งอะซิทิเลชันสามารถเตรียมได้โดยผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) เช่น กระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ด้วยกรดอะซิติก (Acetic acid) อะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) คีโตน (Ketone) หรือ ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate) โดยกระบวนการอะซิทิเลชันจะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของแป้งด้วยหมู่อะซิทิล (Acetyl group) จึงทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างสายโซ่ของแป้งลดลง [7] อีกทั้งยังส่งผลให้สมบัติการบวมตัว

(Degree of swelling) และการละลาย (Solubility) เพิ่มขึ้น การคืนตัว (Retrogradation) ของแป้งลดลง และยังปรับปรุงความใส (Clarity) อีกด้วย แต่เมื่อระดับการแทนที่ DS เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแป้งอะซิทิเลทลดลง [8, 9] เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่ต่ำและสมบัติการบวมตัวของแป้งอะซิทิเลท การผสมแป้งอะซิทิเลทกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ แป้งอะซิทิเลทสามารถผสมกับพอลิเมอร์ได้หลายชนิด ตัวอย่างเช่นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ไคโตซาน (Chitosan) และคาราจีแนน (Carrageenan) เป็นต้น

คาราจีแนน (Carrageenan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่สามารถผสมกับแป้งอะซิทิเลทได้ คาราจีแนนเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์สายตรง (Linear polysaccharide) ที่มีหมู่ซัลเฟต (Sulfate group) อยู่ในโมเลกุล พบได้ในสารเคลือบเซลล์ (Intercellular matrix) และผนังเซลล์ (Cell wall) ของสาหร่ายสีแดงชนิดต่าง ๆ ซึ่งโครงสร้างหลักของคาราจีแนนประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของไดแซ็กคาไรด์แบบสลับกัน (Alternating disaccharide repeating units) โดยมีเบต้าดีกาแลคโตส ( $\beta$ -D-galactose) ที่ตำแหน่งที่ 3 และ แอลฟาดีกาแลคโตส ( $\alpha$ -D-galactose) ที่ตำแหน่งที่ 4 โดยคาราจีแนนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตาม 3,6-แอนไฮโดรกาแลคโตส (3,6-Anhydrogalactose) ที่ประกอบด้วยตำแหน่งและจำนวนของหมู่ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ แคปปา (Kappa;  $\kappa$ ) ไอโอตา (Iota;  $\iota$ ) และแลมบ์ดา (Lambda;  $\lambda$ ) [10] คาราจีแนนนิยมใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด (Thickeners) สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizers) สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) สารก่อเจล (Gelling agents) และเป็นส่วนประกอบที่ไม่เป็นพิษในอาหาร ยาสีฟัน แชมพู และเครื่องสำอาง เนื่องจากคาราจีแนนมีสมบัติในความชอบน้ำสูง (Hydrophilicity) มีความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) และสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) อีกทั้งสมบัติในการก่อเจลของคาราจีแนนยังช่วยเพิ่มความเสถียรของฟิล์มอีกด้วย [11, 12] นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณของแคปปาคาราจีแนนจะทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และการละลายน้ำ (Water solubility) ของฟิล์มแป้งเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งและแคปปาคาราจีแนน [13] อีกทั้งมีการศึกษาพบว่าการเพิ่มความแข็งแรงดึง การบวมตัว อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability) และการละลายน้ำของฟิล์มอะการ์ (Agar) ที่ผสมกับแคปปาคาราจีแนนมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแคปปาคาราจีแนนเพิ่มขึ้น [14] และยังมีการศึกษาพบว่าการเพิ่มความแข็งแรงดึง อีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus) และการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผสมแคปปาคาราจีแนนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแคปปาคาราจีแนนเพิ่มขึ้นอีกด้วย [15] ดังนั้นการผสมแคปปาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลและการบวมตัวของฟิล์มดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้หนึ่งในลักษณะสำคัญของวัสดุปิดแผลคือความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) ดังนั้นจึงมีหลากหลายการศึกษาที่พัฒนาและปรับปรุงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแผ่นปิดบาดแผล หนึ่งในนั้นคือการใช้สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) โดยสารประกอบฟีนอลิกได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียและต้านทานอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานทางด้านการแพทย์และเภสัชกรรม [16] เช่น กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) หรือกรดแมนดีลิก (Mandelic acid) กรดแมนดีลิกเป็นกรดแอลฟาไฮดรอกซี ( $\alpha$ -hydroxy acid) โครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก มีสูตรทางเคมี คือ  $C_8H_8O_3$  และมีค่า pKa เท่ากับ 3.4 ซึ่งแสดงถึงสมบัติของความเป็นกรด โดยแหล่งธรรมชาติของกรดแมนดีลิกสามารถพบได้ในอัลมอนด์ แอปริคอต และเชอร์รี่ ซึ่งกรดแมนดีลิกมีการใช้งานในหลายสาขาทั้งทางการแพทย์และกึ่งการแพทย์ โดยเฉพาะทางด้านผิวหนัง เภสัชกรรม และความงาม [17] นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าการเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* [18, 19] อีกทั้งยังมีการศึกษาพบว่าการเติมกรดแมนดีลิกยังมีความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* อีกด้วย [20]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงฟิล์มแผ่นปิดบาดแผลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ผสมกับแคปทาการจีแนนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับน้ำ จากนั้นนำมาเติมกรดแมนดีลิกเพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเทหล่อแบบ (Casting) และนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การหาจำนวนหน่วยอะตอมและองค์การแทนที่ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น การบวมตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ความเป็นพิษต่อเซลล์ และการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปทาการจีแนนและกรดแมนดีลิก

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มแผ่นปิดแผลที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปทาการจีแนนและกรดแมนดีลิก

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วย ไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปพาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณไวนิลอะซิเตทและแคปพาคาราจีแนน 10 20 และ 30 %wt และปริมาณ กรดแมนดีลิก 10 15 และ 20 %wt

1.3.3 ศึกษาการวิเคราะห์การหาจำนวนหมู่เอซิติลและองค์การแทนที่ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น การบวมตัว อัตราการซึมผ่าน ใอน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ความเป็นพิษต่อเซลล์ และการวิเคราะห์ผล ทางสถิติของฟิล์มแผ่นปิดแผลที่เตรียมได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปพาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิกตามสมบัติที่ต้องการ

1.4.2 ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่ย่อยสลายยากจำนวนมากในปัจจุบัน

1.4.3 ช่วยเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาถูกอย่างแป้งมันสำปะหลังได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุปิดแผล (Wound dressing)

ปัจจุบันได้มีการผลิตวัสดุในการดูแลบาดแผลออกมามากมายหลายชนิด ทำให้เราสามารถที่จะดูแลบาดแผลให้กับผู้ป่วยได้ในทุก ๆ บาดแผล การเลือกชนิดของวัสดุปิดแผลจึงนับเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้กระบวนการหายของบาดแผลดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจุบันจึงมีวัสดุปิดแผลให้เลือกหลากหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกัน เหมาะกับแผลแต่ละชนิดแตกต่างกันไป โดยวัสดุทำแผลที่ดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. สามารถคงไว้ซึ่งความชุ่มชื้นของแผล ใน ขณะเดียวกันก็สามารถดูดซับสารคัดหลั่งหลังจากแผลที่มีมากเกินไปได้
2. ไม่ทิ้งสารตกค้าง หรือสารที่เป็นอันตรายต่อแผล
3. ไม่ก่อให้เกิดการแพ้หรือระคายเคือง
4. สามารถปกป้องแผลจากการบาดเจ็บจากภายนอก
5. สามารถถอดออกโดยไม่ทำให้เกิดการบาดเจ็บต่อแผล
6. แบคทีเรียไม่สามารถผ่านเข้ามาในแผลได้
7. สามารถยอมให้อากาศผ่านเข้าออกได้
8. ผู้ป่วยรู้สึกสบาย
9. ไม่ต้องเปลี่ยนบ่อย
10. คุ้มค่า
11. มีอายุการเก็บรักษานาน [21]

### 2.1.1 ชนิดของวัสดุปิดแผล

2.1.1.1 **ก๊อช (Gauze)** ก๊อชเป็นวัสดุปิดแผลที่ใช้มาอย่างยาวนานและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก ขั้นตอนการทำแผลง่ายและสามารถปรับแต่งหรือใส่ในแผลได้ทุกแบบ ผู้ป่วยสามารถทำบาดแผลได้ด้วยตัวเอง และหาซื้อได้ง่าย แต่การทำแผลโดยวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียคือ ของเหลวจากบาดแผลซึมออกมาบ่อย จึงต้องทำการเปลี่ยนก๊อชที่บาดแผลบ่อย หากปล่อยให้ก๊อชแห้งติดที่พื้นบาดแผล เมื่อเปลี่ยนก๊อชจะเกิดการบาดเจ็บของบาดแผลและความเจ็บปวดต่อผู้ป่วยได้มาก นอกจากนี้ก๊อชนั้นไม่มีสมบัติในการป้องกันเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่บาดแผลจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนก๊อชบ่อย

2.1.1.2 **ผ้าตาข่าย (Tulles)** ผ้าตาข่ายได้เกิดจากการพัฒนามาจากการทำแผลโดยก๊อช สามารถลดความเจ็บปวดเวลาทำแผล วัสดุปิดแผลชนิดนี้ลดการติดเชื้อ มีสมบัติรักษาความชุ่มชื้นให้แก่บาดแผลและยังสามารถให้สารคัดหลั่งซึมผ่านได้ด้วย โดยได้ทำการเคลือบสารต่าง ๆ ไปยังแผ่นตาข่าย ได้แก่ พาราฟิน (Parafin), วาสลีน (Vaseline), ปิโตรเลียม (Petroleum) หรือยาฆ่าเชื้อกลุ่ม Chlorhexidine โดยมีราคาไม่แพง เหมาะกับแผลที่มีขนาดตื้นและสารคัดหลั่งไม่มากนัก

2.1.1.3 **ฟิล์ม (Film)** ฟิล์มเป็นวัสดุปิดแผลที่มีสมบัติสามารถยึดติดกับผิวหนังรอบ ๆ บาดแผลได้ และป้องกันการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมและเชื้อโรคได้โดยที่อากาศและไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ มีลักษณะเป็นแผ่นใสทำให้สามารถสังเกตดูแผลได้โดยไม่ต้องทำการเปิดบาดแผล เหมาะสำหรับบาดแผลที่มีลักษณะตื้นและมีสารคัดหลั่งปริมาณน้อย หรืออาจใช้ปิดแผลร่วมกับวัสดุปิดแผลชนิดอื่น ๆ และสามารถปิดบาดแผลบริเวณข้อต่อและมือได้ เพราะมีสมบัติในการยืดหยุ่นได้ดี

2.1.1.4 **โฟม (Foam)** โฟมเป็นสารประกอบ polyurethane ซึ่งมีทั้งแบบแผ่นและซีต มีความสามารถในการดูดซึมสารคัดหลั่งสูง และมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการหายของบาดแผลสามารถใช้ทำแผลได้ทั้งบาดแผลที่ตื้นและบาดแผลที่ลึกเป็นหลุมได้ แต่เนื่องจากการใช้ในบาดแผลที่มีสารคัดหลั่งปริมาณมาก ทำให้ต้องทำการเปลี่ยนวัสดุปิดแผลบ่อยครั้ง

2.1.1.5 **ไฮโดรเจล (Hydrogel)** ไฮโดรเจลเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของกลีเซอริน (Glycerine) หรือ Water-based gels ที่เคลือบไปยังแผ่นวัสดุปิดแผล มีสมบัติให้ความชุ่มชื้นกับบาดแผล และสามารถลอกเปลี่ยนวัสดุปิดแผลได้โดยไม่ติดบาดแผล ไม่เจ็บและสามารถเอาเนื้อตายออกมาจากบาดแผลได้แต่ไม่ทำลายเนื้อเยื่อผิวหนังปกติ เหมาะสำหรับบาดแผลที่ไม่ลึกมาก บาดแผลที่แห้งและมีสารคัดหลั่งน้อย

2.1.1.6 ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ไฮโดรคอลลอยด์ชั้นด้านในประกอบไปด้วยเจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) พอร์มตัวยึดติดกันเป็นเจลที่มีสมบัติชอบน้ำ ส่วนชั้นด้านนอกเป็นกาวยึดติดกับแผ่นฟิล์มใส (Polyurethane) หรือแผ่นโฟม (Foam) ทำหน้าที่ป้องกันแบคทีเรีย สิ่งแปลกปลอมต่างๆ ผ่านเข้าสู่แผล รวมทั้งป้องกันการเสียดสีให้แก่แผลด้วย ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นยืด สามารถติดบาดแผลได้ทุกรูปร่าง กระตุ้นการหายของบาดแผลและการสลายเนื้อเยื่อที่ตาย ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนแผลบ่อย (ทำแผลทุก 2-3 วัน) แต่ไม่เหมาะกับแผลที่มีสารคัดหลั่งมาก เพราะจะทำให้เสียสมบัติดังกล่าว และอาจเกิดผิวหนังเปื่อยยุ่ยรอบบริเวณแผลได้

2.1.1.7 อัลจิเนต (Alginates) อัลจิเนตเป็นสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ที่มีลักษณะคล้ายโครงสร้างของผนังเซลล์ที่สกัดได้จากสาหร่ายและสาหร่ายสีน้ำตาล มีส่วนประกอบของประจุโซเดียมและแคลเซียม ทำให้มีสมบัติในการอุ้มน้ำสูง จึงเหมาะสำหรับบาดแผลที่มีสารคัดหลั่งปริมาณมาก ๆ เช่น แผลกดทับหรือแผลเบาหวาน เป็นต้น แต่มีข้อเสีย คือ อัลจิเนตจะติดที่บาดแผลทำให้เจ็บเวลาเปลี่ยนวัสดุปิดแผล และอาจทำให้มีเลือดออกหรือเนื้อเยื่อติดออกมาขณะทำการเปลี่ยนวัสดุปิดแผลได้ ดังนั้นจึงต้องทำการชุบล้างบาดแผลด้วยน้ำเกลือก่อนทำการเปลี่ยนวัสดุปิดแผลเพื่อลดอาการดังกล่าว

2.1.1.8 Antimicrobial dressings เป็นวัสดุปิดแผลที่มีส่วนผสมของสารต้านจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการใช้กับบาดแผลที่มีแบคทีเรียปนเปื้อน (Colonization) บาดแผลที่มีการติดเชื้อ (Infection) บาดแผลเรื้อรัง รวมไปถึงบาดแผลที่มีไบโอฟิล์มเคลือบ โดยสารต้านจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ผสมในวัสดุปิดแผล ได้แก่ ซิลเวอร์ (Silver) Iodine-based หรือ Metronidazole เป็นต้น [21, 22]

## 2.2 กระบวนการหายของบาดแผล (Wound healing process)

ร่างกายเป็นเครื่องจักรที่ซับซ้อนมหัศจรรย์และมีกระบวนการหายของแผลแบบพลวัต ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีของระบบต่าง ๆ ในร่างกายในการซ่อมแซมและแทนที่เนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย เมื่อผิวหนังได้รับบาดเจ็บ ระบบอัตโนมัติในร่างกายจะเริ่มทำหน้าที่ทันทีเพื่อซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่ได้รับบาดเจ็บ นั่นคือที่มาของกระบวนการหายของบาดแผล ซึ่งกระบวนการหายของบาดแผลนั้นมีความซับซ้อนกันอยู่โดยแบ่งเป็น 4 ระยะ ดังนี้

**2.2.1 ระยะห้ามเลือด (Hemostasis phase)** เป็นระยะแรกของกระบวนการเริ่มต้นเมื่อเริ่มมีการบาดเจ็บ ร่างกายจะเปิดใช้งานระบบซ่อมแซมฉุกเฉิน ระบบการแข็งตัวของเลือดเริ่มทำงานโดยการสร้างเขื่อนป้องกันการเสียเลือดออกจากร่างกาย ในกระบวนการนี้จะมีเกล็ดเลือดที่จะรวมตัวกับคอลลาเจนและเอนไซม์ที่เรียกว่า “ลิ้มเลือด” จะรวมตัวกันเพื่อไปอุดตันบริเวณที่มีการบาดเจ็บและสร้างตาข่ายไฟบรินซึ่งเสริมสร้างเกร็ดเลือดให้เป็นก้อนที่แข็งแรงเพื่อให้หยุดเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**2.2.2 ระยะอักเสบ (Inflammatory phase)** ระยะนี้ทำหน้าที่มุ่งเน้นการทำลายแบคทีเรียและกำจัดเศษซากที่ได้รับความเสียหายจากการบาดเจ็บเพื่อเตรียมพื้นผิวบริเวณกันแผล ในช่วงระยะนี้เซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดหนึ่งที่เรียกว่า “นิวโทรฟิล (Neutrophil)” จะเข้าสู่บาดแผลเพื่อทำลายแบคทีเรียและกำจัดเศษซาก เซลล์เหล่านี้จะเพิ่มจำนวนสูงสุดในระยะ 24 และ 48 ชั่วโมงหลังจากได้รับบาดเจ็บและลดจำนวนลงอย่างมากหลังจาก 3 วัน เมื่อเซลล์เม็ดเลือดขาวออกไป เซลล์พิเศษที่เรียกว่า “แมคโครเฟจ (Macrophages)” จะเข้ามากำจัดเศษซากต่อไป เซลล์เหล่านี้ยังหลั่งปัจจัยการเจริญเติบโตและโปรตีนที่ดึงดูดเซลล์ระบบภูมิคุ้มกันไปยังบาดแผลเพื่ออำนวยความสะดวกในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ ระยะนี้มักจะใช้เวลา 4 ถึง 6 วันและมักมีอาการปวดบวมแดงร้อนร่วมด้วย

**2.2.3 ระยะงอกขยาย (Proliferative phase)** จะเกิดขึ้นเมื่อบาดแผลได้รับการดูแลทำความสะอาดแล้วบาดแผลจะเข้าสู่ระยะนี้ แต่หากไม่ได้รับการทำความสะอาดบาดแผล กระบวนการหายของแผลจะหยุดชะงักอยู่ที่ระยะการอักเสบหรือเกิดการติดเชื้อหรือแผลหายช้าตามมา การเข้าสู่ระยะงอกขยายเป็นช่วงที่เน้นการเติมเนื้อเยื่อใหม่เพิ่มขึ้นจนปกคลุมบาดแผล ระยะนี้มี 3 ขั้นตอนที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย การเติมเต็มเนื้อเยื่อให้บาดแผล การหดตัวของขอบแผล และกระบวนการเจริญเติบโตของเยื่อบุผิวปกคลุมบาดแผล (Epithelialization) ในช่วงแรกเนื้อเยื่อ Granulation จะมีลักษณะเป็นเม็ดสีแดงเงางามเรียงรายอย่างเป็นระเบียบเติมเต็มบริเวณกันแผลร่วมกับเนื้อเยื่อเกี่ยวพันและหลอดเลือดใหม่ ในระหว่างการหดตัวของขอบแผลจะหดตัวและดึงขอบเข้าหาศูนย์กลางของบาดแผล ระยะนี้เซลล์เยื่อบุผิวจะงอกขยายจากกันแผลหรือขอบและเริ่มเคลื่อนตัวข้ามกระโถดไปมาประสานเชื่อมโยงจนกว่าเยื่อบุผิวปกคลุมถึงบริเวณปากแผล ระยะนี้จะเกิดขึ้นในช่วง 4 ถึง 24 วัน

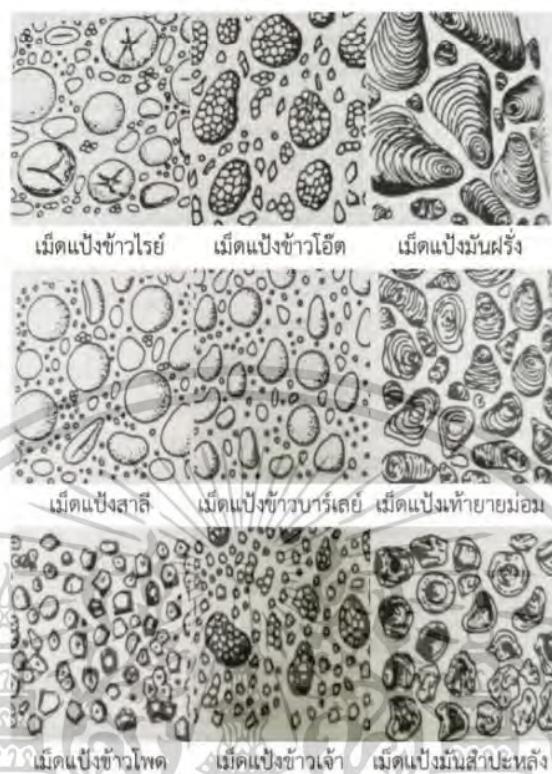
**2.2.4 ระยะการเจริญเติบโต (Maturation phase)** ในช่วงนี้การเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อใหม่จะค่อย ๆ เพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นด้วยเส้นใยคอลลาเจนที่จัดระเบียบใหม่และเจริญเติบโตเต็มที่ มีความแข็งแรงสามารถต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แม้ว่าความแข็งแรงสูงสุดจะถูกจำกัดไว้ที่ 80% ของความแข็งแรงก่อนที่ได้รับบาดเจ็บ ระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันใช้เวลาตั้งแต่ 21 วัน ถึง 2 ปี [23]

## 2.3 แป้ง (Starch)

แป้งถูกสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งเก็บอาหารของพืช เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล แป้งที่มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผสม เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) แต่ถ้าสกัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนได้ แป้งบริสุทธิ์เรียกว่า สตาร์ช (Starch) ในประเทศไทยอุตสาหกรรมแป้งเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปทางการเกษตรหลัก ของประเทศ ส่วนใหญ่ผลิตแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งข้าวเหนียว เพื่อจำหน่ายหรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ วิธีการผลิตแป้งเป็นการนำส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ เมล็ด หัว ราก และลำต้นมาสกัดด้วยวิธีการไม่ และทำให้บริสุทธิ์ด้วยการแยกแป้งออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ของพืช เช่น เยื่อใย โปรตีน น้ำตาลและเกลือจนได้เม็ดแป้ง (Starch granule) ที่บริสุทธิ์ถึง 98-99.5% [24]

### 2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

ภายในเม็ดแป้งมีอะไมโลสและอะไมโลเพกทินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณอะไมโลสประมาณ 20-30% และอะไมโลเพกทินประมาณ 70-80% แต่พืชบางชนิดก็มีปริมาณอะไมโลสสูงถึง 50-80% เช่น แป้งถั่ว หรือแป้งข้าวโพดบางสายพันธุ์ ที่เรียกว่า แป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง (Amylomaize) และข้าวโพดบางสายพันธุ์ก็ไม่มีอะไมโลสเลย เรียกว่า แป้งข้าวโพดเหนียว (Waxy maize) จากความแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด ทำให้รูปร่างของเม็ดแป้งมีความแตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.2 แป้งมันฝรั่งมีลักษณะของเม็ดแป้งเป็นวงรีคล้ายไข่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-100 ไมโครเมตรและมีพอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ทำให้เม็ดแป้งดูดน้ำและพองตัวได้ง่าย ส่วนเม็ดแป้งข้าวโพดจะมีขนาดเล็ก มีลักษณะเหลี่ยมและกลมรวมกันหลากหลายรูปแบบ แป้งสาลีมีเม็ดแป้งที่แบนกลมคล้ายเลนส์ มีขนาดประมาณ 2-35 ไมโครเมตร และแป้งข้าวเจ้ามีเม็ดแป้งค่อนข้างเล็ก มีความหนาแน่นน้อยทำให้สุกได้ง่าย [24]



รูปที่ 2.1 รูปของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ [24]

### 2.3.2 องค์ประกอบของแป้ง

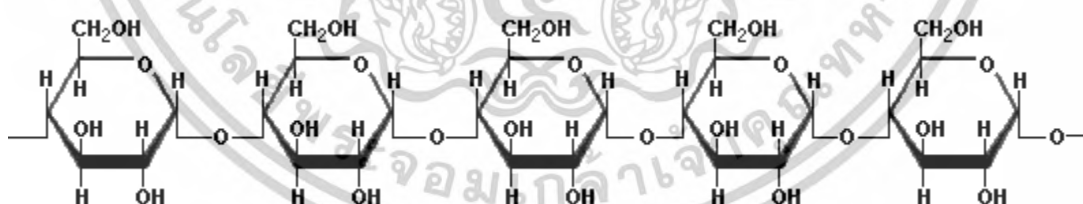
แป้งมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมี โครงสร้างที่ประกอบด้วย คาร์บอน : ไฮโดรเจน : ออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 อนุพันธ์ของแป้งเกิดจากการรวมกันของกลูโคสเป็นพอลิเมอร์สายยาว โดยมีหน่วยของน้ำตาล กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ภายในเม็ดแป้ง ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกทิน แป้งแต่ละชนิดมีส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 ทำให้คุณสมบัติของแป้งในพืชแต่ละชนิดนั้นต่างกัน [24]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของแป้ง [24]

| ชนิดแป้ง          | อะไมโลส (%) | อะไมโลเพกทิน (%) | ความชื้น<br>(ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65%<br>และอุณหภูมิ 20°C) | ไขมัน (%) | โปรตีน (%) | เถ้า (%) | ฟอสฟอรัส (%) |
|-------------------|-------------|------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|------------|----------|--------------|
| แป้งมันฝรั่ง      | 21          | 79               | 19                                                        | 0.05      | 0.06       | 0.4      | 0.08         |
| แป้งข้าวโพด       | 28          | 72               | 13                                                        | 0.7       | 0.35       | 0.1      | 0.02         |
| แป้งสาลี          | 28          | 72               | 13                                                        | 0.8       | 0.4        | 0.2      | 0.06         |
| แป้งมันสำปะหลัง   | 17          | 83               | 13                                                        | 0.1       | 0.1        | 0.2      | 0.01         |
| แป้งข้าวโพดเหนียว | 0           | 100              | 13                                                        | 0.15      | 0.25       | 0.1      | 0.01         |
| แป้งข้าวเจ้า      | 17          | 83               | ไม่มีรายงาน                                               | 0.8       | 0.45       | 0.5      | 0.1          |

### 2.3.2.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 กลูโคซิดิก (Alpha - 1, 4 glucosidic linkage) ดังภาพที่ 2.3 ในแป้งข้าวโพด แป้ง สาลี และแป้งข้าวฟ่าง นั้นมีปริมาณอะไมโลส สูงถึง 28% เมื่อเทียบกับแป้งจากพืชหัวและราก เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งเท้ายายม่อมที่มีอะไมโลสเพียง 20% แป้งบางชนิดไม่มีอะไมโลสอยู่เลย เรียกว่า แป้งเวกซี (Waxy starch) ซึ่งอะไมโลสมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ แต่เมื่ออยู่ในน้ำอะไมโลสจะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลอะไมโลสข้างเคียงเป็นสายยาวคู่ขนานคล้ายตาข่าย อุ่มน้ำน้อยลงและตกตะกอนได้ ส่วนแป้งเวกซีที่ไม่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบจึงมักไม่เกิดการตกตะกอน [24]

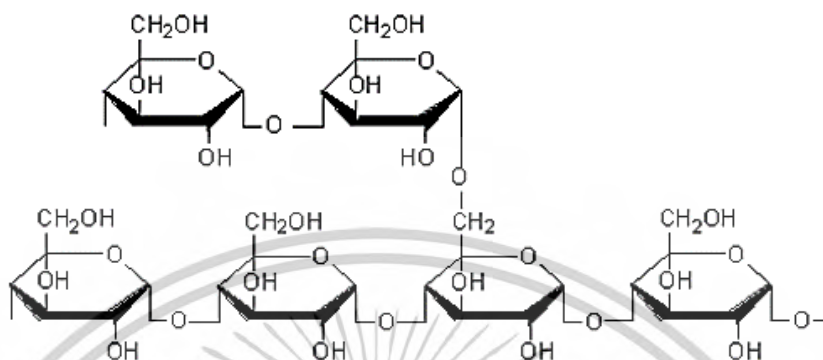


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [24]

### 2.3.2.2 อะไมโลเพกทิน

แป้งโดยทั่วไปนั้นมีปริมาณอะไมโลเพกทิน ประมาณ 70-100% อะไมโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่มีกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย เชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 กลูโคซิดิก และโครงสร้างบริเวณกิ่งสาขาเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 6 กลูโคซิดิก

อะไมโลเพกทินจัดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลเพกทินมากกว่าอะไมโลสประมาณ 100 เท่า [24]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกทิน [24]

### 2.3.2.3 องค์ประกอบอื่น ๆ

ภายในเม็ดแป้งยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งที่สำคัญ และมีปริมาณที่แตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด ได้แก่

1. ไขมัน ที่เป็นองค์ประกอบของแป้งมีปริมาณต่ำกว่า 1% อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งและกระจายอยู่ ทั่วไปภายในเม็ดแป้ง ไขมันบริเวณผิวของเม็ดแป้งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ กลูโคลิพิด และฟอสโฟลิพิด ส่วนไขมันภายในเม็ดแป้งนั้นจะเชื่อมต่อกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวม ๆ สมบัติของไขมันในเม็ดแป้งช่วยลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการดูดน้ำของแป้ง ส่วนไขมันไม่อิ่มตัวที่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2. โปรตีน ในเม็ดแป้งมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่า 1% อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดประจุที่พื้นผิว ส่งผลต่อการพองตัว การดูดน้ำ การกระจายของเม็ดแป้ง และอัตราการเกิดเจลลาทีไนซ์ โปรตีนในเม็ดแป้ง ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) มีผลต่อสี และกลิ่นของผลิตภัณฑ์

3. เถ้า คือ ส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ในแป้ง ได้แก่ โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม และโพแทสเซียม

4. ฟอสฟอรัส ในแป้งมีปริมาณน้อยกว่า 0.1% โดยอยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอน ตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส ฟอสฟอรัสทำให้พื้นผิวของเม็ดแป้งมีประจุลบ แรงผลักระหว่างประจุลบทำให้เม็ดแป้งพองตัวง่าย และมีความหนืดสูง เช่น แป้งมันฝรั่ง [24]

### 2.3.3 สมบัติของแป้ง

#### 2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและการละลายของแป้ง คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงของโครงสร้าง ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต และลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง การละลาย ของเม็ดแป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบที่ต่างกัน แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่ใกล้เคียงกัน เชื่อมต่อกัน แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำแป้งสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของน้ำเชื่อมต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลอย่างอิสระ เม็ดแป้งจึงพองตัวและละลายน้ำได้ ส่งผลให้ความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้น แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เช่น แป้งจากธัญพืช ได้แก่ แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี โครงสร้างร่างแหภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมาก ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้น้อย ส่วนแป้งจากรากหรือกลาลำต้น เช่น แป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิเจลาทีไนซ์ต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช ทำให้มีการพองตัวและการละลายที่ดีกว่า และแป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง การพองตัวของเม็ดแป้งดีที่สุด เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ และมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟตที่ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างไฟฟ้า ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติในการพองตัวและการละลายในแป้งแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.2 [24]

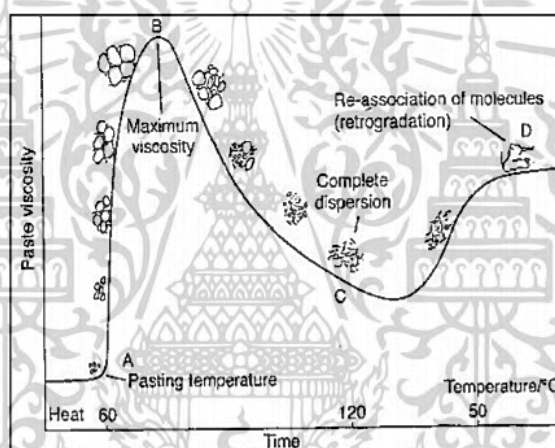
ตารางที่ 2.2 กำลังการพองตัวและการละลายในแป้งแต่ละชนิดที่ 95 °C [24]

| ชนิดแป้ง                    | กำลังการพองตัว การละลาย |     |
|-----------------------------|-------------------------|-----|
|                             | (เท่า)                  | (%) |
| แป้งมันฝรั่ง                | > 1,000                 | 82  |
| แป้งมันสำปะหลัง             | 71                      | 48  |
| แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot) | 54                      | 28  |
| แป้งมันเทศ                  | 46                      | 18  |
| แป้งข้าวโพด                 | 24                      | 25  |
| แป้งข้าวสาลี                | 21                      | 41  |
| แป้งข้าวเจ้า                | 19                      | 18  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 ความหนืดของแป้ง

ความหนืดเกิดจากน้ำแป้งได้รับความร้อน จนถึงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (Pasting temperature) เม็ดแป้งจึงเริ่มเกิดความร้อน ต่อจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้ดี ปริมาณน้ำรอบเม็ดแป้งลดน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีความหนืดสูงที่สุด (Peak viscosity) คือ จุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ ขณะที่อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นอีก โดยมีแรงกวนอย่างสม่ำเสมอ ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพกทินภายในเม็ดแป้งแตกออก จนมีความหนืดลดลง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งแสดงดังภาพที่ 2.5 [24]



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งระหว่างการต้มสุก [24]

### 2.3.3.3 เจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

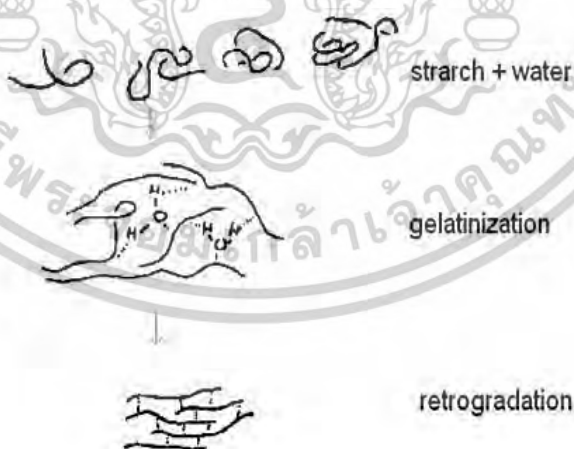
เม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดการพองตัวจนถึงความร้อนระดับหนึ่งเม็ดแป้งจะแตกออก อะไมโลสและอะไมโลเพกทินในเม็ดแป้งหลุดออกมา สารละลายน้ำแป้งที่ได้มีความข้นหนืดมากขึ้นจนเป็นแป้งเปียก (Starch paste) เรียกกระบวนการนี้ว่า เจลาติไนเซชัน และอุณหภูมิเริ่มต้นการพองตัวของเม็ดแป้ง คือ อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (Gelatinization temperature) เม็ดแป้งขนาดเล็กเกิดเจลาติไนเซชันได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเม็ดแป้งขนาดใหญ่ อุณหภูมิเจลาติไนเซชันระบุเป็นช่วงอุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 2.3 [24]

ตารางที่ 2.3 สมบัติโดยทั่ว ๆ ไปของเม้ดแบ่งจากพืชบางชนิด [24]

| ชนิดแป้ง          | ช่วงอุณหภูมิ<br>เจลาคิโนเซชัน (°C) | ความชุ่ม-ใส<br>ของสารละลาย | ความสามารถในการเกิดเจลและรี<br>โทรเกรเดชัน |
|-------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| แป้งข้าวโพด       | 80-62                              | ชุ่ม                       | สูง                                        |
| แป้งข้าวโพดเหนียว | 72-63                              | ชุ่มเล็กน้อย               | ต่ำมาก                                     |
| แป้งมันฝรั่ง      | 65-58                              | ใส                         | ปานกลางถึงต่ำ                              |
| แป้งมันสำปะหลัง   | 65-52                              | ใส                         | ปานกลาง                                    |
| แป้งสาลี          | 85-52                              | ชุ่ม                       | สูง                                        |
| แป้งข้าวเจ้า      | 78-61                              | ชุ่ม                       | สูง                                        |

#### 2.3.3.4 รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

กระบวนการรีโทรเกรเดชัน เป็นกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะไมโลสที่หลุดออกมาจากเม้ดแบ่ง โดยจัดเรียงตัวแบบคู่ขนานของสายอะไมโลสที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของอะไมโลสอีกสายหนึ่ง ดังภาพที่ 2.6 ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง เมื่อสารละลายแป้งเกิดการจัดเรียงตัวอย่างซ้ำ ๆ ทำให้ได้แป้งเปียกที่ชุ่มและเกิดตะกอนขนาดใหญ่ แต่ถ้าแป้งเปียกถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นของสายอะไมโลส ส่วนสายของอะไมโลเพกทินไม่เกิดรีโทรเกรเดชัน เนื่องจากไม่สามารถจัดเรียงตัวคู่ขนานกันได้ การเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันใน แป้งจะส่งผลต่อการผลิตอาหาร เช่น การไม่ขึ้นฟูของเค้ก การแยกชั้นของครีม และการแข็งแข็งของขนมปัง เป็นต้น [24]



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดัดแปรตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (Starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์และ/หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งลักษณะเกณฑ์ชี้บ่งต่าง ๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) เนื่องจากแป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ความหนืดของแป้งไม่คงที่ตลอดกระบวนการผลิต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำจึงมีการนำแป้งมาผ่านกระบวนการ เพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน โดยการดัดแปรแป้งมี 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี (Chemical modification) วิธีทางกายภาพ (Physical modification) และวิธีทางชีวภาพ (Biological modification) แป้งดัดแปรที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น [25]

#### 2.3.4.1 ประเภทของการดัดแปรแป้ง

##### 1. การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification)

##### ก. การเกิดอนุพันธ์ (Derivative)

- (1) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (Monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งอะซิเตท หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล
- (2) การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิงค์ (Cross-linking starch)

ข. การลดขนาดโมเลกุลของแป้งด้วยกรด (Acid thinning) เช่น แป้งที่ถูกย่อยด้วยกรด

ค. เดกซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะโดยการใช้ความร้อน หรือความร้อนและกรด เช่น เดกซ์ทรีน (Dextrin)

ง. ออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุล โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น แป้งออกซิเดชัน (Oxidized starch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. การย่อยสลาย (Hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์หรือกรด เพื่อย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin)

## 2. การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

ก. เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งจนผ่านขั้นตอนของ

การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์

ข. แป้งละลายน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนของการเกิดเจลาติไนเซชัน

ค. การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล เป็นการทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกล จะทำให้ได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

ง. แอนเนลิ่ง (Annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชันของแป้ง

จ. การใช้ความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนในอุณหภูมิสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันของแป้งในขณะที่แป้งอยู่ในสถานะที่มีความชื้นต่ำ

## 3. การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification)

คือ การเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

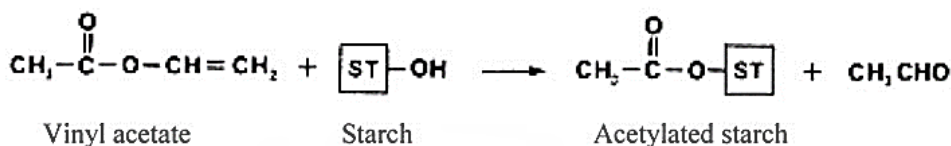
ก. แป้งที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย (Waxy starch)

ข. แป้งที่มีอะไมโลสสูง (High-amylose starch) [26]

### 2.3.5 แป้งอะซิเตท (Acetated starch)

แป้งอะซิเตทเกิดจากการแทนที่ด้วยหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของเม็ดแป้งซึ่งเกิดผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยเกิดการแทนที่อะตอมไฮโดรเจนในหมู่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งด้วยหมู่อะซิทิล ( $C_2H_3O$ ) ดังนั้นแป้งดัดแปรที่ได้จึงมีหมู่ฟังก์ชันแบบเอสเทอร์ และสารที่ทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ (Esterifying agent) ได้แก่ กรดคาร์บอกซิลิก หรือแอนไฮไดรด์ หรือไวนิลอะซิเตท เป็นต้น ดังรูปที่ 2.7 โดยทั่วไปแล้วกลูโคสซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโมเลกุลแป้งจะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถถูกแทนที่ได้ 3 ตำแหน่ง คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ดังนั้นระดับการแทนที่สูงสุดที่สามารถจะเกิดได้ต่อหนึ่ง

หน่วยกลูโคสจึงมีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งอาจเรียกค่าดังกล่าวว่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution ; DS) [27]



## รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างแป้งและไวโนลอะซิเตท [28]

สมบัติของแป้งอะซิเตท ได้แก่ อุณหภูมิเจลาที่ในซึ่ลดลง ความหนืดสูงขึ้น อัตราการคั่วตัวลดลง และไม่มีการบีบตัวของน้ำออกมานอกเจล (Synerisis) ทำให้สีของแป้งไม่ขุ่น ฟิล์มจากแป้งอะซิเตทมีความใส มันเงา และยืดหยุ่น ละลายน้ำได้มาก และมีแนวโน้มที่จะแตกตัวน้อยลง

ในอุตสาหกรรมอาหารใช้แป้งอะซิเตทเป็นส่วนประกอบในอาหารแช่แข็ง เนื่องจากสมบัติที่ละลายน้ำได้มาก แป้งอะซิเตทดัดแปรร่วมกับการครอสลิงค์ใช้เป็นสารเพิ่มความชื้นในอาหารกระป๋อง อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง เบเกอรี่ อาหารเด็กอ่อน เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ผลิตกระดาษกาวที่มีความยืดหยุ่น เป็นมันเงา และนิยมนำมาเคลือบกระดาษซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการพิมพ์ดีขึ้น

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้แป้งอะซิเตทเคลือบเส้นด้าย ทำให้เส้นด้ายแข็งแรง ยืดหยุ่น ยืดเกาะกันได้ดี และแยกออกได้ง่าย เนื่องจากละลายน้ำได้ดี [27]

## 2.4 ฟิล์มแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม หรือขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ได้ และมีราคาถูก จึงมีแนวโน้มในการนำมาใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ได้ พบว่า ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เตรียมได้จากแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เพื่อเป็นพลาสติกไฮเซอร่แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะปรากฏใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร มีความต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กิโลกรัมต่อตารางเมตร การยืดตัวร้อยละ 10.13 ความทนต่อการพับ 45 ครั้ง และสามารถนำมาขึ้นรูป

เป็นช่องที่ปิดผนึกได้ด้วยความร้อน แต่เนื่องจากฟิล์มแข็งมันสำปะหลังยังมีข้อจำกัด คือ มีความไวต่อความชื้นและสามารถดูดซับน้ำได้มาก จึงเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์แห้ง [27]

#### 2.4.1 สมบัติของฟิล์มแข็ง

ในอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการทำแข็งแห้งเพื่อจุดประสงค์ในการห่อหุ้มกระดาษ หรือเส้นใย (Coating) หรือเพื่อใช้เป็นกาว (Adhesive) สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ ฟิล์มแข็งจะมีสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์ม และความเงามัน (Gloss)

แข็งมันสำปะหลัง แข็งมันฝรั่ง และแข็งข้าวโพดเหนียวมีความยืดหยุ่นมากกว่าแข็งสาเลีจึงเหมาะสมในการอบแห้งมากกว่าแข็งข้าวโพดและแข็งสาเลี เนื่องจากขณะอบแห้งเม็ดแข็งข้าวโพดและเม็ดแข็งสาเลีจะเปราะ แตกหักได้ง่าย

ฟิล์มแข็งที่ได้จากแหล่งที่ต่างกันจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้แตกต่างกัน และมีอัตราในการเกิดรีโทเกรเดชันต่างกัน แป้งจากธัญพืชมีอะไมโลสและไขมันในปริมาณสูง ทำให้เกิดการรีโทเกรเดชันในระหว่างการทำให้แข็งแห้ง ทำให้ส่วนนั้นไม่ละลายและเกิดเป็นร่างแห ก่อให้เกิดการไม่ละลายของส่วนอะไมโลเพคตินอีกด้วย ในขณะที่แข็งมันฝรั่ง แข็งมันสำปะหลัง และแข็งข้าวโพดข้าวเหนียวมีแนวโน้มการเกิดรีโทเกรเดชันต่ำ จึงสามารถละลายในน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์ ฟิล์มแข็งจะมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แป้งฟิล์มที่ได้นำไปใช้ผลิตภัณฑ์ประเภทกาว เช่น ใช้ทำซองจดหมาย แสตมป์ กระดาษกาว

ฟิล์มแข็งจากมันสำปะหลัง แข็งมันฝรั่ง และแข็งข้าวโพดเหนียวมีความใสและความมันเงามากกว่าฟิล์มแข็งจากธัญพืช เนื่องจากในระหว่างการทำแห้งและการเก็บรักษาแป้งจากธัญพืชจะเกิดรีโทเกรเดชัน โมเลกุลอะไมโลสจะเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายทำให้ฟิล์มขุ่น และเปราะง่าย [27]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด [27]

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

### 2.4.2 การเกิดฟิล์ม

การเกิดฟิล์มจะมีองค์ประกอบหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งมีสมบัติในการเกิดฟิล์ม ตัวทำละลาย และสารเติมแต่งที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม เมื่อนำองค์ประกอบมาทำให้ละลายและกระจายตัวแล้วแยกตัวทำละลายออกจะเกิดแรงยึดเหนี่ยว 2 ชนิด ได้แก่ แรงโคฮีชัน (Cohesion) และแรงแอดฮีชัน (Adhesion) โดยแรงโคฮีชันเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความยาว และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสถานะในการเตรียมฟิล์ม จึงควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายที่อุ่นและทำให้ฟิล์มแห้งด้วยอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่เหมาะสม ส่วนแรงแอดฮีชันจะเป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่เกี่ยวข้องในการเตรียมฟิล์ม เช่น พลาสติกซีเซอร์ เป็นต้น ทั้งแรงโคฮีชันและแอดฮีชันจะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม [27]

### 2.4.3 การขึ้นรูปฟิล์ม

ในการขึ้นรูปฟิล์ม สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.4.3.1 การเทสารละลายลงบนวัสดุต่าง ๆ (Solvent casting) เป็นการขึ้นรูปโดยการเทสารละลายของฟิล์ม และแผ่เป็นแผ่นบาง ๆ ลงบนภาชนะหรือภาชนะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม และใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้แห้ง แล้วลอกออก จะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่ต้องการ

2.4.3.2 การเอกซ์ทรูชัน (Extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือในการทำฟิล์มเป็นแผ่นบาง แต่วัสดุที่ใช้จะต้องมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

2.4.3.3 การทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) เป็นการขึ้นรูปโดยการผ่านแผ่นฟิล์มเข้าไปในลูกกลิ้งร้อน เพื่อรีดให้ฟิล์มเรียบและแห้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการขึ้นอยู่กับแรงกดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์ม และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ฟิล์มผ่านเข้าไป [27]

## 2.5 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทย ทั้งนี้เป็นที่ยอมรับกันในความทนแล้งได้ดีขยายพันธุ์ง่าย ต้นทุนการเพาะปลูกไม่สูงจึงเป็นที่นิยมของเกษตรกรโดยทั่วไป โดยเฉพาะเกษตรกรซึ่งมีรายได้น้อย มันสำปะหลังสามารถปลูกได้ทั่วไป ยกเว้นในบริเวณที่ดินมีความชื้นสูง ฝนตกหนักหรือดินเค็ม ดังนั้นจึงพบเห็นมันสำปะหลังปลูกได้ทั่วไปกระจายไปทุกภาคบริเวณที่มีการปลูกมากที่สุดคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก มีผลผลิตทั่วประเทศอยู่ในปริมาณ 16 ถึง 18 ล้านตันหัวมันสดต่อปี จึงถือได้ว่าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่รายหนึ่งในโลก (ทั่วโลกมีการผลิตหัวมันสดประมาณ 160 ล้านตัน) ซึ่งการใช้ประโยชน์หัวมันสดภายในประเทศนั้นมีตั้งแต่การแปรรูปเบื้องต้นในระดับเกษตรกรในระดับเกษตรกรจนกระทั่งใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ [29]

### 2.5.1 องค์ประกอบของหัวมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรตคือแป้งไว้ในรากความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องมาจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยวและปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจแตกต่างกันไปโดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอและไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยว จะมีส่วนประกอบแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง

| องค์ประกอบในหัวมัน        | ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)       |
|---------------------------|------------------------------------------|
| น้ำ                       | 60.21-75.32                              |
| เปลือก                    | 4.08-14.08                               |
| เนื้อ (แป้ง)              | 25.87-41.88                              |
| ไซยาไนด์ (PPM)            | 2.85-39.27                               |
| องค์ประกอบในเนื้อมัน      | ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน) |
| แป้ง                      | 71.9-85.0                                |
| โปรตีน                    | 1.57-5.78                                |
| เยื่อใย                   | 1.77-3.95                                |
| เถ้า                      | 1.20-2.80                                |
| ไขมัน                     | 0.06-0.43                                |
| คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง | 3.59-8.66                                |

จะเห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้นนอกจากน้ำแล้วคือแป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูงปริมาณน้ำจะน้อยและความหนาแน่นของหัวจะมีสูงตามไปด้วย [29]

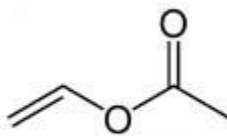
### 2.5.2 แป้งมันสำปะหลัง

ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมาก ๆ เช่น บราซิล อินเดีย อินโดนีเซีย และไทย เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลกโดยมีกำลังความสามารถการผลิตมากกว่า 2 ล้านตันมันสำปะหลังต่อปี มีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสูงที่สุดในบรรดาทุก ๆ ประเทศและได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็น “แป้งไทย” เป็นแป้งของคนไทยที่คนไทยสามารถผลิตได้มากที่สุดและเป็นแป้งที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกที่สุด

แป้งมันสำปะหลังมีสมบัติที่พิเศษ คือ มีความขาวนวล เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส กล่าวได้ว่าแป้งไทยขาวใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี เหมาะสมมากเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะในอาหารจะไม่มีกลิ่นรสแปลกปลอม [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของไวนิลอะซิเตท [30]

ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate) หรือที่เรียกว่า 1-Acetoxylethylene Ethenyl ethanoate Ethenyl acetate และ Acetic acid vinyl ester เป็นของเหลว ไม่มีสี และมีกลิ่นฉุน มีสูตร  $\text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2$  และเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตสารเคมีซึ่งนำไปใช้ในการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคและอุตสาหกรรมที่หลากหลาย [30]

ไวนิลอะซิเตทส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตโพลีไวนิลอะซิเตท (Polyvinyl acetate ; PVAc) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol ; PVOH หรือ PVA) ซึ่งในความเป็นจริง 80% ของไวนิลอะซิเตททั้งหมดที่ผลิตในโลกถูกใช้เพื่อทำสารเคมีทั้งสองนี้ โพลีไวนิลอะซิเตทใช้ในสีทาเคลือบกระดาษและการบำบัดสิ่งทอ ในขณะที่โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ใช้ในการผลิตกระดาษเคลือบและบรรจุภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้และการปรับขนาดสิ่งทอ [30]

ไวนิลอะซิเตทยังใช้ทำโพลีไวนิลบิวทิรัล (Polyvinyl butyral ; PVB) ซึ่งใช้ในกระจกนิรภัยลามิเนตสำหรับรถยนต์และอาคาร นอกจากนี้เรซินเอทิลีน - ไวนิลอะซิเตท (Ethylene-vinyl acetate ; EVA) ยังทำจากไวนิลอะซิเตท และใช้ในการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ กระเป๋าสำหรับงานหนัก การเคลือบโดยการอัดขึ้นรูป การหุ้มสายไฟ และสายเคเบิล กาวร้อนละลายและโฟมแบบเชื่อมขวาง ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ทำจากไวนิลอะซิเตท คือ เรซินเอทิลีน - ไวนิลแอลกอฮอล์ (Ethylene-vinyl alcohol ; EVOH) ซึ่งใช้เป็นตัวกั้นก๊าซในบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มหลายชั้นและเป็นชั้นกั้นในถังรถยนต์ [30]

### สมบัติของไวโนลอะซิเตท

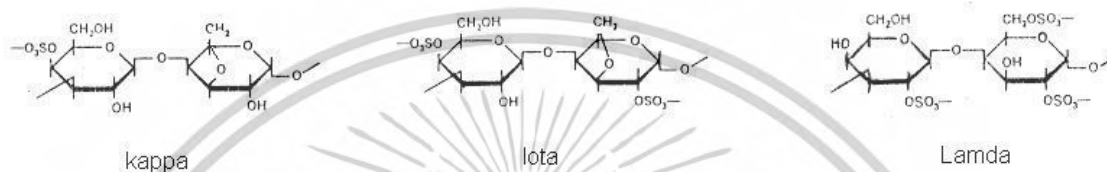
|                                          |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| ลักษณะ                                   | : ของเหลว        |
| มวลโมเลกุล                               | : 86.09 กรัม/โมล |
| สี                                       | : ไม่มีสี        |
| กลิ่น                                    | : มีกลิ่นฉุน     |
| ค่าขีดจำกัดของกลิ่นที่รับได้             | : 0.12 ppm       |
| pH                                       | : ไม่มีข้อมูล    |
| อัตราการระเหยสัมพัทธ์(บิวทิลอะซิเตท = 1) | : ไม่มีข้อมูล    |
| จุดหลอมเหลว                              | : -93.2 °C       |
| จุดเยือกแข็ง                             | : ไม่มีข้อมูล    |
| จุดเดือด                                 | : 72.2 °C        |
| จุดวาบไฟ                                 | : -7.8 °C        |
| อุณหภูมิที่ลุกติดไฟได้เอง                | : 402 °C         |

## 2.7 คาราจีแนน (Carrageenan)

คาราจีแนน (Carrageenan) เป็นสารประเภทเดียวกับแป้ง คือ เป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Rhodophyceae) เช่น สาหร่ายพม nang (Gracilaria fisheri) คาราจีแนนเป็นกัม (Gum) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสมบัติเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) คือดูดน้ำและแขวนลอยในน้ำ ซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางในวงการอาหาร เพื่อเป็นตัวสร้างเจล (Gelling) ตัวเพิ่มเนื้อ (Thickening) และเป็นสารสร้างความเสถียร (Stabilizer) ในอาหาร โดยสินค้าหลักที่ใช้จะเป็นสินค้ากลุ่มนม เช่น นม นมข้น ไอศกรีม และโยเกิร์ต และสินค้าอื่นๆ เช่น ซอส เบียร์ ยาสีฟัน นมถั่วเหลือง โซดา เนื้อสัตว์ นอกจากในอาหารแล้ว ยังมีการใช้คาราจีแนนในยา เป็นต้น [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของคาราจีแนนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นพอลิเมอร์ของกาแล็กโทส (Galactose) และ 3,6-Anhydrogalactose (3,6-AG) มีทั้งชนิดที่มีหมู่ซัลเฟต และไม่มีหมู่ซัลเฟตซึ่งทำให้คาราจีแนน มีสมบัติต่าง ๆ เช่น การละลาย (Solubility) การเกิดเจล (Gelation) แตกต่างกันไปตามชนิด โดยคาราจีแนนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของหมู่ซัลเฟต (Sulfate) ดังนี้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของคาราจีแนนชนิดต่าง ๆ [32]

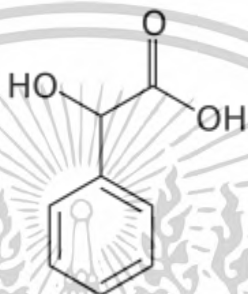
2.7.1. แคปปาคาราจีแนน (Kappa-carrageenan) มีโครงสร้างประกอบด้วยน้ำตาลกาแล็กโทส (Galactose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิด บีตา-1,3 และมีกลุ่มซัลเฟต (Sulfate) ที่ตำแหน่งที่ 4 แคปปาคาราจีแนนละลายได้ดีในน้ำร้อน น้ำนมร้อน และละลายได้ในน้ำเชื่อม หรือน้ำเกลือที่ร้อน (ความเข้มข้นของน้ำตาลหรือเกลือต่ำกว่า 50%) เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเจล (Gel) ประเภท Thermoreversible gel มีลักษณะใส เนื้อสัมผัส แข็ง แน่น แต่เปราะ ซึ่งเกิดเจลได้ทั้งกับน้ำ น้ำผลไม้ และน้ำนม

แคปปาคาราจีแนนใช้เป็นสารสร้างความเสถียร (Stabilizing agent) ในน้ำนม เนื่องจากแรงระหว่างประจุทำให้เคซีนไมเซล (Casein micelle) คงตัวอยู่ได้โดยไม่แยกชั้นออกจากเวย์ (Whey) คาราจีแนนทำให้เจลแข็งแรงขึ้น ถ้ามีโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) และจะคงตัวต่อกรดที่ค่า pH มากกว่า 3.8 เจลจากคาราจีแนนไม่ทนต่อการแช่เยือกแข็งและการหลอมละลาย (Freezing-thawing instability) แต่ถ้าใช้ร่วมกับ Locust bean gum จะช่วยให้ทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายได้ดีขึ้น

2.7.2. ไอโอดาคาราจีแนน (Iota-carrageenan) มีจำนวนกลุ่มซัลเฟตมากกว่าแคปปาประมาณ 25-50% ทำให้ความไวต่อโพแทสเซียมไอออนลดลง มีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่มและยืดหยุ่นกว่าแคปปาคาราจีแนน และทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายในน้ำแข็งได้ดีกว่า

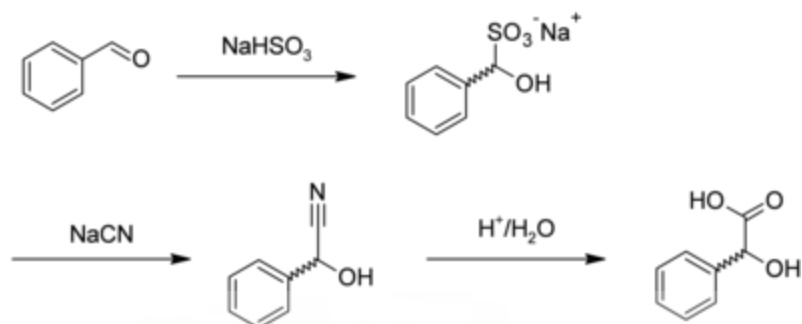
2.7.3. แลम्บ์ดาคาราจีแนน (Lambda-carrageenan) มีกลุ่มซัลเฟตทั้งที่ตำแหน่งที่ 2 และที่ตำแหน่งที่ 6 และไม่เกิดการปิดวงที่คาร์บอนตำแหน่ง 3 และ 6 จึงมีผลทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล (Gel) [31]

## 2.8 กรดแมนดีลิก (Mandelic acid)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของกรดแมนดีลิก

กรดแมนดีลิก (Mandelic acid; MA) เป็นกรดอัลฟาไฮดรอกซี (Alpha-hydroxy acid) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่ากรดแลคติก (Lactic acid) และกรดไกลโคลิก (Glycolic acid) เป็นสารที่ไม่มีพิษ ซึ่งหากรับประทานเข้าไปจะถูกขับออกทางปัสสาวะ กรดแมนดีลิกมีประวัติการใช้ในทางการแพทย์เป็นยาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยเฉพาะในการรักษาการติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ ปัจจุบันแพทย์ผิวหนังแนะนำให้ กรดแมนดีลิกเป็นสารที่มีประโยชน์สำหรับปัญหาผิวหลากหลาย ตั้งแต่ผิวไปจนถึงริ้วรอย โดยกรดแมนดีลิกมีชื่อมาจากคำภาษาเยอรมันว่า “Mandal (อัลมอนด์)” และได้มาจากการไฮโดรไลซิสของสารสกัดจากอัลมอนด์ขมและได้ทำการศึกษาอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในการรักษาปัญหาผิวทั่วไป เช่น ผิวเสื่อมสภาพจากแสงแดด การมีสีผิวไม่สม่ำเสมอ และสิว และยังมีการศึกษาว่ากรดแมนดีลิกมีประโยชน์ในการยับยั้งการสร้างเม็ดสี รักษาสิวอักเสบที่ไม่เป็นถุง และฟื้นฟูผิวที่เสื่อมสภาพจากแสงแดด นอกจากนี้ยังพิสูจน์ว่า กรดแมนดีลิกมีประโยชน์ในการเตรียมผิวของผู้ป่วยสำหรับการลอกด้วยเลเซอร์และในการรักษาผิวหลังการผ่าตัดด้วยเลเซอร์ [20]



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดกรดแมนติลิกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแมนติลไนด์

#### สมบัติของกรดแมนติลิก

|                    |                                                                                          |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| สูตรเคมี           | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>                                             |
| มวลโมเลกุล         | 152.149 g·mol <sup>-1</sup>                                                              |
| ลักษณะทางกายภาพ    | ผงสีขาวเป็นผลึก                                                                          |
| ความหนาแน่น        | 1.30 g/cm <sup>3</sup>                                                                   |
| จุดหลอมเหลว        | 119 °C                                                                                   |
| จุดเดือด           | 321.8 °C                                                                                 |
| ละลายในน้ำ         | 15.87 g/100 mL                                                                           |
| ความสามารถละลายได้ | ละลายได้ในไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) เอทานอล (Ethanol)<br>ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) |
| pKa                | 3.41                                                                                     |
| ดัชนีหักเหแสง (nD) | 1.5204                                                                                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 การต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial agent)

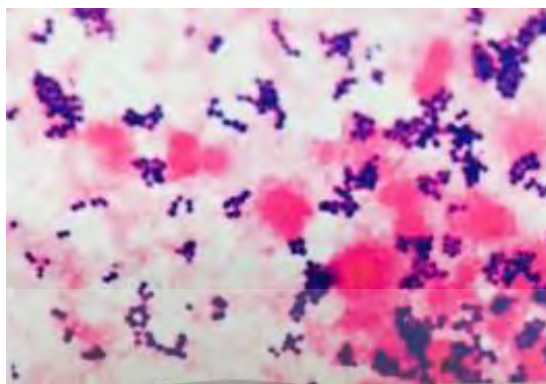
### 2.9.1 เชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวสัมผัส

เนื่องจากการติดเชื้อแบคทีเรีย เชื้อสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายวิธี เช่น การรับประทานอาหารที่มีเชื้อ การหายใจเอาอากาศที่มีเชื้อโรคเข้าไป รวมถึงการสัมผัสเชื้อโรคจากพื้นผิวต่าง ๆ แล้วนำมาสัมผัสกับร่างกายหรืออาหารแล้วรับประทานเข้าไป ก็ทำให้เกิดการติดเชื้อได้ ดังนั้นพื้นผิวสัมผัสต่าง ๆ อาจเป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคได้ซึ่งเชื้อโรคอาจถูกแพร่จากผู้ติดเชื้อโดยตรง หรือนำมาโดยตัวกลางหรือพาหะอื่น ๆ เช่น ลม น้ำ และแมลง เป็นต้น เชื้อก่อโรคที่มักพบบนพื้นผิวสัมผัสมักพบได้หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เชื้อ *S.aureus*, *B.cereus*, *E.coli* และ *P.aeruginosa* เป็นต้น [33]

#### 2.9.1.1 *Staphylococcus aureus*

*S. aureus* เป็นแบคทีเรียรูปร่างทรงกลม ติดสีแกรมบวก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร เรียงตัวเป็นกลุ่ม ๆ ทำให้ดูเหมือนพวงองุ่น แต่จะพบเป็นเซลล์เดี่ยว เป็นคู่ และเป็นสายสั้น ๆ (โดยมากไม่เกิน 4 เซลล์) อยู่ปะปนด้วยเสมอ ดังรูปที่ 2.9 เชื้อนี้ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนไหว ส่วนใหญ่ไม่มีแคปซูล ให้ผลบวกในการทดสอบ Catalase และในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาลให้กรด การติดต่อของเชื้อมาสู่คน ติดต่อโดยการรับประทานหรือดื่มน้ำที่มีเชื้อปนเปื้อนเข้าไปประมาณ 1-6 ชั่วโมง เนื่องจากสารพิษไปออกฤทธิ์ที่เยื่อบุลำไส้ ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องและท้องเดิน ส่วนมากไม่มีไข้ ในรายที่รุนแรงอาจช็อคได้ แต่ส่วนใหญ่อาการจะดีขึ้นใน 8-24 ชั่วโมง โรคนี้มีลักษณะพิเศษซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการวินิจฉัยได้ คือ มีประวัติเป็นพร้อม ๆ กันหลายคนและมีระยะฟักตัวสั้น อาการรุนแรงของโรคขึ้นอยู่กับจำนวนสารพิษในอาหารที่รับประทานเข้าไป เชื้อ *S. aureus* ที่ผลิตสารพิษส่วนใหญ่มักเป็นพวกที่สามารถสังเคราะห์เอนไซม์ Coagulase ได้ [33]

แหล่งที่พบเชื้อ *S. aureus* เป็นเชื้อที่พบได้ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ เช่น จมูก มือ แผลเรื้อรัง ผิวหนัง รวมทั้งเสื้อผ้า อากาศ และฝุ่นละออง นอกจากนี้ยังพบเชื้อ *S. aureus* ปนเปื้อนเครื่องโทรศัพท์สาธารณะในโรงพยาบาล บริเวณหมายoleyมือจับ ที่ฟังและที่พูดซึ่งหากมีการสัมผัสในบริเวณที่ปนเปื้อนเชื้อโรคดังกล่าวจะทำให้เกิดการเจ็บป่วยได้ [33]



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเชื้อ *Staphylococcus aureus* [33]

#### 2.9.1.2 *Escherichia coli*

*E.coli* เป็นเชื้อจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีแหล่งอาศัยอยู่ในลำไส้ของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น อีกทั้งยังพบในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ พืช อากาศ และดิน *E. coli* เป็นแบคทีเรียในวงศ์ Enterobacteriaceae สกุล *Escherichia* เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์ม เชื้อ *E. coli* รูปร่างเป็นแท่ง ติดสีแกรมลบ ดังรูปที่ 2.10 สามารถเจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน เคลื่อนที่โดยใช้ Paritrichous flagella ไม่สร้างสปอร์ สามารถเจริญได้ในช่วงอุณหภูมิ 10-40 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 35-37 องศาเซลเซียส ก่อให้เกิดโรคเมื่อได้รับเชื้อภายใน 18-24 ชั่วโมง ผู้ป่วยจะมีอาการอุจจาระร่วง บ่อยครั้ง อุจจาระเป็นมูกเลือด ปวดท้อง มีอาการชืด เนื่องจากสารพิษของเชื้อไปทำลายเม็ดเลือดแดง จึงเกิดภาวะไตวายได้แต่ผู้ติดเชื้อบางรายอาจไม่แสดงอาการของโรค แต่สามารถถ่ายทอดเชื้อให้ผู้อื่นได้

แหล่งที่พบเชื้อ *E. coli* มักพบเชือนี้ปนเปื้อนในวัตถุดิบที่นำมาผลิต พนักงาน แผลงสัตว์กัดแทะ อุปกรณ์ต่าง ๆ น้ำ และน้ำแข็งที่ใช้ในกระบวนการผลิต [33]



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ *Escherichia coli* [33]

## 2.9.2 กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

กลไกการออกฤทธิ์ในการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรียของสารต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.9.2.1. **ผนังเซลล์ (Cell wall)** โดยออกฤทธิ์ที่ระดับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย โดยทำปฏิกิริยากับเซลล์ออสแกนิกในผนังเซลล์ ซึ่งรบกวนระบบเมตาบอลิซึม ทำให้ผนังเซลล์ไม่แข็งแรง ไม่สามารถทนทานต่อความดันของสภาพแวดล้อมได้ ผนังเซลล์จะบางลง หรืออาจเกิดรูและส่งผลให้เซลล์แตกได้ในที่สุด

2.9.2.2. **เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)** โดยเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียประกอบด้วยชั้นโปรตีน-ลิพิด-โปรตีน (Protein-lipid-protein) มีผลทำให้กลไกการควบคุมการเข้าออกของสารต่าง ๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เสียไป สารต้านเชื้อแบคทีเรียจะไปแทรกกระหว่างโปรตีนกับลิพิด ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์ฉีกขาด สารในไซโตพลาสซึมจึงไหลออกมา ทำให้เซลล์แบคทีเรียตายในที่สุด

### 2.9.2.3. สารสังเคราะห์ในไซโตพลาสซึม

ก. ทำลายระบบดีเอ็นเอ (DNA) เนื่องจากดีเอ็นเอเป็นสารพันธุกรรมในแบคทีเรีย ประกอบด้วยสายพอลินิวคลีโอไทด์ (Polynucleotide) โดยทั่วไปจะยับยั้งการนำไทมีน (Thymine) ที่เข้าจับกับนิวคลีโอไทด์ ทำให้การสร้างดีเอ็นเอไม่สมบูรณ์

ข. ทำลายระบบอาร์เอ็นเอ (RNA) โดยอาร์เอ็นเอจะเป็นตัวกลางที่ส่งผ่านรหัสพันธุกรรมจากดีเอ็นเอ หากมีการขัดขวางการทำงานของอาร์เอ็นเอ จะส่งผลให้ไม่สามารถไปจับคู่กับโปรตีนได้

ค. ทำลายการสังเคราะห์โปรตีน โดยยับยั้งการสร้างโปรตีนที่ไรโบโซม (Ribosome) ซึ่งเป็นบริเวณที่เอ็มอาร์เอ็นเอ (m-RNA) มาเกาะอยู่เพื่อทำการแปลรหัส ส่งผลให้โครงสร้างโปรตีนเปลี่ยนไป [33]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kalita, D. และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำแป้งข้าวเหนียว (Waxy rice starch) มาดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณ 4 6 8 และ 10% ซึ่งมีองค์การแทนที่อยู่ที่ 0.021 0.023 0.032 และ 0.056 ตามลำดับ และได้ศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สเปกตรัมของ

IR ของแป้งที่ถูกดัดแปร พบว่าแป้งข้าวเหนียวที่ถูกดัดแปรเมื่อศึกษา SEM นั้นแสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่พื้นผิวและการรวมตัวกันของเม็ดแป้ง และการศึกษา XRD แสดงให้เห็นถึงสัญญาณพิคของผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นในการทำอะซิทิเลชัน นอกจากนี้การศึกษา DSC ยังแสดงให้เห็นสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่อุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้งดัดแปรนั้นสูงขึ้นกว่า และมีการเปลี่ยนเอนทาลปี (Enthalpy) ที่ต่ำกว่าแป้งดั้งเดิม แต่การศึกษาสเปกตรัมของ IR นั้นแสดงให้เห็นว่าไม่พบพิคที่แสดงถึงการมีหมู่อะซิทิลในแป้งดัดแปรด้วยกรดอะซิติกแอนไฮไดรด์ คือ  $1724$  ถึง  $1733\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากแป้งดัดแปรมีองศาการแทนที่ต่ำมาก หรือไวโนลอะซิเตทเป็นโมกุลที่เล็กกว่ากรดอะซิติกแอนไฮไดรด์ ดังนั้นการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยไวโนลอะซิเตททำให้สมบัติต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้แป้งดัดแปรสามารถใช้ประโยชน์ได้สำหรับงานที่เฉพาะเจาะจงขึ้น [34]

Das, A. B. และคณะ ได้ทำการศึกษาดัดแปรทางเคมีของแป้งมันเทศ (*Ipomoea batatas*) ด้วยการทำอะซิทิเลชันด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณ 4 ถึง 10% และทำการดัดแปรแบบคู่โดยใช้พรอพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ที่ 7% เท่านั้นคู่กับอะดิปิกแอซิดแอนไฮไดรด์ (Adipic acid anhydride) ในปริมาณจาก 0.05 ถึง 0.12% และมีองศาการแทนที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.018 ถึง 0.058% และ 0.020 ถึง 0.034% สำหรับตัวอย่างแป้งอะซิเตทและแป้งดัดแปรแบบคู่ ตามลำดับ นอกจากนี้การดัดแปรแป้งยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจับน้ำและน้ำมัน (Water-binding and oil-binding capacities) ความใสของแป้งเปียก ความแข็งแรงของเจลที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าความแข็งแรงของรอยแตก ความยืดหยุ่นของเจล และความสามารถในการยึดเกาะมีแนวโน้มลดลงในการดัดแปรทั้งสองวิธี นอกจากนี้การศึกษา SEM แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรทำให้สัณฐานวิทยาเปลี่ยนแปลงไป การทำอะซิทิเลชันทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเล็กน้อยหรือการรวมกันเป็นก้อน (Cluster formation) ของเม็ดแป้งที่ร่องลึกในบริเวณส่วนแกนกลาง ในทางกลับกันแป้งดัดแปรแบบคู่ พบเม็ดแป้งรวมตัวอยู่ด้วยการค่อยๆ ปรากฏขึ้นของกลุ่มแป้งเล็ก ๆ น้อย ๆ เช่นลักษณะที่ปรากฏพร้อมกับส่วนที่ยื่นออกมาบนพื้นผิวของแป้งดัดแปร [35]

Colussi, R. และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าดั้งเดิมและแป้งอะซิเตทที่มีอะไมโลสสูง คือ 32% อะไมโลสปานกลาง คือ 20% และอะไมโลสต่ำ คือ 8% และได้ศึกษาสมบัติเชิงกล ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำ สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของฟิล์ม พบว่าฟิล์มจากแป้งอะซิเตทที่มีอะไมโลสสูง (DS เท่ากับ 0.24 0.42 และ 0.72) มีปริมาณความชื้นและความสามารถในการละลายน้ำที่สูงกว่าแป้งดั้งเดิมที่มีอะไมโลสสูง ส่วนฟิล์มที่ทำมาจากแป้งที่มีอะไมโลสสูง (DS เท่ากับ 0.24 0.42 และ 0.72) และปานกลาง (DS เท่ากับ 0.38 0.45 และ 0.81) สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ ถึงแม้ว่าทั้งแป้งดั้งเดิมและแป้งอะซิเตทที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะไมโลสต่ำไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ ซึ่งการทำอะซิทิเลชันนั้นทำให้ความแข็งแรงดิ่งลดลงและเพิ่มความสามารถในการยึดของฟิล์ม อีกทั้งฟิล์มของแป้งอะซิเตทยังมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่า (Decomposition temperature) และมีเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ที่สูงกว่าฟิล์มแป้งดั้งเดิม นอกจากนี้หมู่อะซิetylทำให้เกิดระยะห่างระหว่างสายโซ่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มกระบวนการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้ฟิล์มแป้งอะซิเตทยังแสดงให้เห็นการสลายตัวทางความร้อนที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งดั้งเดิม [36]

Chi, H. และคณะได้ศึกษาแป้งข้าวโพดดัดแปรด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) ที่มีค่าองศาการแทนที่ (DS) ที่แตกต่างกันจากอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาอะซิทิเลชันที่ต่างกัน คือ 50 60 และ 75 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ค่าองศาการแทนที่ คือ 0.85 1.78 และ 2.89 ตามลำดับ จากผลของ FTIR แป้งดัดแปรมีพิกซ์ขึ้นใหม่ที่ 1754 1435 1375 และ 1240  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งคือพิกซ์ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl ; C=O) อีกทั้งแสดงให้เห็นถึงสัญญาณพิกซ์ของแป้งดัดแปรที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าองศาการแทนที่สูงขึ้น และมีหมู่ไฮดรอกซิลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเมื่อมีค่าองศาการแทนที่ เท่ากับ 2.89 ส่วนสเปกตรัมของ  $^{13}\text{C}$  NMR และ  $^{13}\text{C}$ - $^1\text{H}$  ของแป้งดั้งเดิมนั้นมีค่าโปรตอนเคมีคอลชิฟ (Proton chemical shift,  $\delta$ ) อยู่ที่ 3.07-3.66 ppm ซึ่ง  $^1\text{H}$  NMR ของแป้งดัดแปรแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าองศาการแทนที่เพิ่มขึ้น ค่า  $\delta$  ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ 5.44 และ 4.58 นั้นมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งผลของ XRD ยังแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแป้งดั้งเดิมนั้นหายไปและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ของแป้งดัดแปรขึ้นมาแทน ซึ่งพบที่  $9^\circ$  และ  $20^\circ$  นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดั้งเดิมความไม่ชอบน้ำของแป้งดัดแปรนั้นเพิ่มสูงขึ้น ยืนยันได้จากผลของมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact angle) นั้นเพิ่มขึ้น จาก  $43.1^\circ$  ถึง  $68.2^\circ$  [37]

Abdillah, A. A. และคณะได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch; AS) ในอัตราส่วน 3.5% 3% 2.5% และ 2% และไอโอตาคาราจีแนน (Iota-carrageenan; IC) ในอัตราส่วน 0.5% 1% 1.5% และ 2% ที่ผสมกันเป็นฟิล์ม AS/IC-BEF และนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม 4% (AS-BEF) โดยฟิล์ม AS-BEF แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่เรียบ มีความโปร่งใสสูง และมีการย่อยสลายในดินได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 7 วัน ในขณะที่ฟิล์ม AS/IC-BEF แสดงค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด ความสามารถในการละลายน้ำ สมบัติการบวมตัว และสมบัติการเป็นเกราะป้องกันที่ดี แต่การย่อยสลายในดินได้อย่างสมบูรณ์ได้ใน 30 วัน ส่วนการวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่า IC มีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณการตกผลึกพบที่  $28.35^\circ$  และจาก FTIR แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างพอลิเมอร์ นอกจากนี้ฟิล์ม AS/IC-BEF แสดงอุณหภูมิการหลอมระหว่าง  $158-190^\circ\text{C}$  ในขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง  $153-176^\circ\text{C}$  ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักลดลงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 50-55% ที่อุณหภูมิการหลอม อีกทั้งฟิล์ม AS/IC-BEF ยังสามารถยับยั้งการสูญเสียน้ำหนักของมะเขือเทศเชอร์รี่ที่อุณหภูมิห้องและยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 10 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมโพสิต AS/IC-BEF มีศักยภาพในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอื่น ๆ ได้ [38]

de Lima Barizão, C. และคณะได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้วิธีการหล่อจากแคปปาคาราจีแนน (Kappa-carrageenan;  $\kappa$ -car) และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ ระหว่างแคปปาคาราจีแนนและแป้งมันสำปะหลัง จากผลทดสอบความขุ่นและสีของฟิล์มพบว่าฟิล์มมีความโปร่งใสสูง โดยฟิล์มสูตร 0 $\kappa$ -c แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีค่าการละลายน้ำที่สูง คือ 39.22% และมีค่าการบวมตัวที่ต่ำ คือ 391.6% ซึ่งการซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำที่สุดพบได้ในฟิล์มสูตร 50 $\kappa$ -c มีค่าเท่ากับ  $3.01 \times 10^{-8} \text{ g (Pa m s)}^{-1}$  และการซึมผ่านของน้ำมันอยู่ในช่วง 0.0033 – 0.0043 mm m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup> ส่วนฟิล์มสูตร 100 $\kappa$ -car และ 75 $\kappa$ -car ที่มีปริมาณแคปปาคาราจีแนนสูง มีค่าความแข็ง (Stiffness) เท่ากับ 19.23 และ 25.88 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าฟิล์มสูตร 25 $\kappa$ -car และ 0 $\kappa$ -car ที่มีค่าความยืดตัวขณะขาด (Elongation at break) เท่ากับ 21.60 และ 67.65% ตามลำดับ และความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) จะเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มมีปริมาณของแป้งในส่วนผสมเพิ่มขึ้น [15]

Abdullah, A. H. D. และคณะได้ศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อพลาสติกชีวภาพจากแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Starch-carboxymethyl cellulose (CMC)) ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้คาราจีแนนที่ความเข้มข้น 0 10 15 20 25 และ 30% โดยที่กระบวนการหลอมและผสมด้วยความร้อนที่ 130 °C เป็นเวลา 4 นาที ด้วยเครื่องผสม จากนั้นทำการกดร้อนที่ 150 °C และใช้แรงกดที่ 30 kgf/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าปริมาณของแคปปาคาราจีแนนที่สูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกชีวภาพเพิ่มขึ้นถึง 15.7 MPa และการทดสอบการแตกหักโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการทดสอบพลังงานด้วยเอกซเรย์ (EDS) แสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุกำมะถัน (S) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของแคปปาคาราจีแนน นอกจากนี้ FTIR ยังแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาระหว่างเมทริกซ์แป้ง-CMC และแคปปาคาราจีแนนได้สร้างโครงร่างตาข่ายของพันธะไฮโดรเจนที่แน่นหนา และการทดสอบด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis) พบว่าพลาสติกชีวภาพที่มีแคปปาคาราจีแนน 25% มีการลดลงของมวลต่ำที่สุด โดยลดลงอยู่ที่ 48% เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชีวภาพที่ไม่มีแคปปาคาราจีแนน และการเพิ่มแคปปาคาราจีแนนไม่พบว่ามีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพ [39]

Abdou, E. S. และ Sorour, M. A. ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้ง/คาราจีแนนแบบหล่อ รวมทั้งศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางรีโอโลยี (Rheological properties) ของการผสมแป้งและคาราจีแนนด้วย ทำการผสมแป้งและคาราจีแนนที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยแป้งใช้ความเข้มข้นที่ 0.75 1 และ 1.25% และคาราจีแนนใช้ความเข้มข้นที่ 0.5 และ 0.75% เติมกลีเซอรอล (Glycerol) ที่ 0.5% เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าฟิล์มทั้งหมดมีพฤติกรรมเป็นของไหล Non-Newtonian pseudoplastic fluid นอกจากนี้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและสมบัติเชิงกลของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาราจีแนนเพิ่มขึ้น [11]

Kumar, R. และ Rani, P. ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) โดยฟิล์ม SPI สามารถเตรียมได้โดยวิธีการหล่อสารละลายหรือวิธีการขึ้นรูปด้วยการอัด ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการเติมกรดแมนดิลิก (Mandelic acid) ในปริมาณต่าง ๆ คือ 1-5% ตามน้ำหนักของ SPI ลงใน SPI ที่มีกลีเซอรอลที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งถูกนำไปทดสอบสมบัติการต้านจุลชีพ (Antimicrobial) การดูดซับน้ำ (water uptake) การส่งผ่านแสง (Transmittance) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของกรดแมนดิลิกถึง 4% ทำให้ความแข็งแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 6.5 เป็น 7.5 MPa และจาก 79 เป็น 126% ตามลำดับ นอกจากนี้ฟิล์ม SPI ที่มีกรดแมนดิลิกยังดูดซับน้ำน้อยลง ซึ่งแสดงถึงความไม่ชอบน้ำน้อยลงของฟิล์ม SPI อีกทั้งฟิล์ม SPI ที่มีกรดแมนดิลิกยังแสดงสมบัติต้านจุลชีพซึ่งสามารถนำไปใช้ในการบรรจุภัณฑ์ได้ [18]

Kumar, R. และคณะได้ศึกษาฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) ที่ผสมกับกรดแมนดิลิก (Mandelic acid) ในปริมาณต่าง ๆ คือ 2.5-10% ที่มีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งผลของปริมาณของกรดแมนดิลิกที่มีต่อสมณฐานวิทยาและสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม SPI ถูกทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) การทดสอบเชิงกลแบบไดนามิกและความร้อน (DMTA) การทดสอบด้วยเครื่องวัดความร้อนแบบเทอร์โมแกรม (TGA) ความต้านทานต่อน้ำ (Water resistivity) และการทดสอบแรงดึง จากการทดสอบพบว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์ม SPI ที่เติมกรดแมนดิลิกลดลงในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าที่กรดแมนดิลิก 10% โดยมวล จะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงระหว่างกรดแมนดิลิกและเมทริกซ์ SPI ทำให้เกิดเอนโดเทอร์ม (Endotherms) ที่ 148.8 °C นอกจากนี้ฟิล์ม SPI ที่ผสมกรดแมนดิลิกยังสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ด้วย [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fang, Y. และคณะได้ศึกษาฟิล์มคอมโพสิตจากแป้งที่ผสมกับกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid; SA) และแป้งข้าวโพดเหนียวที่มีอนุภาคขนาดนาโน/แคปซูลคาร์บอน (WMSNs/KC) ถูกนำมาใช้ในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์และปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดย WMSNs สังเคราะห์ได้จากกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์และการตกผลึกใหม่ จากนั้นจึงเติม KC เพื่อสร้าง WMSNs/KC และนำมาใช้เป็นตัวเติมนาโน (Nanofiller) และตัวทำให้คงตัว (Stabilizer) ในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิลที่ความเข้มข้น 0.9% ซึ่งการทดสอบลักษณะทางกายภาพและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแป้งคอมโพสิตที่มี WMSNs/KC มีพื้นผิวที่เรียบ สม่ำเสมอ และใส ส่วนการทดสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และการทดสอบด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) ยังแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างฟิล์ม WMSNs/KC และ SA และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งดั้งเดิม ฟิล์มคอมโพสิตที่เสริมด้วย WMSNs/KC จะมีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น การกั้นไอน้ำ (Water vapor barrier) และความคงทนต่อความร้อน (Thermal stability) ดีขึ้น ในขณะที่ความยืดหยุ่น (Elongation at break) ลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ฟิล์มแป้งคอมโพสิตยังแสดงฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างดีต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ในอาหารได้ 3 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus subtilis* [41]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ตราปลาไทย 5 ดาว จากบริษัท อี.ที.ซี. เอียบตงจัน จำกัด
2. ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate;  $C_4H_6O_2$ ) จากบริษัท โตเกียว เคมิคอล อินดัสทรี จำกัด
3. แคลปาคาราจีแนน ( $\kappa$ -Carrageenan;  $C_{24}H_{36}O_{25}S_2$ ) จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด
4. กรดแมนดีลิก (Mandelic acid;  $C_8H_8O_3$ ) จากบริษัท จันทร์เจ้า ลองจิวตี้ จำกัด
5. กลีเซอรอล (Glycerol;  $C_3H_8O_3$ ) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
6. น้ำกลั่น (Distilled water)
7. กรดไฮโดรคลอริกเกรดวิเคราะห์ (Hydrochloric acid; HCl) จากบริษัท Carlo erba จำกัด
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดวิเคราะห์ (Sodium hydroxide; NaOH) จากบริษัท Carlo erba จำกัด
9. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein;  $C_{20}H_{14}O_4$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo erba จำกัด

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ปีกเกอร์ (Beaker)
2. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
3. เครื่องกวนและให้ความร้อน (Hot plate)
4. ถาดพลาสติก (Polypropylene tray)
5. เครื่องชั่ง (Digital balance 4 digits)
6. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
7. กระบอกตวง (Cylinder)
8. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
9. บิวเรต (Burette)
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing machine) รุ่น Comotech QC-536M1,

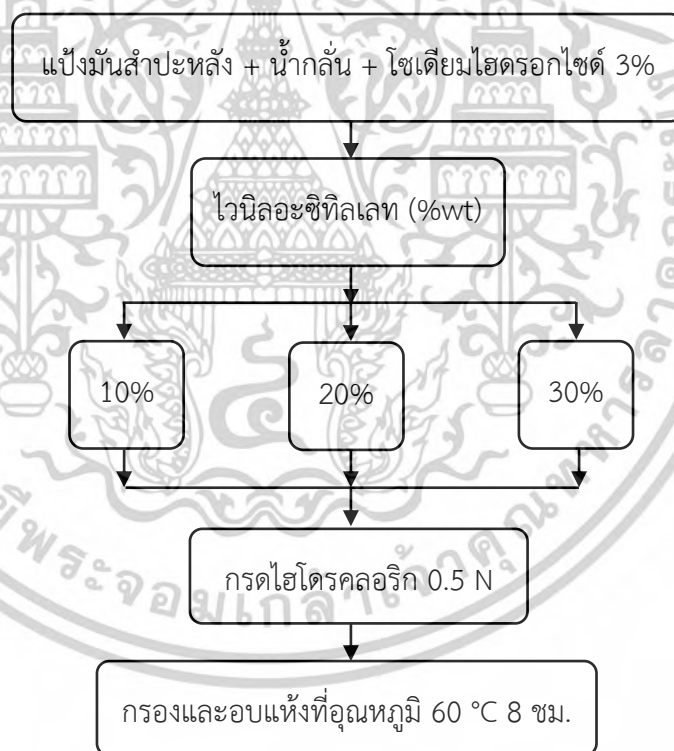
Taiwan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared Spectrophotometer) รุ่น IRTracer-100 (Shimadzu, Japan)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JSM-IT500HR, JEOL, LA
13. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น TGA/DSC 3+ Mettler Toledo, Switzerland
14. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) รุ่น XRD-6100 (Shimadzu, Japan)

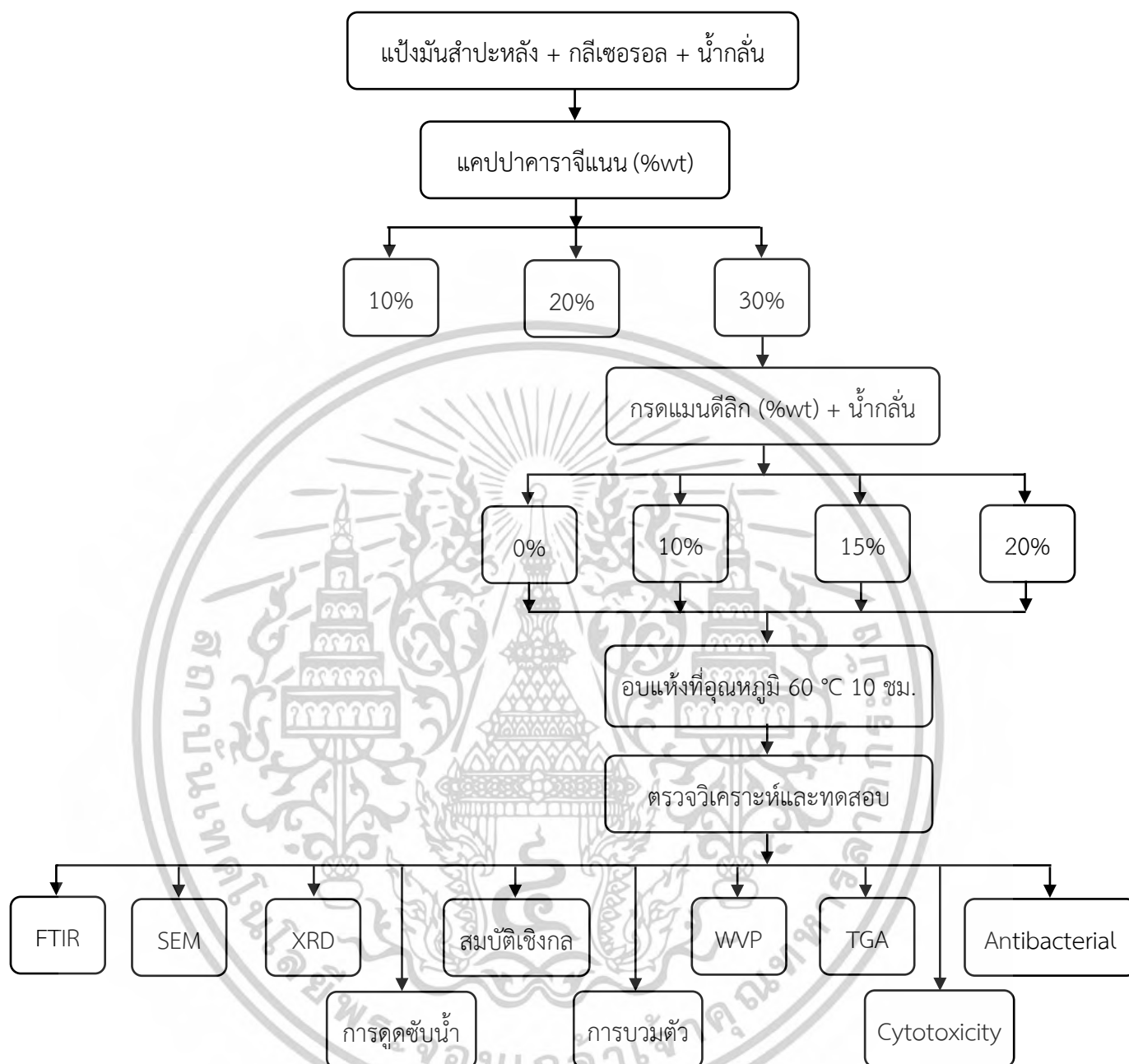
### 3.3 วิธีการทดลอง

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ดังนี้ ดังรูปที่ 3.1 3.2 และ 3.3



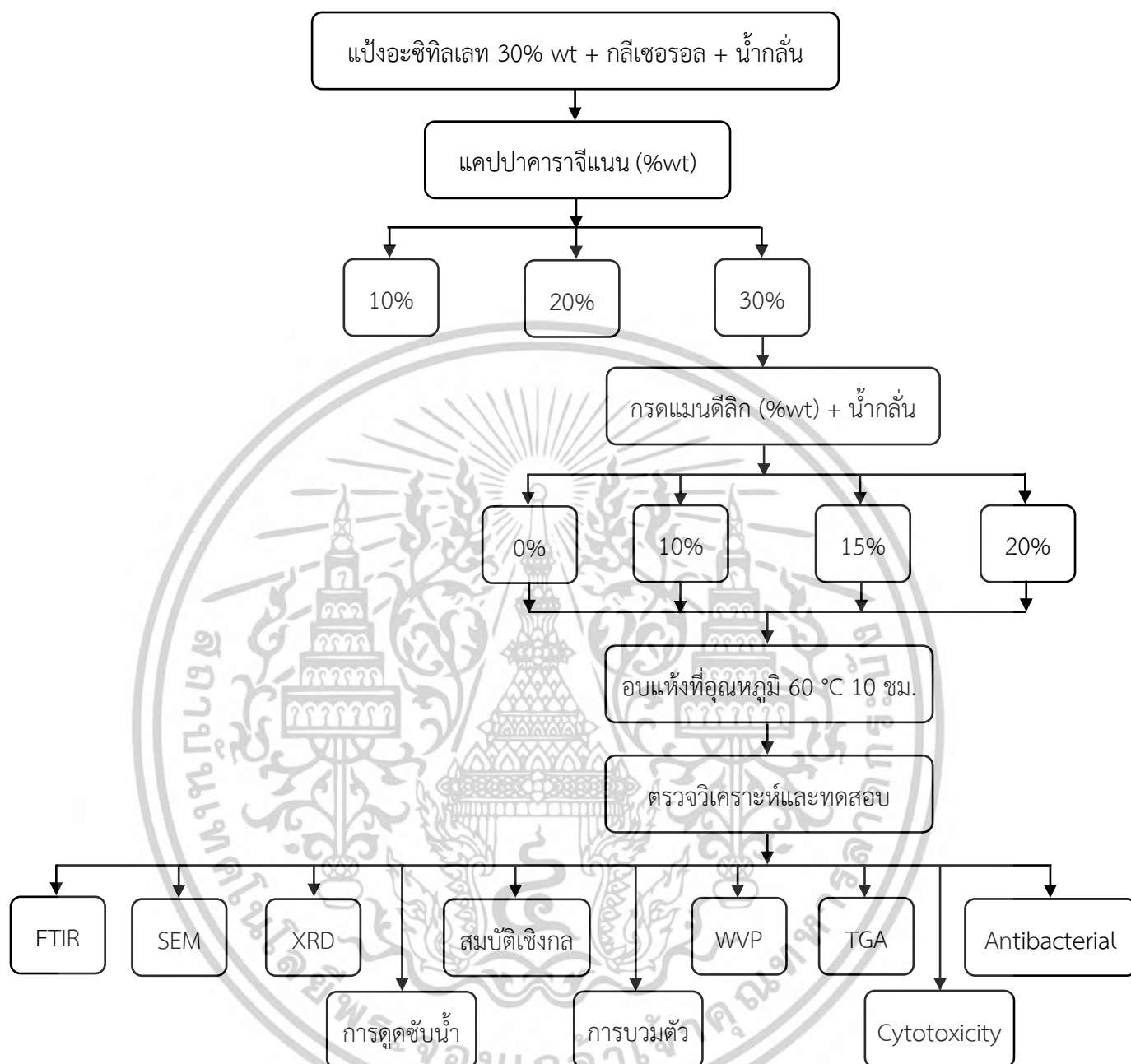
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมแอมัลแกม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการขึ้นรูปและการทดสอบฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผสมแคปพาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิกในสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการขึ้นรูปและการทดสอบฟิล์มแป้งอะซิทิลเลท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมแคปพาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิกในสูตรต่าง ๆ

### 3.3.1 การเตรียมแป้งอะซิทิลเลทจากแป้งมันสำปะหลัง

1. เตรียมสารละลายระหว่างแป้งกับน้ำกลั่น โดยใช้แป้ง 162 กรัมต่อน้ำกลั่น 220 มิลลิลิตร ใน ปีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 42.4 %wt (db)
2. ปั่นกวนให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันและปรับ pH ให้สารละลายมีค่าเท่ากับ 8 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3%
3. เติมนิโวลอะซิเตทที่ปริมาตรต่าง ๆ ได้แก่ 10% 20% และ 30% ต่อน้ำหนักของแป้ง โดย ระหว่างที่เติมนิโวลอะซิเตทต้องควบคุมให้ pH ของสารละลายมีค่าเท่ากับ 8 ถึง 8.4 และปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที
4. จากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วยการลด pH ของสารละลายลงที่ pH เท่ากับ 4.5 โดยการเติม กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 N
5. นำสารละลายแป้งมากรองแบบลดความดัน โดยการใช้ น้ำกลั่นล้างตะกอนจำนวน 5 ครั้ง
6. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม. จากนั้นร่อนแป้งด้วย ตะแกรงร่อนขนาด 70 ไมครอน และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

### 3.3.2 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งอะซิทิลเลท

1. ชั่งน้ำหนักแป้ง 7 กรัมต่อกลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในปีกเกอร์ 200 มิลลิลิตร และปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที
2. ให้ความร้อนกับสารละลายด้วยเครื่องให้ความร้อนที่มีการปั่นกวนตลอดเวลา จนกระทั่ง สารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 55-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แป้งเกิดเจลลาติไนเซชัน โดยสังเกต ได้จากสารละลายมีลักษณะเหนียวและใสขึ้น
3. จากนั้นเทสารละลายลงบนภาตพลาสติกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม.
4. เมื่อครบกำหนดเวลา นำภาตพลาสติกออกมาจากตู้อบแล้วรอให้เย็น และลอกแผ่นฟิล์มออกมา จากภาต

### 3.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งอะซิทิลเลท 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แป้งกับแคปทาการจีแนนปริมาณต่าง ๆ

1. ชั่งแป้ง กลีเซอรอล และคาราจีแนน ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 โดยชั่งแป้งและกลีเซอรอล ในปีกเกอร์ 200 มิลลิลิตร และชั่งคาราจีแนนในปีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์ที่มีแป้งและกลีเซอรอล จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมแคปซูลคาราจีแนนที่ละลายลงในสารละลายแป้ง และปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
4. ให้ความร้อนกับสารละลายด้วยเครื่องให้ความร้อนที่มีการปั่นกวนตลอดเวลา จนกระทั่งสารละลาย มีอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลของแคปซูลคาราจีแนน
5. จากนั้นเทสารละลายลงบนภาตพลาสติกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชม.
6. เมื่อครบกำหนดเวลา นำภาตพลาสติกออกมาจากตู้อบแล้วรอให้เย็น และลอกแผ่นฟิล์มออกมาจากภาต

### 3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งอะชิทิลเลท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แป้งกับแคปซูลคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกรดแมนดีลิกปริมาณต่าง ๆ

1. ชั่งแป้ง กลีเซอรอล และคาราจีแนน ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 โดยชั่งแป้งและกลีเซอรอลในปิ๊กเกอร์ 200 มิลลิลิตร และชั่งคาราจีแนนในปิ๊กเกอร์ 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ลงในปิ๊กเกอร์ที่มีแป้งและกลีเซอรอล จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
3. เติมแคปซูลคาราจีแนนที่ละลายลงในสารละลายแป้ง และปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
4. เตรียมสารละลายกรดแมนดีลิก โดยละลายกรดแมนดีลิกปริมาตรต่าง ๆ ด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที
5. เติมสารละลายกรดแมนดีลิกลงในสารละลายแป้งและให้ความร้อนกับสารละลายด้วยเครื่องให้ความร้อน ที่มีการปั่นกวนตลอดเวลา จนสารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
6. จากนั้นเทสารละลายลงบนภาตพลาสติกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชม.
7. เมื่อครบกำหนดเวลา นำภาตพลาสติกออกมาจากตู้อบแล้วรอให้เย็น และลอกแผ่นฟิล์มออกมาจากภาต

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม

| สูตร                 | แป้งมัน<br>สำปะหลัง<br>(%wt) | แป้ง<br>อะซิทิลเลท<br>(%wt) | คารา<br>จีแนน<br>(%wt) | กรด<br>แมนดีลิก<br>(%wt) | กลีเซอรอล<br>(%wt) | น้ำ<br>กลั่น<br>(มล.) |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| NS*                  | 100                          | -                           | -                      | -                        | 30                 | 100                   |
| 10VA                 | -                            | 100                         | -                      | -                        | 30                 | 100                   |
| 20VA                 | -                            | 100                         | -                      | -                        | 30                 | 100                   |
| 30VA*                | -                            | 100                         | -                      | -                        | 30                 | 100                   |
| NS-10CAR             | 90                           | -                           | 10                     | -                        | 30                 | 100                   |
| NS-20CAR             | 80                           | -                           | 20                     | -                        | 30                 | 100                   |
| NS-30CAR**           | 70                           | -                           | 30                     | -                        | 30                 | 100                   |
| NS-30CAR-10MA        | 70                           | -                           | 30                     | 10                       | 30                 | 100                   |
| NS-30CAR-15MA        | 70                           | -                           | 30                     | 15                       | 30                 | 100                   |
| NS-30CAR-20MA        | 70                           | -                           | 30                     | 20                       | 30                 | 100                   |
| 30VA-10CAR           | -                            | 90                          | 10                     | -                        | 30                 | 100                   |
| 30VA -20CAR          | -                            | 80                          | 20                     | -                        | 30                 | 100                   |
| 30VA -30CAR**        | -                            | 70                          | 30                     | -                        | 30                 | 100                   |
| 30VA -30CAR-<br>10MA | -                            | 70                          | 30                     | 10                       | 30                 | 100                   |
| 30VA -30CAR-<br>15MA | -                            | 70                          | 30                     | 15                       | 30                 | 100                   |
| 30VA -30CAR-<br>20MA | -                            | 70                          | 30                     | 20                       | 30                 | 100                   |

หมายเหตุ NS คือ แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร

VA คือ แป้งอะซิทิลเลท

CAR คือ คาราจีแนน

MA คือ กรดแมนดีลิก

\* คือ NS และ 30VA เป็นสูตรที่นำมาศึกษาการใส่คาราจีแนนต่อ

\*\* คือ NS-30CAR และ 30VA-30CAR เป็นสูตรที่นำมาศึกษาการใส่กรดแมนดีลิกต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบ

#### 3.4.1 การหาจำนวนหมู่อะซิทิล (Acetyl content) และองค์การแทนที่ (DS)

การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อะซิทิลทำได้โดยการชั่งแบ่งอะซิทิลเลท 0.50 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด ต่อมาหยดโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.10 N จนสารละลายเป็นสีชมพูจาง หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.45 N ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร และทำการเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ต่อมาล้างปากขวดรูปชมพู่ด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยและนำมาไทเทรตเบสที่เหลือในสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 N จนถึงจุดยุติ คือ สารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสี ทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งแล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{Acetyl content (\%)} = \frac{(b - s) \times N \times 0.043}{W(\text{db})} \times 100$$

โดยที่ b คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 N ที่ใช้ไทเทรตเบส (มิลลิลิตร)

s คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 N ที่ใช้ไทเทรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (0.2 N)

W คือ มวลของสารตัวอย่าง (กรัม)

$$\text{DS} = \frac{162 \times A}{4300 - 42A}$$

โดยที่ A คือ จำนวนหมู่อะซิทิล

#### 3.4.2 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันโดย FTIR

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยการใช้นิโคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้ละเอียดและเข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $40 \text{ kg/cm}^2$  เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ และนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่างออกมา โดยสามารถคำนวณหาอัตราส่วนความสูงพีก (Ratio of peak height) ได้ดังนี้

อัตราส่วนความสูงพีก = ความสูงพีกที่สนใจ / ความสูงพีกอ้างอิง (ที่ตำแหน่ง  $2927 \text{ cm}^{-1}$  และ  $846 \text{ cm}^{-1}$ )

### 3.4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์หาปริมาณผลึกของชิ้นงานที่ทดสอบ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่าง ๆ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งใช้  $\text{CuK}\alpha$  (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.64 อังสตรอม) ใช้ขนาดของมุมตกกระทบสำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ได้ฟิคทั้งหมด (Net area) คือ  $2\theta = 5-50$  องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที โดยพื้นที่ที่สนใจ (Raw area) คือ  $2\theta = 12-28$  องศา โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ดังนี้

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

### 3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้ โดยนำชิ้นงานมาหักหลังจากแช่ไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM

### 3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

| สมบัติ                                                                            | มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ | หน่วยที่รายงาน |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|
| ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด<br>(Stress at maximum load)                            | ASTM D882-02       | MPa            |
| มอดุลัส (Young's modulus, E)                                                      | ASTM D882-02       | MPa            |
| เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดแรงดึงสูงสุด<br>(Percentage elongation at maximum load) | ASTM D882-02       | %              |

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเชิงกล (Universal testing machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882-02 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร จำนวน 12 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

- Test speed : 50 mm/min
- Gauge length : 50 mm
- Load cell : 2 kN

ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดแรงดึงสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) =  $F/A$

มอดุลัส (Young's modulus, E) =  $(F/A)/[(L-L_0)/L_0]$

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Percentage elongation at maximum load) =  $[(L-L_0)/L_0] \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

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

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

### 3.4.6 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E104 โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปวางในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์  $98 \pm 2\%$  โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวันเป็นเวลา 10 วัน สามารถคำนวณได้จาก

$$M_t (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น,  $W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ และ  $W_w$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

### 3.4.7 การบวมตัว (Swelling degree)

เตรียมชิ้นงานที่ทดสอบโดยนำชิ้นงานตัวอย่างขนาด 1x1 นิ้วมาใส่ในตะแกรงลวด แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง และอีก 72 ชั่วโมงจึงชั่งน้ำหนักอีกครั้ง สามารถคำนวณได้จาก

$$M_t (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์การบวมตัว,  $W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ และ  $W_w$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

### 3.4.8 การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)

ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผ่านพื้นที่หรือความหนาของชิ้นงานต่อเวลา ทดสอบโดยใช้วิธี Desiccant method ตามมาตรฐาน ASTM E96 ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการตัดฟิล์มเป็นวงกลมให้มีพื้นที่ประมาณ 0.002 ตารางเมตร วางปิดผลึกลงบนถ้วยที่บรรจุซิลิกาเจล 125 กรัม ด้วยพาราฟิน แล้วนำไปวางในเดซิเคเตอร์โดยมี NaCl ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75% ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักถ้วยซิลิกาเจลทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$WVTR = \frac{\Delta m}{(\Delta t \cdot A)} \times 100$$

เมื่อ WVTR คือ อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม.เมตร<sup>-2</sup>.วัน<sup>-1</sup>)

$\Delta m / \Delta t$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานตัวอย่างต่อวัน (กรัม.วัน<sup>-1</sup>)

A คือ พื้นที่ในการซึมผ่านไอน้ำของชิ้นงานตัวอย่าง (เมตร<sup>2</sup>)

### 3.4.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature) ของพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer ; TGA) ทำได้โดยการชั่งชิ้นงานประมาณ 10-12 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ที่สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG ออกมา

### 3.4.10 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial activity)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ตามมาตรฐาน ASTM F895-11 (Agar diffusion method) โดยทดสอบเพื่อหาบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (zone of inhibition) ของชิ้นงานตัวอย่างในอะการ ขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) ความเข้มข้น 1% และเอทานอลที่มีความเข้มข้น 95% เป็นสภาวะควบคุม ใส่ชิ้นงานลงในกระดาศกรงที่ปราศจากเชื้อ จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อในจานเพาะ (Petri dish) โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ คือ แบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 และแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* ATCC 25922 เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตร

### 3.4.11 ความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity)

การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของชิ้นงานตัวอย่างได้รับการประเมินด้วยการทดสอบ MTT assay กับเซลล์ Keratinocytes (HaCat) ของมนุษย์ ชิ้นงานตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายเกลือบัพเฟอร์ ฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างที่แช่แล้วจะถูกกรองออก และนำสารละลายที่กรองได้เตรียมเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยการเติม DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) แล้วนำไปผสมในอาหารของ DMEM ที่เติมด้วย 10% FBS (Fetal Bovine Serum) และปิเปตลงในถาดหลุม (96-well plate) ปริมาตร 100 µl จากนั้นปิเปต HaCat cell culture 100 µl ซึ่งมีเซลล์ HaCat  $1 \times 10^5$  เซลล์/มิลลิลิตร เติมนำอาหารเลี้ยงเชื้อ DMEM ข้างต้น ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ทำการเติมสารละลาย MTT ปริมาตร 10 µl (ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) เพิ่มเข้าไปในหลุมและบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลาอีก 4 ชั่วโมง จากนั้นละลายผลึกฟอร์มาซาน (Formazan crystal) ที่เกิดขึ้นด้วยสารละลายผสม DMSO 100% : สารละลาย SDS 10% อัตราส่วน 9:1 ปริมาตร 100 µl และนำสารละลายสีม่วงที่เกิดขึ้น 100 µl เติมนำเข้าในถาดหลุมใหม่ วัดค่า optical density (OD) ที่ความยาวคลื่น 570 nm คำนวณค่าความเป็นพิษต่อเซลล์ได้จากสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ ความเป็นพิษต่อเซลล์} = (A-B/A) \times 100$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมควบคุม

B คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมตัวอย่าง

$$\text{Cell viability} = 100 - \text{Cytotoxicity}$$

### 3.4.12 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้ Tukey's test เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ( $p < 0.05$ ) ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ IBM®SPSS® Statistics 26



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปทาการจีแนนและกรดแมนดีลิก โดยมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบผลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่มีปริมาณต่าง ๆ ตอนที่ 2 ศึกษาเปรียบเทียบผลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังผสมกับแคปทาการจีแนนในปริมาณต่าง ๆ และตอนที่ 3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักและกรดแมนดีลิกที่มีปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ ทำการขึ้นรูปฟิล์มแผ่นปิดแผลโดยวิธีการหล่อแบบ และนำฟิล์มแผ่นปิดแผลมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การหาจำนวนหมู่อะซิทิลและองค์การแทนที่ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การละลายของรังสีเอ็กซ์ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น การบวมตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และความเป็นพิษต่อเซลล์

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

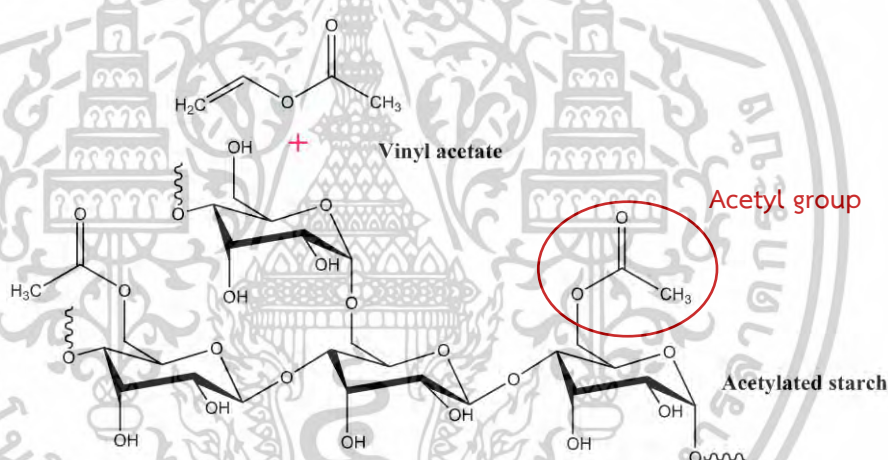
| ลำดับ | สูตร/อักษรย่อที่ใช้ | ชนิดของฟิล์ม                                                  |
|-------|---------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1     | NS                  | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร                       |
| 2     | 10VA                | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 10 %wt |
| 3     | 20VA                | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 20 %wt |
| 4     | 30VA                | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 %wt |

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

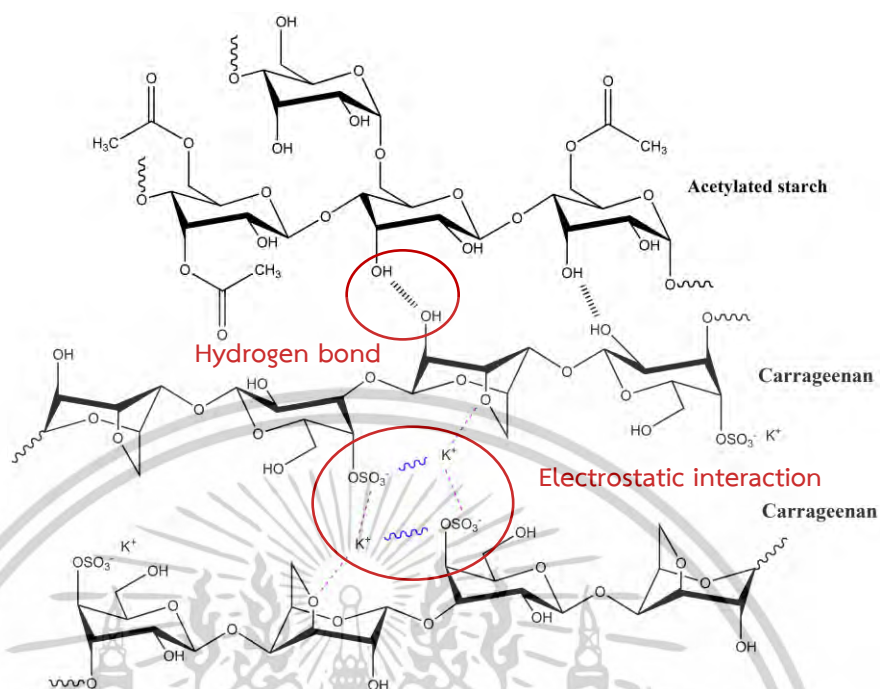
| ลำดับ | สูตร/อักษรย่อที่ใช้ | ชนิดของฟิล์ม                                                                                                    |
|-------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5     | NS-10CAR            | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซาคาราจีแนน 10 %wt                                              |
| 6     | NS-20CAR            | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซาคาราจีแนน 20 %wt                                              |
| 7     | NS-30CAR            | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt                                              |
| 8     | 30VA-10CAR          | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 10 %wt                       |
| 9     | 30VA-20CAR          | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 20 %wt                       |
| 10    | 30VA-30CAR          | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt                       |
| 11    | NS-30CAR-10MA       | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 10 %wt                       |
| 12    | NS-30CAR-15MA       | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 15 %wt                       |
| 13    | NS-30CAR-20MA       | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 20 %wt                       |
| 14    | 30VA-30CAR-10MA     | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 10 %wt |
| 15    | 30VA-30CAR-15MA     | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 15 %wt |
| 16    | 30VA-30CAR-20MA     | ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 %wt ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 %wt และกรดแมนดีลิก 20 %wt |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

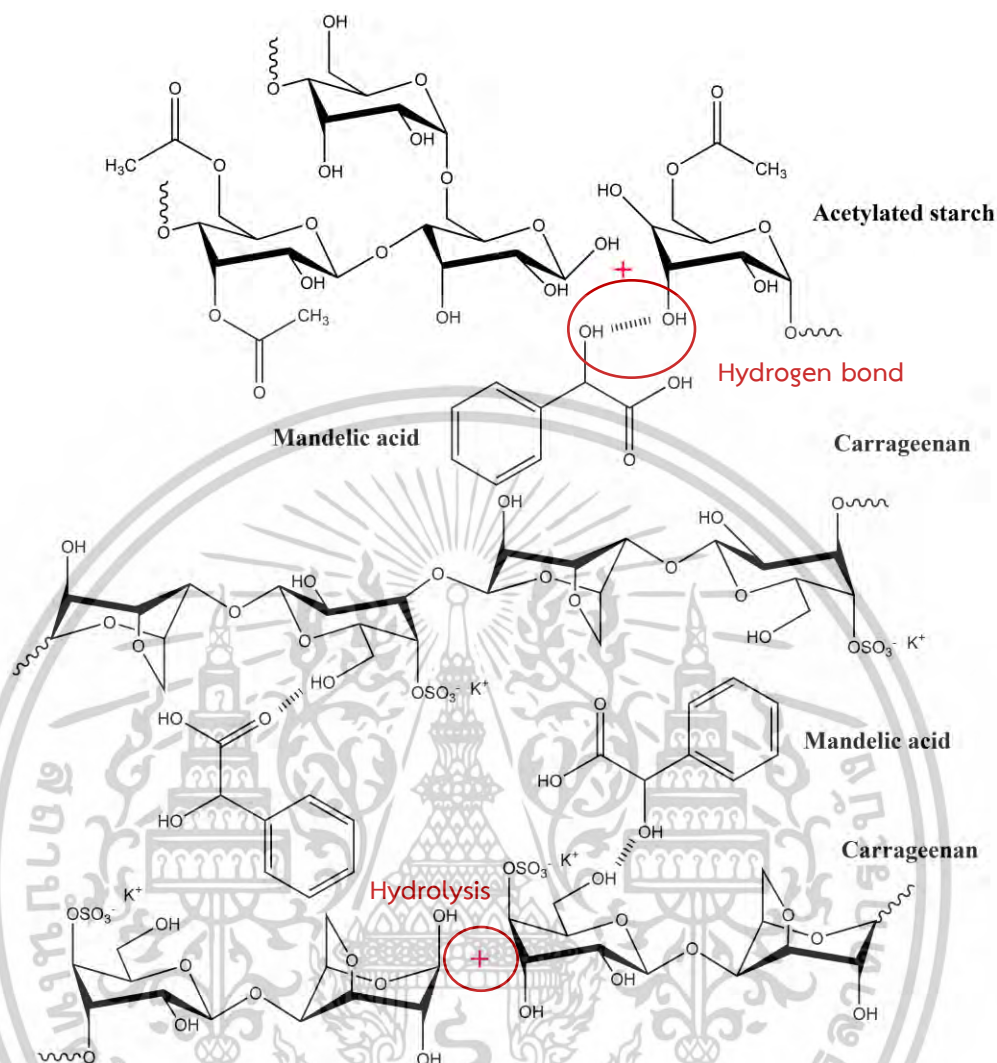
โดยการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท ผสมกับแคปซาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิก ส่งผลให้เกิดการแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งด้วยหมู่อะซิไทลจากไวนิลอะซิเตทผ่านปฏิกิริยาอะซิไทลเลชันเกิดเป็นแป้งอะซิไทลเลต [7] แสดงดังรูปที่ 4.1 และผลจากการผสมแคปซาคาราจีแนนกับแป้งอะซิไทลเลต ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งและแคปซาคาราจีแนน อีกทั้งแคปซาคาราจีแนนยังมีโครงสร้างที่เสถียรจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) และหมู่ซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) บนสายโซ่แคปซาคาราจีแนนเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย [15] แสดงดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้การเติมกรดแมนดีลิก แสดงดังรูปที่ 4.3 ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอนิลของโมเลกุลกรดแมนดีลิกและหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของเมทริกซ์และยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้



รูปที่ 4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท



รูปที่ 4.2 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปซูลคาราจีแนน



รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเตรียมฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทผสมกับแคปซูลคาราจีแนน และกรดแมนดีลิก

#### 4.1 การหาจำนวนหมู่อะซิทิลและองศาการแทนที่

ในการเตรียมแป้งอะซิทิลเลทนั้นได้ใช้ไวนิลอะซิเตทที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งที่ต่างกัน ได้แก่ 10 20 และ 30% ทำให้มีหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งมีจำนวนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งในการวิเคราะห์หาจำนวนหมู่อะซิทิลและองศาการแทนที่นั้นใช้วิธีในการทดสอบจากงานวิจัยของ Smith, R. J. [42] ทำได้โดยการไทเทรตย้อนกลับจากการทำปฏิกิริยาของหมู่อะซิทิลทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N และ 0.45 N จากนั้นทำการไทเทรตเบสที่เหลือจาก

ปฏิกิริยาข้างต้นด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 N จนถึงจุดยุติ โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

ตารางที่ 4.2 จำนวนหมู่อะซิทิลและองศาการแทนที่

| สูตร | เปอร์เซ็นต์ไวโนลอะซิเตท<br>โดยน้ำหนักของแป้ง<br>(%) | จำนวนหมู่อะซิทิล<br>(%) | องศาการแทนที่<br>(DS) |
|------|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 10VA | 10                                                  | $0.90 \pm 0.09^a$       | $0.03 \pm 0.01^a$     |
| 20VA | 20                                                  | $1.40 \pm 0.09^b$       | $0.05 \pm 0.01^b$     |
| 30VA | 30                                                  | $2.12 \pm 0.01^c$       | $0.08 \pm 0.02^c$     |

จากตารางที่ 4.2 พบว่าแป้งอะซิทิลเลต 10VA 20VA และ 30VA มีจำนวนเปอร์เซ็นต์หมู่อะซิทิลอยู่ที่ 0.90 1.40 และ 2.12 ตามลำดับ และมีองศาการแทนที่ (DS) อยู่ที่ 0.03 0.05 และ 0.08 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณไวโนลอะซิเตทนั้น ทำให้มีจำนวนหมู่อะซิทิลที่เข้าไปแทนที่อะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของแป้งเพิ่มมากขึ้น โดยแป้งอะซิทิลเลตที่สังเคราะห์ได้แสดงค่าองศาการแทนที่ที่ต่ำ ซึ่งองศาการแทนที่ (DS) ที่สูงที่สุดที่สามารถใช้ในอาหารได้ตามที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US Food and Drug Administration; FDA) กำหนดไว้ในปี ค.ศ. 1980 เท่ากับ 0.2 [6]

## 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

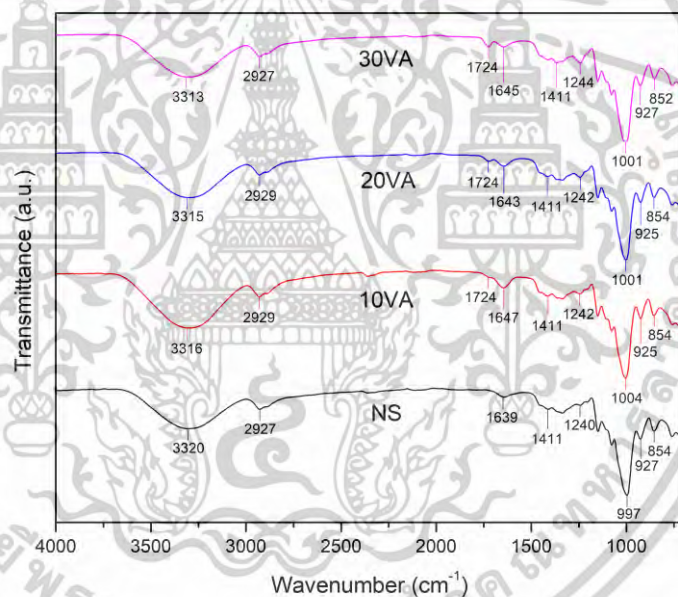
### 4.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปรและแป้งอะซิทิลเลตในแต่ละสูตรที่ใช้ปริมาณไวโนลอะซิเตทในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ฟิสิกส์สเปกตรัมมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏของแป้งอะซิทิลเลท

| เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) | ลักษณะการสั่น         |
|-------------------------------|-----------------------|
| 3200-3600 (v)                 | O-H stretching        |
| 2800-3000 (m--->s)            | Alkane C-H stretching |
| 1724-1733 (s)                 | Ester C=O stretching  |
| 1600-1630 (s)                 | Bounded water         |
| 1445-1485 (m)                 | O-H bending           |
| 1000-1400 (s)                 | C-O-C stretching      |
| 1000-1200 (s)                 | C-O-H bending         |

หมายเหตุ s คือ ความเข้มสูง m คือ ความเข้มปานกลาง และ v คือ ช่วงคลื่นความกว้าง



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

**ตารางที่ 4.4** ความสูงและอัตราส่วนความสูงพิกจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | ความสูงพิก            |                       |                      | อัตราส่วนความสูงพิก                           |                                               |
|------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|      | 1724 $\text{cm}^{-1}$ | 1242 $\text{cm}^{-1}$ | 846 $\text{cm}^{-1}$ | 1724 $\text{cm}^{-1}/846$<br>$\text{cm}^{-1}$ | 1242 $\text{cm}^{-1}/846$<br>$\text{cm}^{-1}$ |
| NS   | -                     | 78.59                 | 68.25                | -                                             | 1.15                                          |
| 10VA | 92.92                 | 83.27                 | 68.61                | 1.35                                          | 1.21                                          |
| 20VA | 95.74                 | 84.81                 | 68.44                | 1.40                                          | 1.24                                          |
| 30VA | 96.94                 | 87.31                 | 68.16                | 1.42                                          | 1.28                                          |

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากการปรับปรุงแป้งมันสำปะหลังด้วยไวนิลอะซิเตทกลายเป็นแป้งอะซิทิลเลทในทุกสูตรนั้นมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งมีโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตามลักษณะดังนี้ พิกในช่วง  $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง พิกในช่วง  $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ/หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง ส่วนพิกที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้ง พิกในช่วง  $1445\text{--}1485\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending พิกในช่วง  $1000\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง และพิกในช่วง  $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [43]

สำหรับความแตกต่างของแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งอะซิทิลเลทในแต่ละสูตรนั้น พบพิกที่ตำแหน่ง  $1724\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่อะซิทิล [37, 44] เกิดจากการแทนที่ด้วยหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งซึ่งเกิดผ่านปฏิกิริยาอะซิทิเลชัน โดยเกิดการแทนที่อะตอมไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งด้วยหมู่อะซิทิล ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}$ ) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถถูกแทนที่ได้ 3 ตำแหน่ง คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ C-2 C-3 และ C-6 ในหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสยูนิตของแป้ง เกิดเป็นแป้งอะซิเตท [34] จากการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของไวนิลอะซิเตทต่อแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่สูงขึ้น พบว่าความเข้มของพิก  $1724\text{ cm}^{-1}$  และ  $1242\text{ cm}^{-1}$  ของการสั่นแบบ C=O stretching และ C-O stretching ของหมู่อะซิทิลตามลำดับ [45] นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปริมาณของหมู่อะซิทิลที่เข้ามาแทนที่ในโมเลกุลแป้งที่สูงขึ้น (ตารางที่ 4.4) และสอดคล้องกับตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงจำนวนหมู่อะซิทิลและองค์การแทนที่ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร

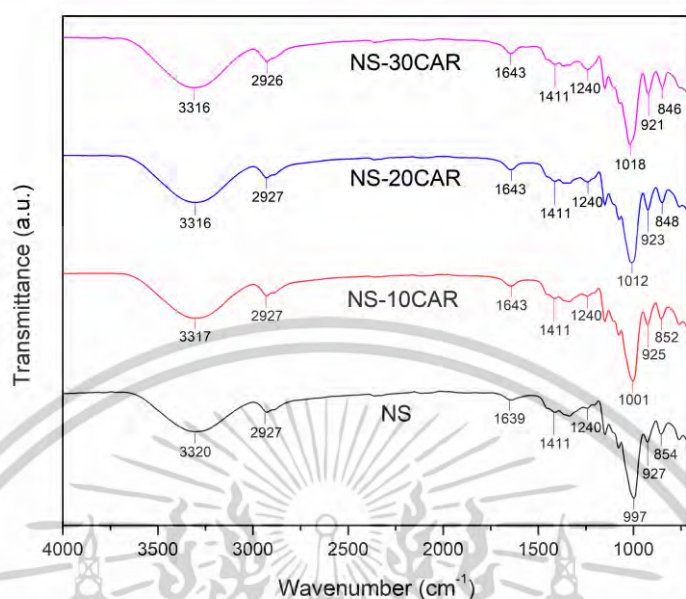
#### 4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งและแคปปาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแผ่นปิดแผลชีวภาพที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยไวโนลอะซิเตทและผสมกับแคปปาคาราจีแนนและกรดแมนดีลิก โดยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (NS) และแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง พบว่าจากการศึกษาจำนวนหมู่เอซิทิลและองค์การแทนที่ (DS) ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง (30VA) สูงที่สุด จึงเลือกแป้งสูตร NS และ 30VA นี้มาศึกษาสมบัติต่าง ๆ ต่อในส่วนของผลของปริมาณแคปปาคาราจีแนน (CAR) ที่มีต่อฟิล์มแป้งและทำการเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มแป้งสูตร NS และ 30VA ที่นำมาผสมกับแคปปาคาราจีแนนที่ปริมาณ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

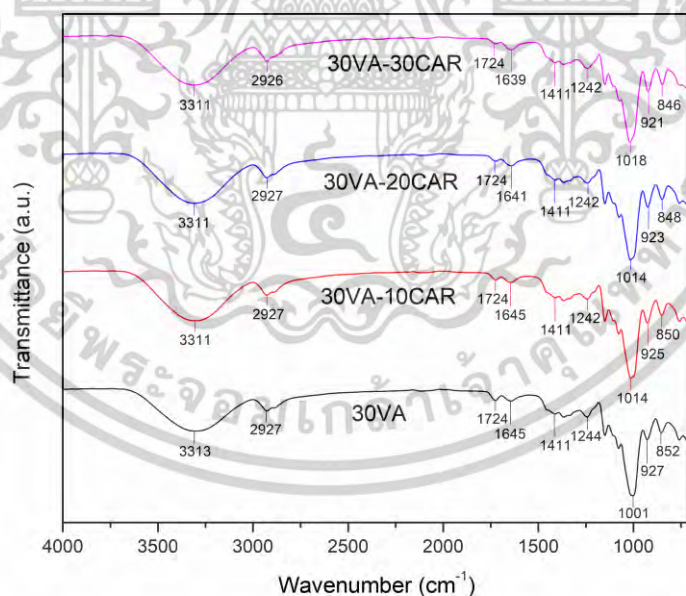
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปปาคาราจีแนนทำเช่นเดียวกับข้อที่ 4.1.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และตารางที่ 4.5 ดังนี้

**ตารางที่ 4.5** ความสูงและอัตราส่วนความสูงพีคจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปปาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | ความสูงพีค               |                         |                         |                          | อัตราส่วนความสูงพีค                             |                                                |                                                |
|------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|            | 1242<br>cm <sup>-1</sup> | 923<br>cm <sup>-1</sup> | 846<br>cm <sup>-1</sup> | 2927<br>cm <sup>-1</sup> | 1242 cm <sup>-1</sup><br>/2927 cm <sup>-1</sup> | 923 cm <sup>-1</sup><br>/2927 cm <sup>-1</sup> | 846 cm <sup>-1</sup><br>/2927 cm <sup>-1</sup> |
| NS         | 78.59                    | 76.93                   | 68.25                   | 83.02                    | 0.95                                            | 0.93                                           | 0.82                                           |
| NS-10CAR   | 81.65                    | 85.15                   | 76.48                   | 82.69                    | 0.99                                            | 1.03                                           | 0.92                                           |
| NS-20CAR   | 85.15                    | 88.83                   | 78.28                   | 83.01                    | 1.03                                            | 1.07                                           | 0.94                                           |
| NS-30CAR   | 88.28                    | 90.04                   | 79.15                   | 83.11                    | 1.06                                            | 1.08                                           | 0.95                                           |
| 30VA       | 87.31                    | 78.50                   | 68.16                   | 83.52                    | 1.05                                            | 0.94                                           | 0.82                                           |
| 30VA-10CAR | 88.21                    | 82.73                   | 71.94                   | 83.29                    | 1.06                                            | 0.99                                           | 0.86                                           |
| 30VA-20CAR | 91.67                    | 87.36                   | 74.35                   | 82.70                    | 1.11                                            | 1.06                                           | 0.90                                           |
| 30VA-30CAR | 95.20                    | 89.42                   | 76.33                   | 82.95                    | 1.15                                            | 1.08                                           | 0.92                                           |



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรที่ผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ



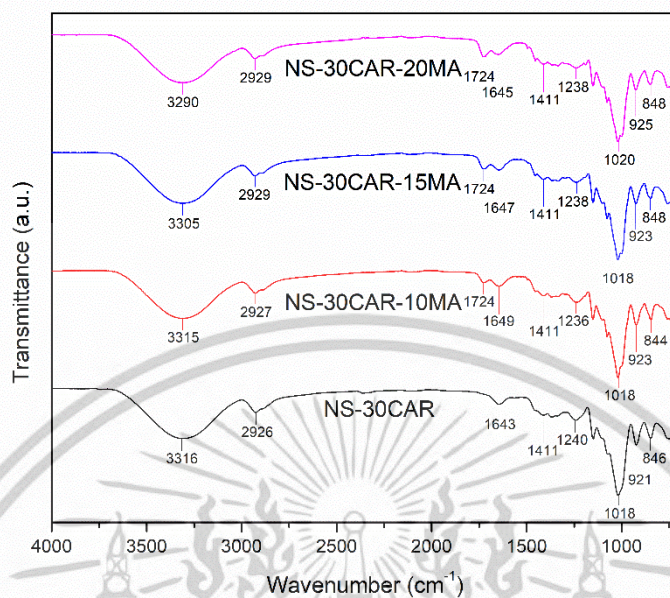
รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งที่ผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

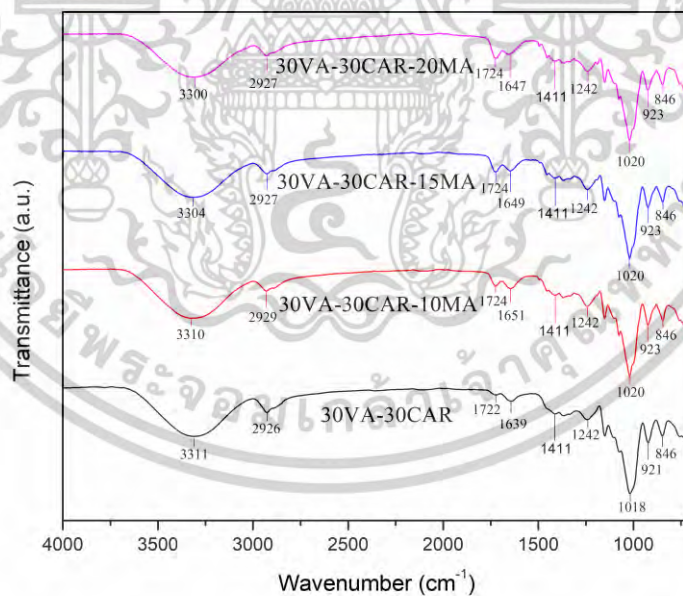
จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งจากรูปที่ 4.3 โดยพิกที่แสดงเอกลักษณ์ของแคปพาคาราจีแนน ได้แก่ พิกที่  $1242\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O=S=O stretching ของหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ (Ester sulfate group) พิกที่  $923\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของ 3,6-แอนไฮโดรกาแลคโทส (3,6-Anhydrogalactose) และพิกที่  $846\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-S stretching ของกาแลคโทส-4-ซัลเฟต (Galactose-4-sulfate) [46] ซึ่งพิกที่  $1242\text{ cm}^{-1}$  ของการสั่นแบบ O=S=O stretching ของหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ซ้อนทับกันกับพิกที่  $1242\text{ cm}^{-1}$  ของการสั่นแบบ C-O stretching ของหมู่เอซิทิลในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนนทำให้มีความเข้มที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5) นอกจากนี้การผสมแคปพาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง พบว่าเลขคลื่นเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงในช่วงการสั่นของ O-H stretching จากพิกที่  $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งและแคปพาคาราจีแนนเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่เมื่อปริมาณของแคปพาคาราจีแนนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. H. Dawam Abdullah และคณะที่ทำการศึกษาลักษณะของแคปพาคาราจีแนนที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพจากแป้ง-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าแคปพาคาราจีแนนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์ของแป้ง-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้ [39]

#### 4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมกรดแมนดีลิกทำเช่นเดียวกับข้อที่ 4.1.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 และตารางที่ 4.6 ดังนี้



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรที่ผสมกับแคปทาการา-จีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งที่ผสมกับแคปทาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.6** ความสูงและอัตราส่วนความสูงพีคจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | ความสูงพีค            |                      | อัตราส่วนความสูงพีค                         |
|-----------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------------|
|                 | 1724 $\text{cm}^{-1}$ | 846 $\text{cm}^{-1}$ | 1724 $\text{cm}^{-1}$ /846 $\text{cm}^{-1}$ |
| NS-30CAR        | -                     | 79.15                | -                                           |
| NS-30CAR-10MA   | 85.39                 | 79.55                | 1.07                                        |
| NS-30CAR-15MA   | 86.91                 | 78.67                | 1.10                                        |
| NS-30CAR-20MA   | 88.63                 | 79.32                | 1.12                                        |
| 30VA-30CAR      | 85.63                 | 76.33                | 1.12                                        |
| 30VA-30CAR-10MA | 86.50                 | 76.14                | 1.14                                        |
| 30VA-30CAR-15MA | 88.40                 | 76.67                | 1.15                                        |
| 30VA-30CAR-20MA | 88.92                 | 76.73                | 1.16                                        |

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% ผสมกับแคปทาการจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ จากรูปที่ 4.5 และ 4.6

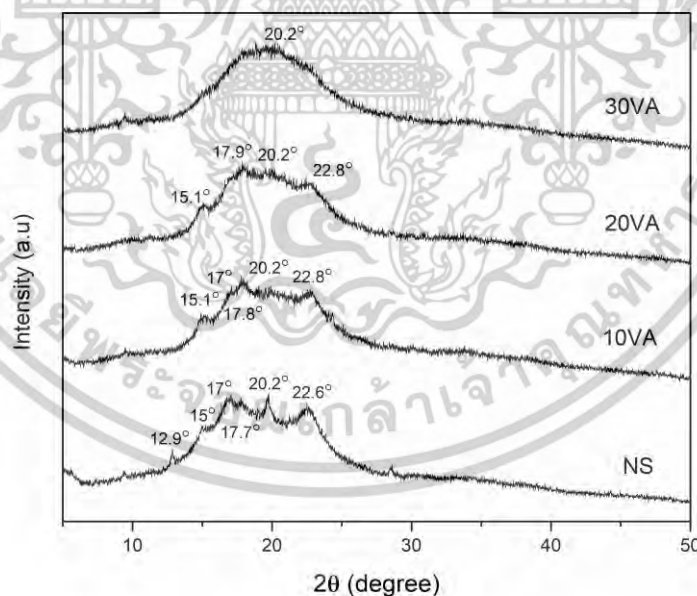
โดยพบเลขคลื่นของพีคการสั่นแบบ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$  เคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงและความเข้มของสัญญาณพีคลดลง เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งและแคปทาการจีแนนเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่กับหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอนิลของโมเลกุลกรดแมนดีลิก และกรดแมนดีลิกยังสามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้ด้วย ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Min Zhang และคณะที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวโพด (Corn starch; CS) ที่ผสมกับพุลูลแลน (Pullulan; PUL) และกรดแกลลิก (Gallic acid; GA) พบว่าพีคการสั่นแบบ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3350\text{ cm}^{-1}$  ในสเปกตรัมของฟิล์ม CS/PUL/GA เคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลของกรดแกลลิกและเมทริกซ์แป้งข้าวโพดและพุลูลแลน [47] นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของกรดแมนดีลิกยังส่งผลให้พีคการสั่นของ C=O stretching ที่ตำแหน่ง  $1724\text{ cm}^{-1}$  ของโมเลกุลทั้งแป้งอะซิไทเลตและกรดแมนดีลิก [48, 49] มีความเข้มของสัญญาณพีคมีแนวโน้ม

เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.6) อีกทั้งยังพบพิคการสั่นของ C=C stretching ของวงอะโรมาติกของโมเลกุล กรดแมนดีลิกที่ตำแหน่ง  $1650-1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นการยืนยันของการมีอยู่ของกรดแมนดีลิก ซึ่งซ้อนทับกัน กับพิคการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้งมันสำปะหลัง

### 4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

#### 4.3.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย ไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับ แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท โดยในแต่ละ สูตรใช้ปริมาณไวนิลอะซิเตทในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้อัตราเร็ว  $1^{\circ}/\text{นาที}$  มีขนาดมุมตกกระทบเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ได้พิคทั้งหมด (Net area) คือ  $2\theta = 5-50^{\circ}$  และพื้นที่สนใจศึกษา (Raw area) คือ  $2\theta = 12-28^{\circ}$  ซึ่งแสดงผลการ ทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.9 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.7 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | ปริมาณผลึก (%) |
|------|----------------|
| NS   | 41.99          |
| 10VA | 38.83          |
| 20VA | 36.61          |
| 30VA | 33.82          |

จากรูปที่ 4.9 แสดงดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรปรากฏพีกที่มุม  $2\theta = 12.9^\circ 15^\circ 17^\circ 17.7^\circ 20.2^\circ$  และ  $22.8^\circ$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ V และ E ที่เกิดขึ้นขณะสารละลายแป้งเย็นตัวลงหลังจากเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากโครงสร้างแบบ A ที่พบในพืชหัว [50] และเมื่อทำการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยไวนิลอะซิเตท พบว่าลักษณะความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับลักษณะความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณของไวนิลอะซิเตทให้สูงขึ้น พบว่าความเข้มของพีกที่มุม  $2\theta = 12.9^\circ 15^\circ 17^\circ 17.7^\circ 20.2^\circ$  และ  $22.8^\circ$  มีแนวโน้มลดลงและพบความเข้มของพีกที่มุม  $2\theta = 20.2^\circ$  เท่านั้นในฟิล์มสูตร 30VA ซึ่งเกิดจากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรนั้นถูกทำลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han F. et al. ที่ศึกษาสมบัติของแป้งข้าวโพดดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ที่มีค่า DS ต่ำ พบว่าลักษณะความเป็นผลึกของแป้งข้าวโพดดัดแปรยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับแป้งข้าวโพดที่ไม่ผ่านการดัดแปร และความเข้มของพีกที่มุม  $2\theta = 15^\circ 18^\circ 20^\circ$  และ  $23^\circ$  มีแนวโน้มลดลง [51]

จากตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทตามปริมาณที่สูงขึ้น โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณผลึกมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง ซึ่งใช้ปริมาณไวนิลอะซิเตทมากที่สุดมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด เนื่องจากกระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรนั้นถูกทำลาย โดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) ด้วยหมู่อะซิทิล ( $-COCH_3$ ) แรงยึดเหนี่ยว

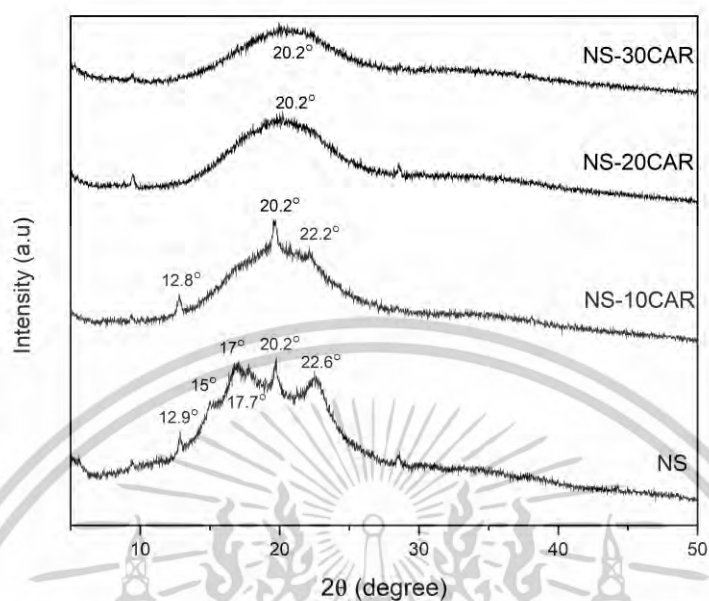
ระหว่างโมเลกุลทั้งภายนอกและภายในโมเลกุล (Inter- และ Intramolecular) ของพันธะไฮโดรเจนจึงลดลง ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่มีเกลียวคู่ด้วยพันธะไฮโดรเจนภายในอะไมโลเพกตินนั้นถูกทำลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sindhu R. et al. ที่ศึกษาสมบัติของแป้งจากผักโขมดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิไทเลชัน (Acetylation) ออกซิเดชัน (Oxidation) และผ่านความร้อนชื้น (Moisture treatment) พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิไทเลชัน (Acetylation) มีปริมาณผลึกลดลงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งเกิดจากการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ด้วยหมู่อะซิทิล (-COCH<sub>3</sub>) ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย [52]

#### 4.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

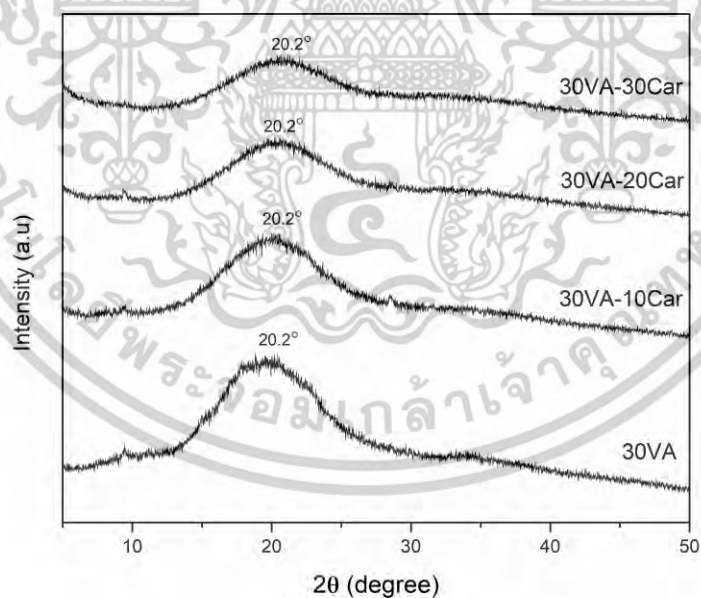
การศึกษาโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งมาผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.8 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | ปริมาณผลึก (%) |
|------------|----------------|
| NS         | 41.99          |
| NS-10CAR   | 32.75          |
| NS-20CAR   | 25.92          |
| NS-30CAR   | 22.96          |
| 30VA       | 33.82          |
| 30VA-10CAR | 29.87          |
| 30VA-20CAR | 24.85          |
| 30VA-30CAR | 21.88          |



รูปที่ 4.10 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับหลังจากที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน ที่ปริมาณต่าง ๆ



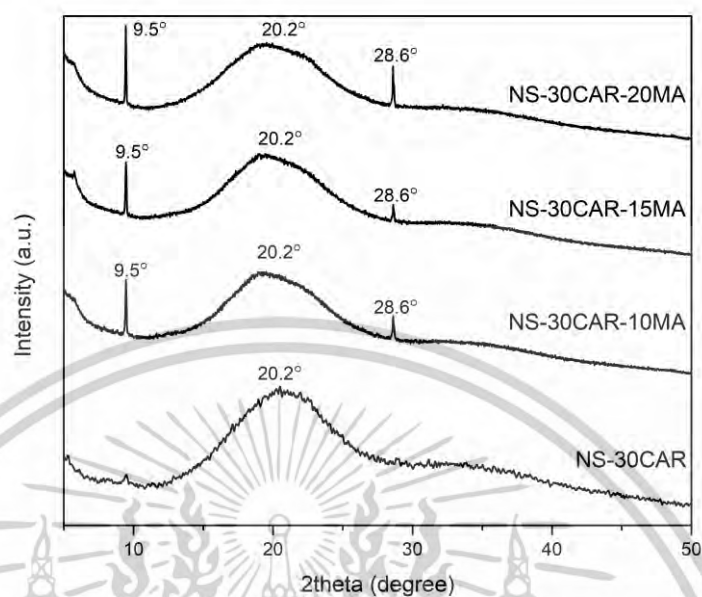
รูปที่ 4.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับหลังจากที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

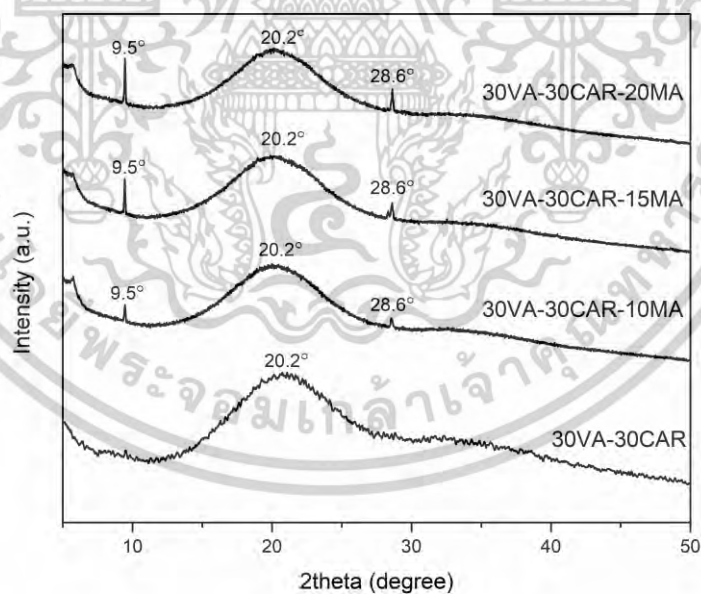
จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งผสมกับแคปพาคาราจีแนน ที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมแคปพาคาราจีแนนในฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งแสดงพีคลักษณะความเป็นผลึกที่คล้ายคลึงกัน โดยความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta = 12.9^\circ$   $15^\circ$   $17^\circ$   $17.7^\circ$   $20.2^\circ$  และ  $22.8^\circ$  ในฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta = 20.2^\circ$  ในฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของแคปพาคาราจีแนนที่ผสมมีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งแสดงแนวโน้มเดียวกันกับปริมาณผลึกที่ลดลงเมื่อปริมาณของแคปพาคาราจีแนนสูงขึ้น โดยฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ไม่มีการผสมแคปพาคาราจีแนนมีปริมาณผลึกมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มแข็งสูตร 30VA-30CAR ซึ่งมีปริมาณคาราจีแนนมากที่สุดมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด เนื่องจากแคปพาคาราจีแนนมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และนอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้งและแคปพาคาราจีแนนนั้นไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของแป้ง ส่งผลให้ความเป็นผลึกของฟิล์มแข็งลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hartiati A. et al. ที่ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตพลาสติกชีวภาพในอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนกับคาร์โบไฮเดรตต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมคาราจีแนนในแป้ง ปริมาณผลึกและความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta$  ของคอมโพสิตนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ผสม เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลในแป้งถูกขัดขวางการจัดเรียงตัวขณะสังเคราะห์คอมโพสิต ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย [53]

#### 4.3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร และฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแข็งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มแข็ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งมาผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.12 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** ปริมาณผลึกของฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | ปริมาณผลึก (%) |
|-----------------|----------------|
| NS-30CAR        | 22.96          |
| NS-30CAR-10MA   | 19.74          |
| NS-30CAR-15MA   | 19.66          |
| NS-30CAR-20MA   | 19.59          |
| 30VA-30CAR      | 21.88          |
| 30VA-30CAR-10MA | 18.63          |
| 30VA-30CAR-15MA | 18.44          |
| 30VA-30CAR-20MA | 18.30          |

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักจะแสดงลักษณะความเป็นผลึกที่คล้ายคลึงกัน และปรากฏพีคใหม่ที่ตำแหน่งที่มุม  $2\theta = 9.5^\circ$  และ  $28.6^\circ$  ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคที่สามารถยืนยันการมีอยู่ของกรดแมนดีลิกในฟิล์มได้ [54] และจากรูปที่ 4.12-4.13 และตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณผลึกของฟิล์มแข็งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta = 9.5^\circ$  และ  $28.6^\circ$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta = 20.2^\circ$  แสดงปริมาณของผลึกลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแข็งสูตร NS-30CAR-10MA และ 30VA-30CAR-10MA และเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้นฟิล์มแข็งแสดงค่าปริมาณผลึกที่ไม่แตกต่างกัน คาดว่าเกิดจากโครงสร้างผลึกของกรดแมนดีลิกไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เมทริกซ์ และสูตรฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรแสดงค่าปริมาณผลึกมากกว่าฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักเล็กน้อยจากความเป็นผลึกของฟิล์มแข็งสำหรับสัปปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่สูงกว่า

## 4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

### 4.4.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยาของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง ทำการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า โดยให้ผลการทดสอบดังนี้



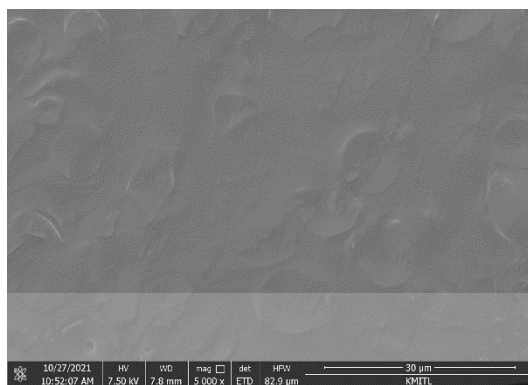
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) NS (ข) 10VA (ค) 20VA และ (ง) 30VA

จากรูปที่ 4.14 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 5000 เท่าของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งทุกสูตร (รูปที่ 4.14 (ก)-(ง)) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีพื้นผิวขรุขระเป็นบางส่วน โดยฟิล์ม

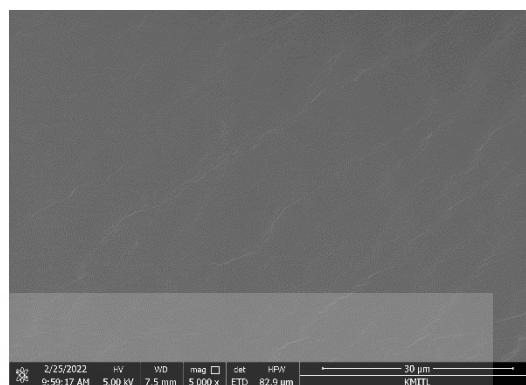
แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (รูปที่ 4.14 (ก)) มีภาคตัดขวางที่มีพื้นผิวขรุขระมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง (รูปที่ 4.14 (ง)) ซึ่งใช้ปริมาณไวนิลอะซิเตทมากที่สุดมีภาคตัดขวางที่มีพื้นผิวขรุขระน้อยที่สุด เนื่องจากระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรนั้นถูกทำลาย ส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลงดังแสดงในผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในรูปที่ 4.9 ฟิล์มแป้งจึงมีพื้นผิวที่ขรุขระน้อยลง โดย Colivet J. et al. ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรทางเคมี พบว่าภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิทิเลชันมีลักษณะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน [55]

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาลักษณะของลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยทดสอบที่กำลังขยาย 5000 เท่า ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



(ก)



(ข)



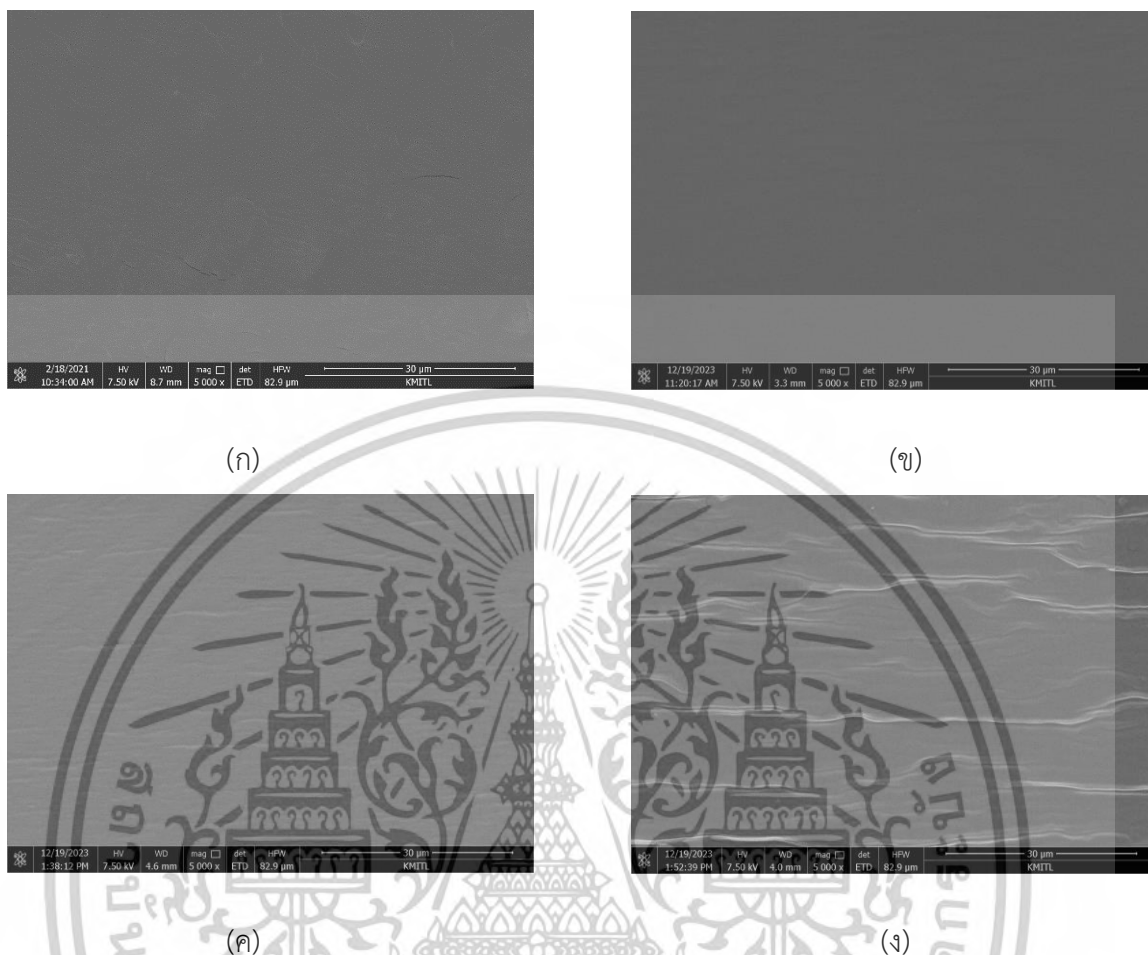
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) NS (ข) NS-10CAR (ค) NS-20CAR และ (ง) NS-30CAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



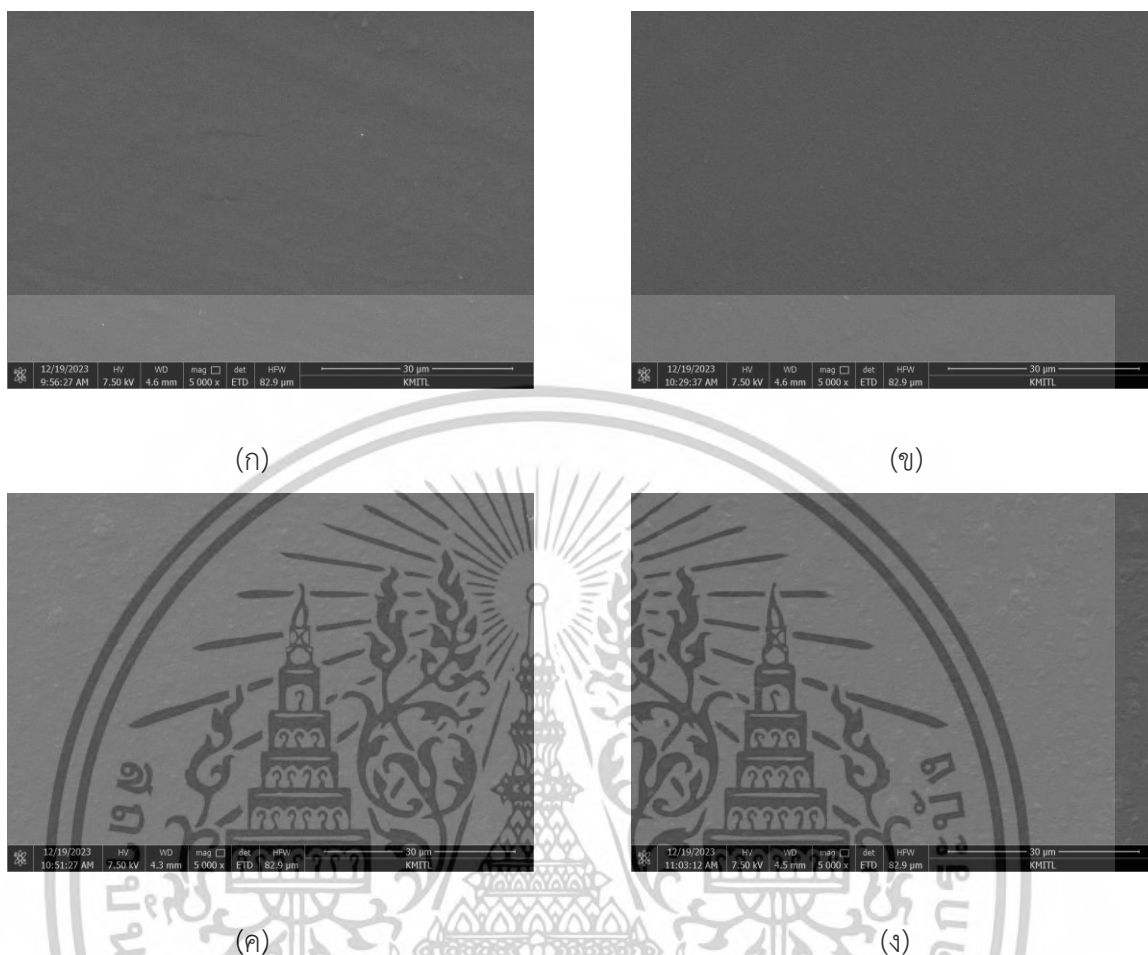
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) 30VA (ข) 30VA-10CAR (ค) 30VA-20CAR และ (ง) 30VA-30CAR

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 5000 เท่าของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปทาการจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าภาคตัดขวางในสูตรฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปทาการจีแนน (จากรูปที่ 4.15 (ก)-(ง)) มีลักษณะพื้นผิวเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคปทาการจีแนนมีการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์แป้ง และไม่มีรอยต่อหรือรอยแยกระหว่างวัฏภาคของแป้งและแคปทาการจีแนน โดยมีผลการทดสอบคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Wang C. และคณะที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมโพสิตจากแป้งข้าวโพด แคปทาการจีแนน และสารสกัดเอทานอลจากผิวของหัวหอม พบว่าภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งข้าวโพดที่ผสมกับแคปทาการจีแนนมีลักษณะพื้นผิวเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน [3] เนื่องจากแป้งและแคปทาการจีแนนมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน เป็น

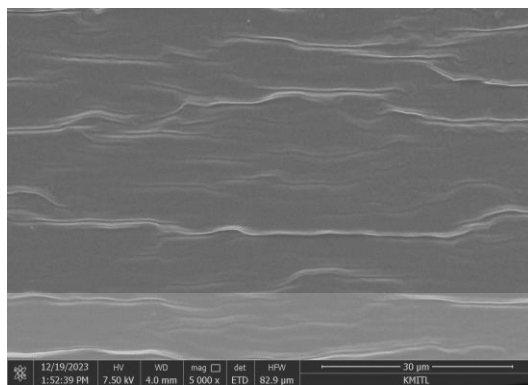
พอลิเอธิลีนไครต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งแสดงถึงความมีขั้วเหมือนกัน จึงสามารถเข้ากันได้ดี นอกจากนี้แคปอาคราจีแนมยังมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณของแคปอาคราจีแนมในฟิล์มแบง์ ส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 (ตารางที่ 4.8) ฟิล์มจึงมีพื้นผิวเรียบมากขึ้นเมื่อปริมาณของแคปอาคราจีแนมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ภาคตัดขวางในสูตรฟิล์มแบง์มันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบง์ที่ผสมกับแคปอาคราจีแนม (จากรูปที่ 4.16 (ก)-(ง)) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันในทุกสูตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคปอาคราจีแนมมีการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์แบง์ดัดแปรเช่นกัน และไม่มีรอยต่อหรือรอยแยกระหว่างวัฏภาคของแบง์และแคปอาคราจีแนม โดยฟิล์มแบง์สูตร 30VA-10CAR มีลักษณะพื้นผิวเรียบที่สุด ส่วนฟิล์มแบง์สูตร 30VA-30CAR ที่มีปริมาณแคปอาคราจีแนมสูงที่สุดมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระที่สุด ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณของแคปอาคราจีแนมที่มากขึ้นทำให้ความขุ่นหนืดของสารละลายขณะสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มแบง์มีความขรุขระมากขึ้น

#### 4.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มแบง์มันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแบง์มันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแบง์ผสมกับแคปอาคราจีแนม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

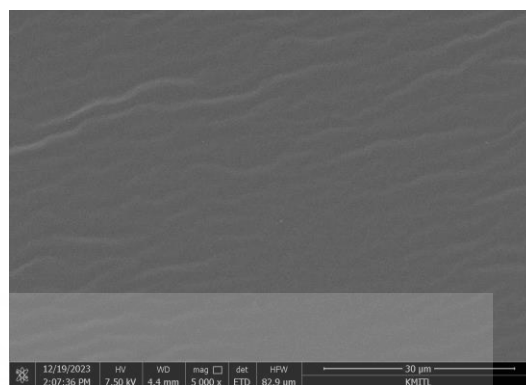
การศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยาของฟิล์มแบง์ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแบง์มันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแบง์มันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบง์มาผสมกับแคปอาคราจีแนม 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก โดยทดสอบที่ก้ำลึงขยาย 5000 เท่า ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับ แคปตาราลีนแนน 30% โดยน้ำหนัก และกรดแมนดีลิกในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X  
 (ก) NS-30CAR (ข) NS-30CAR-10MA (ค) NS-30CAR-15MA และ (ง) NS-30CAR-20MA



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และกรดแมนดีลิกในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5000X (ก) 30VA-30CAR (ข) 30VA-30CAR-10MA (ค) 30VA-30CAR-15MA และ (ง) 30VA-30CAR-20MA

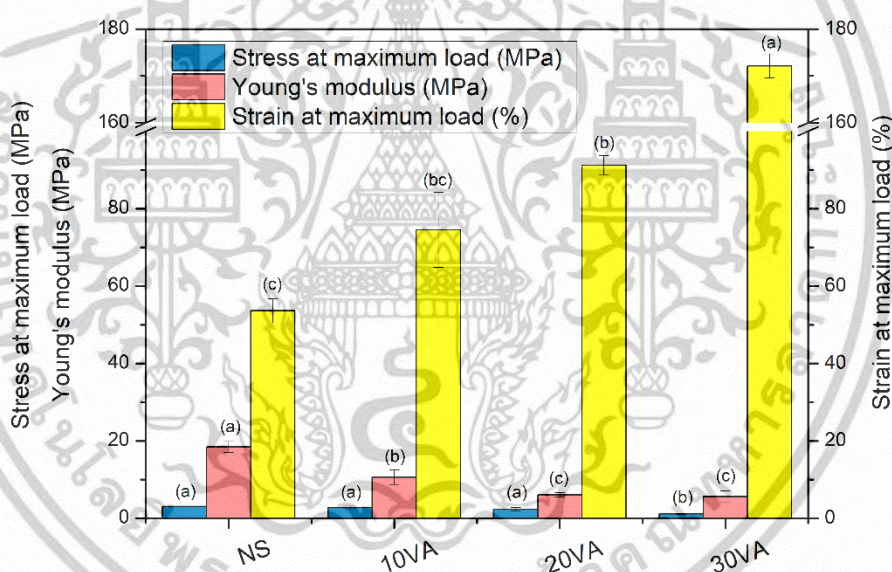
จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 5000 เท่าของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก (จากรูปที่ 4.17 (ก)-(ง)) แสดงภาคตัดขวางที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันแต่มีพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่ากรดแมนดีลิกที่มากเกินไปอาจจะไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ของเมทริกซ์และเกาะกลุ่มกระจายตัวอยู่ทั่วฟิล์ม ส่วนฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก เมื่อเติมกรดแมนดีลิก (จากรูปที่

4.18 (ก)-(ง)) แสดงภาคตัดขวางที่มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเพิ่มขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดแมนดีลิกมีการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิเมอร์ และไม่มีรอยต่อหรือรอยแยกระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์และกรดแมนดีลิก และแสดงให้เห็นว่ากรดแมนดีลิกสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้ง 30VA ดีกว่า NS

## 4.5 สมบัติเชิงกล

### 4.5.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง โดยศึกษาค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



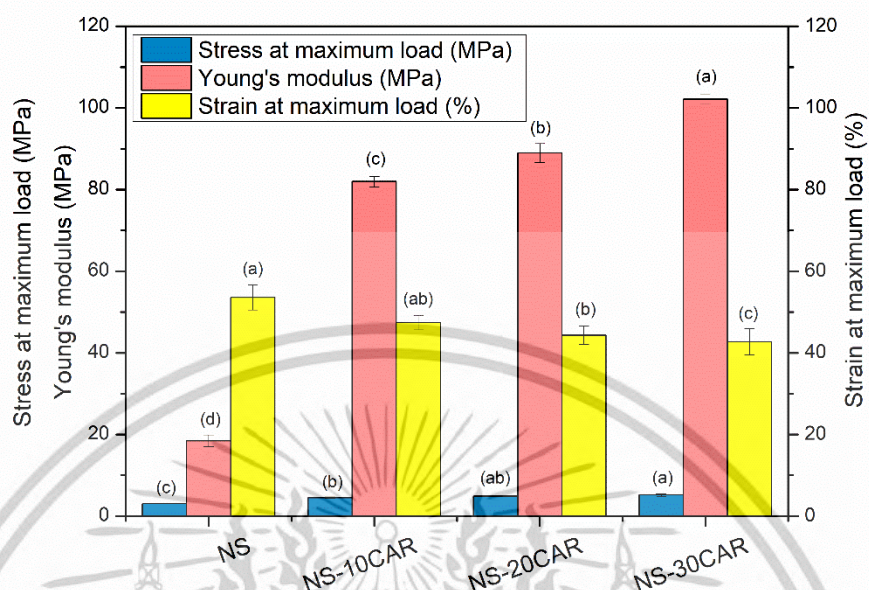
รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.19 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสสูงที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดต่ำที่สุด ในทางกลับกันฟิล์มแป้งสูตร 30VA ซึ่งเป็นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิ-

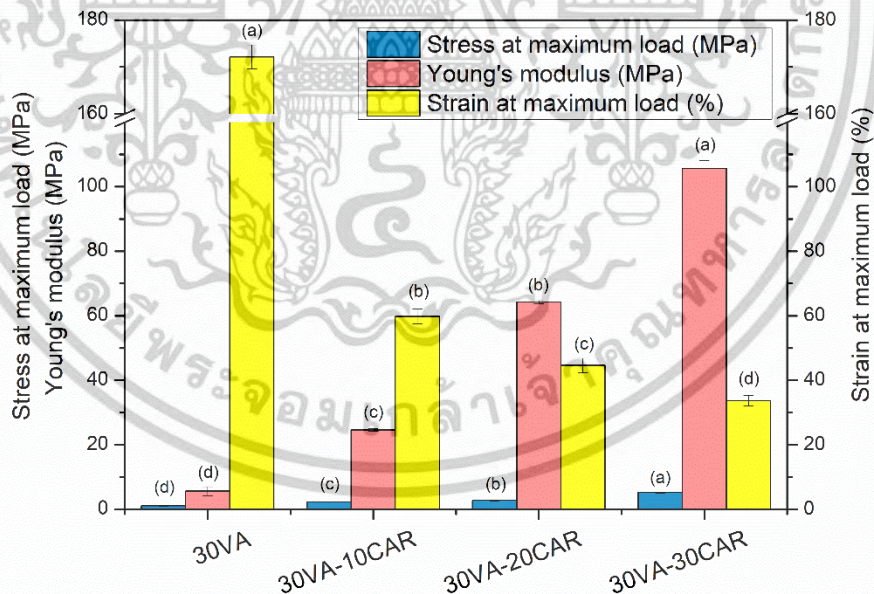
เตท 30% โดยน้ำหนักแป้งและใช้ปริมาณไวโนลอะซิเตทมากที่สุดมีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสต่ำที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์ดัดยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation) ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรนั้นถูกทำลายโดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ด้วยหมู่อะซิติล (-COCH<sub>3</sub>) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งภายนอกและภายในโมเลกุล (Inter- และ Intramolecular) ของพันธะไฮโดรเจนลดลง จึงส่งผลให้ฟิล์มแป้งมีความสามารถในการรับและส่งผ่านแรงลดลงตามแนวโน้มของปริมาณไวโนลอะซิเตท ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ XRD ที่ฟิล์มแป้งสูตร NS มีปริมาณผลึกมากที่สุดและฟิล์มแป้งสูตร 30VA มีปริมาณผลึกน้อยที่สุด อีกทั้งยังคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Colussi R. et al ที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสในปริมาณที่ต่างกัน พบว่า ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าอะซิทิเลทที่มีค่าการแทนที่ (Degree of substitution: DS) ต่ำ แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ที่ต่ำลง และค่าการยืดตัว (Elongation) ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดั้งเดิม [36]

#### 4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยศึกษาค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ดัดยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับหลังจากที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปคาร์บอนที่ปริมาณต่าง ๆ



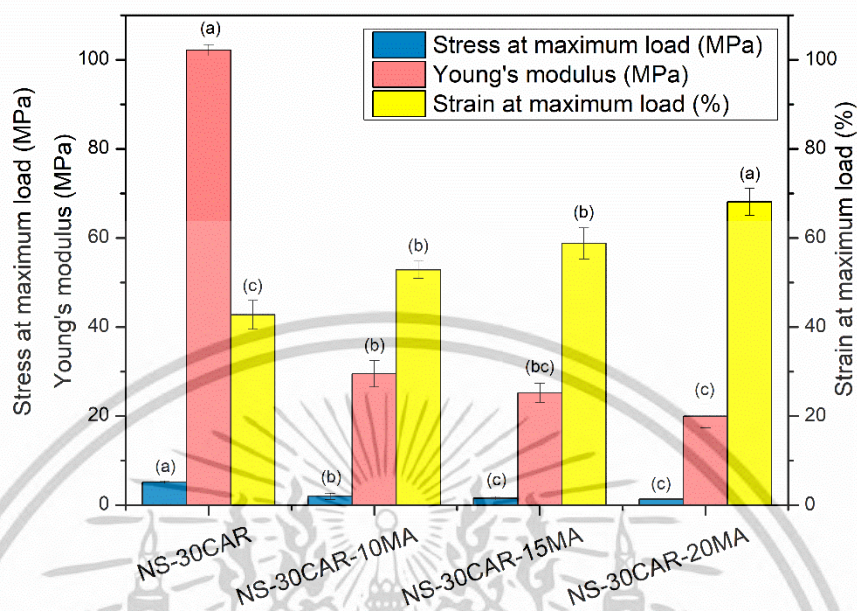
รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับหลังจากที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปคาร์บอนที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

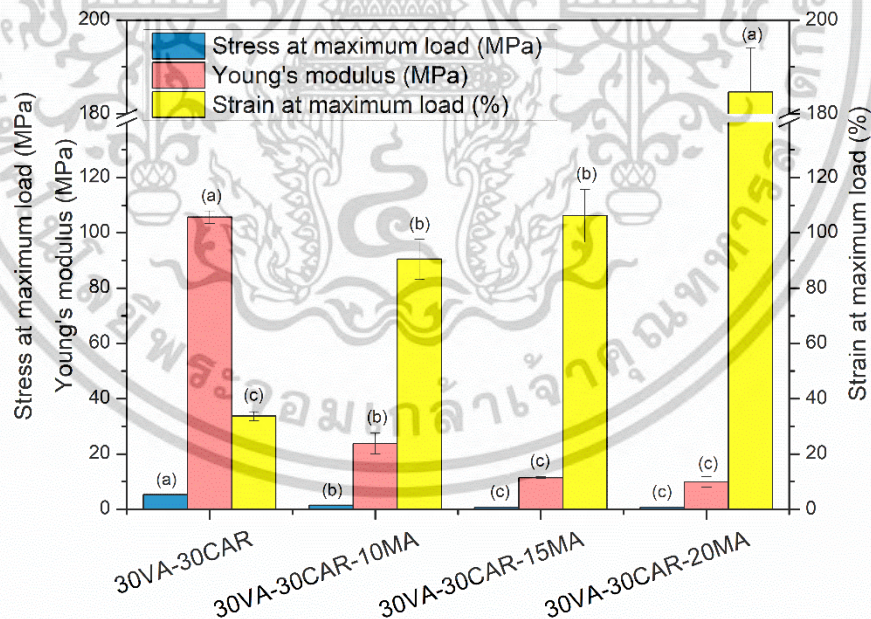
จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมแคปซาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งจะแสดงแนวโน้มของค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เหมือนกัน โดยเมื่อแคปซาคาราจีแนนที่ผสมในฟิล์มแป้งมีปริมาณมากขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อผสมแคปซาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งจะส่งผลให้ความเป็นผลึกของแป้งลดลงดังแสดงในผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 (ตารางที่ 4.8) เนื่องจากความเป็นอสัณฐานของแคปซาคาราจีแนน ส่วนปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล คือ ปฏิกริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งและแคปซาคาราจีแนนเกิดพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ระหว่างโมเลกุลของแคปซาคาราจีแนนด้วยกันยังสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างโพแทสเซียมไอออนและหมู่ซัลเฟตบนสายโซ่แคปซาคาราจีแนนเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถเคลื่อนตัวได้ลดลง ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Dawam Abdullah A.H. et al ที่ศึกษาผลของปริมาณแคปซาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Starch-carboxymethyl cellulose) และงานของ A.A. Abdillah และ A.L. Charles ที่ศึกษาผลของปริมาณไอโอตาคาราจีแนน (Iota-Carrageenan) ในแป้งท้าวายม่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัสที่สูงขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดขาดที่ลดลง เมื่อผสมคาราจีแนนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น [38, 56]

#### 4.5.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก โดยศึกษาค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปซูลคาร์บอน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปซูลคาร์บอน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และนำมาเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักจะแสดงแนวโน้มของค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดที่เหมือนกัน โดยเมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแป้งที่ปริมาณมากขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสมีแนวโน้มลดลง และค่าเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดสอบมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Kumar R. และคณะที่ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมกรดแมนดีลิก พบว่าเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้นจาก 2.5-7.5% โดยน้ำหนักของฟิล์ม ซึ่งฟิล์มแสดงค่าความแข็งแรงดึงและโมดูลัสลดลง และเปอร์เซ็นต์ดัดยัด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น [19] ถึงแม้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลของกรดแมนดีลิกสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของเมทริกซ์ได้ แต่โมเลกุลของกรดแมนดีลิกอาจไปขัดขวางความเป็นผลึกของสายโซ่ของแป้งและไปลดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างประจุระหว่างแป้ง-แคปทาการจีแนนและแคปทาการจีแนน-แคปทาการจีแนน นอกจากนี้กรดแมนดีลิกสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ (รูปที่ 4.3) ทำให้สายโซ่แป้งและคาราจีแนนสั้นลง ส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสมีค่าลดลง และการเพิ่มปริมาณของกรดแมนดีลิกที่เติมลงในฟิล์มแป้งยังส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แป้งและแคปทาการจีแนนนั่นลดลง ส่งผลให้การส่งผ่านแรงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มีค่าลดลงด้วย

## 4.6 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น

### 4.6.1 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง โดยแสดงผลการทดสอบดังนี้

**ตารางที่ 4.10** ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | ค่าการดูดซับความชื้น (%)   |                           |                            |
|------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|      | วันที่ 1                   | วันที่ 4                  | วันที่ 7                   |
| NS   | 22.20 ± 1.36 <sup>c</sup>  | 28.94 ± 2.53 <sup>c</sup> | 33.34 ± 5.35 <sup>c</sup>  |
| 10VA | 24.86 ± 0.98 <sup>bc</sup> | 38.09 ± 2.56 <sup>b</sup> | 47.50 ± 3.97 <sup>b</sup>  |
| 20VA | 26.59 ± 2.05 <sup>b</sup>  | 42.46 ± 2.92 <sup>b</sup> | 54.49 ± 5.61 <sup>ab</sup> |
| 30VA | 31.13 ± 1.66 <sup>a</sup>  | 51.20 ± 2.91 <sup>a</sup> | 64.07 ± 3.87 <sup>a</sup>  |

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทุกสูตรแสดงค่าการดูดซับความชื้นสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ทำการทดสอบผ่านไปมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งแสดงถึงความมีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่ามีค่าการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นและสูงกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยฟิล์มแป้งสูตร 30VA ซึ่งใช้ปริมาณไวโนลอะซิเตทมากที่สุด มีค่าการดูดซับความชื้นสูงที่สุด และฟิล์มแป้งสูตร 10VA ซึ่งใช้ปริมาณไวโนลอะซิเตทน้อยที่สุด มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำที่สุด เนื่องจากหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดผลของความเกะกะของหมู่แทนที่ (Steric effect) ส่งผลให้สายโซ่ระหว่างโมเลกุลของแป้งมีระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกลดลง โมเลกุลน้ำจึงสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ง่ายขึ้น ดังผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในรูปที่ 4.9 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han F. และคณะที่ศึกษาสมบัติของแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตที่มีค่าการแทนที่ (DS) ต่ำ (DS=0.057-0.159) โดยผ่านการดัดแปรด้วยกรดอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) ซึ่งมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เป็นตัวกระตุ้น ผลการศึกษาพบว่าแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตมีค่าการดูดซับความชื้นที่สูงกว่าแป้งข้าวโพดที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตมีค่าการแทนที่ที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งข้าวโพด ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่โมเลกุลของแป้งภายในบริเวณอสัณฐานได้ง่ายขึ้น เกิดจากความไม่เป็นระเบียบของ

โครงสร้างภายในเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นผลของความเกะกะของหมู่แทนที่ (Steric effect) และการขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจน [51]

#### 4.6.2 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซูลคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.11 ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | ค่าการดูดซับความชื้น (%)   |                            |                            |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|            | วันที่ 1                   | วันที่ 4                   | วันที่ 7                   |
| NS         | 17.22 ± 0.90 <sup>c</sup>  | 27.96 ± 5.26 <sup>c</sup>  | 33.88 ± 1.83 <sup>c</sup>  |
| NS-10CAR   | 18.29 ± 0.93 <sup>bc</sup> | 31.96 ± 4.84 <sup>c</sup>  | 40.21 ± 3.24 <sup>bc</sup> |
| NS-20CAR   | 23.25 ± 0.51 <sup>a</sup>  | 43.46 ± 7.73 <sup>b</sup>  | 54.45 ± 3.40 <sup>ab</sup> |
| NS-30CAR   | 23.80 ± 4.26 <sup>a</sup>  | 48.47 ± 2.86 <sup>a</sup>  | 63.71 ± 10.12 <sup>a</sup> |
| 30VA       | 19.81 ± 1.11 <sup>c</sup>  | 30.91 ± 1.84 <sup>c</sup>  | 44.20 ± 6.99 <sup>b</sup>  |
| 30VA-10CAR | 22.83 ± 1.19 <sup>bc</sup> | 34.29 ± 1.44 <sup>bc</sup> | 47.74 ± 2.71 <sup>ab</sup> |
| 30VA-20CAR | 26.20 ± 1.48 <sup>ab</sup> | 38.69 ± 2.86 <sup>ab</sup> | 51.97 ± 1.31 <sup>ab</sup> |
| 30VA-30CAR | 28.03 ± 2.97 <sup>a</sup>  | 43.70 ± 1.60 <sup>a</sup>  | 61.10 ± 8.16 <sup>a</sup>  |

จากตารางที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมแคปซูลคาราจีแนนในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของแคปซูลคาราจีแนนที่ประกอบด้วยหมู่

ซัลเฟตที่เสถียรบนสายโซ่แคปทาการาจีแนน ซึ่งแคปทาการาจีแนนที่เสถียรโดยแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ด้วยไอออนของโพแทสเซียม ทำให้เกิดไฮโดรเจลแบบกายภาพ (Physical hydrogel) ที่เป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติที่ทนทาน โดยโครงสร้างนี้จะรองรับการแพร่ของน้ำในเมทริกซ์ของฟิล์ม นอกจากนี้การผสมแคปทาการาจีแนนในฟิล์มจะไปลดอันตรกิริยาภายในสายโซ่แข็ง ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์ขยายตัวและค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น [57]

เมื่อพิจารณาฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย ไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมแคปทาการาจีแนนจากตารางที่ 4.11 พบว่าฟิล์มสูตร NS-CAR มีค่าการดูดซับความชื้นสูงกว่าฟิล์มสูตร 30VA-CAR เล็กน้อย เนื่องจากฟิล์มสูตร NS-CAR มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มากกว่าฟิล์มสูตร 30VA-CAR ที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่อะซิไทลจึงทำให้ฟิล์มสูตร NS-CAR สามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าฟิล์มสูตร 30VA-CAR

#### 4.6.3 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการาจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปทาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | ค่าการดูดซับความชื้น (%)   |                            |                            |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                 | วันที่ 1                   | วันที่ 4                   | วันที่ 7                   |
| NS-30CAR        | 33.43 ± 1.40 <sup>a</sup>  | 52.32 ± 2.83 <sup>a</sup>  | 69.82 ± 2.32 <sup>a</sup>  |
| NS-30CAR-10MA   | 31.52 ± 1.06 <sup>ab</sup> | 51.71 ± 1.52 <sup>a</sup>  | 67.25 ± 0.62 <sup>ab</sup> |
| NS-30CAR-15MA   | 30.84 ± 1.51 <sup>ab</sup> | 49.21 ± 1.63 <sup>ab</sup> | 66.13 ± 0.22 <sup>b</sup>  |
| NS-30CAR-20MA   | 30.04 ± 1.70 <sup>b</sup>  | 45.78 ± 0.66 <sup>b</sup>  | 62.40 ± 0.71 <sup>c</sup>  |
| 30VA-30CAR      | 31.69 ± 0.39 <sup>a</sup>  | 51.69 ± 1.93 <sup>a</sup>  | 64.65 ± 0.98 <sup>a</sup>  |
| 30VA-30CAR-10MA | 25.94 ± 0.24 <sup>b</sup>  | 44.31 ± 2.00 <sup>b</sup>  | 56.82 ± 3.07 <sup>b</sup>  |
| 30VA-30CAR-15MA | 26.05 ± 0.86 <sup>b</sup>  | 44.89 ± 1.55 <sup>b</sup>  | 58.48 ± 2.25 <sup>ab</sup> |
| 30VA-30CAR-20MA | 26.83 ± 2.32 <sup>b</sup>  | 48.52 ± 3.26 <sup>ab</sup> | 61.68 ± 3.50 <sup>ab</sup> |

จากตารางที่ 4.12 แสดงการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และนำมาเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนักในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักแสดงค่าการดูดซับความชื้นที่ลดลงเนื่องจากกรดแมนดีลิกประกอบด้วยหมู่แอริล (Aryl group) ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้ค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kumar R. และคณะที่ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมกรดแมนดีลิก พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มมีค่าลดลงเนื่องจากหมู่อะโรมาติก (Aromatic group) ในโมเลกุลของกรดแมนดีลิก [19] และนอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลกรดแมนดีลิกสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ฟิล์มแป้งจึงมีความชอบน้ำลดลง

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ซึ่งฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดแสดงค่าแนวโน้มของการดูดซับความชื้นที่ตรงข้ามกัน โดยฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (NS-30CAR-MA) แสดง

ค่าการดูดซับความชื้นที่ลดลง ซึ่งคาดว่ากรดแมนดีลิกที่มากเกินไปอาจจะไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ของเมทริกซ์และเกาะกลุ่มกระจายตัวอยู่ทั่วฟิล์ม ส่งผลให้ความชอบน้ำของฟิล์มสูตร NS-30CAR-MA ลดลง ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง (30VA-30CAR-MA) แสดงค่าการดูดซับความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดแมนดีลิกที่มากไปรบกวนโครงสร้างตาข่ายของเมทริกซ์ ซึ่งกรดแมนดีลิกไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสายโซ่แป้งและแคปทาการจีแนน ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่มากขึ้น น้ำจึงสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่ได้ง่ายขึ้น และจากผลการทดสอบสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าฟิล์มแป้งสูตร 30VA-30CAR-MA สามารถเกิดอันตรกิริยากับกรดแมนดีลิกได้ดีกว่าฟิล์มแป้งสูตร NS-30CAR-MA จึงคาดว่ากรดแมนดีลิกสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งได้ดีกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร น้ำจึงสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่ได้ง่ายขึ้นในฟิล์มสูตร 30VA-30CAR-MA

#### 4.7 การวิเคราะห์การบวมตัว

##### 4.7.1 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง โดยแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.13 ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | ค่าการบวมตัว (%)            |                             |                             |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|      | ชั่วโมงที่ 1                | ชั่วโมงที่ 6                | ชั่วโมงที่ 24               |
| NS   | 199.85 ± 2.05 <sup>b</sup>  | 313.78 ± 1.40 <sup>b</sup>  | 372.33 ± 9.10 <sup>c</sup>  |
| 10VA | 217.88 ± 5.63 <sup>a</sup>  | 416.17 ± 8.52 <sup>a</sup>  | 682.54 ± 9.62 <sup>b</sup>  |
| 20VA | 230.67 ± 5.76 <sup>ab</sup> | 437.39 ± 0.41 <sup>ab</sup> | 705.61 ± 9.41 <sup>ab</sup> |
| 30VA | 276.94 ± 2.13 <sup>a</sup>  | 495.36 ± 8.46 <sup>a</sup>  | 764.95 ± 3.57 <sup>a</sup>  |

จากตารางที่ 4.13 แสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังทุกสูตรแสดงค่าการบวมตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาทำการทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมงแรก และค่าการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงที่ 6 และ 24 โดยฟิล์มแป้งสูตร 30VA ซึ่งมีปริมาณไวนิลอะซิเตทมากที่สุด มีค่าการบวมตัวสูงสุด และฟิล์มแป้งสูตร 10VA ซึ่งมีปริมาณไวนิลอะซิเตทน้อยที่สุด มีค่าการบวมตัวต่ำที่สุด เนื่องจากหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดผลของความเกะกะของหมู่แทนที่ (Steric effect) ส่งผลให้สายโซ่ระหว่างโมเลกุลของแป้งมีระยะห่างที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Han F. และคณะที่ศึกษาสมบัติของแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตที่มีค่าการแทนที่ (DS) ต่ำ ( $DS=0.057-0.159$ ) โดยผ่านการดัดแปรด้วยกรดอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) ซึ่งมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เป็นตัวกระตุ้น ผลการศึกษาพบว่าแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตมีค่าการบวมตัวที่สูงกว่าแป้งข้าวโพดที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อแป้งข้าวโพดอะซิทิลเลตมีค่าการแทนที่ที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้งข้าวโพด ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่โมเลกุลของแป้งภายในบริเวณออสันฐานได้ง่ายขึ้น เกิดจากความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นผลของความเกะกะของหมู่แทนที่ (Steric effect) และการขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจน [51] อีกทั้งผลการทดสอบการบวมตัวยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.6.1 การวิเคราะห์การดูดความชื้นอีกด้วย

#### 4.7.2 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาการบวมตัวของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

**ตารางที่ 4.14** ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | ค่าการบวมตัว (%)             |                            |                             |
|------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|            | ชั่วโมงที่ 1                 | ชั่วโมงที่ 6               | ชั่วโมงที่ 24               |
| NS         | 199.85 ± 2.05 <sup>b</sup>   | 313.78 ± 1.40 <sup>d</sup> | 372.33 ± 9.10 <sup>d</sup>  |
| NS-10CAR   | 248.05 ± 5.93 <sup>a</sup>   | 529.10 ± 3.20 <sup>c</sup> | 737.57 ± 4.80 <sup>c</sup>  |
| NS-20CAR   | 252.02 ± 9.22 <sup>a</sup>   | 699.71 ± 3.47 <sup>b</sup> | 961.37 ± 5.91 <sup>b</sup>  |
| NS-30CAR   | 244.80 ± 10.63 <sup>ab</sup> | 779.36 ± 8.30 <sup>a</sup> | 1449.90 ± 9.54 <sup>a</sup> |
| 30VA       | 276.60 ± 2.76 <sup>a</sup>   | 495.36 ± 8.46 <sup>d</sup> | 764.62 ± 3.38 <sup>d</sup>  |
| 30VA-10CAR | 265.11 ± 13.06 <sup>ab</sup> | 558.96 ± 5.08 <sup>c</sup> | 896.00 ± 5.05 <sup>c</sup>  |
| 30VA-20CAR | 264.25 ± 4.13 <sup>b</sup>   | 594.19 ± 6.51 <sup>b</sup> | 955.27 ± 3.14 <sup>b</sup>  |
| 30VA-30CAR | 269.41 ± 6.43 <sup>b</sup>   | 641.28 ± 6.76 <sup>a</sup> | 1443.66 ± 4.09 <sup>a</sup> |

จากตารางที่ 4.14 แสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมแคปพาคาราจีแนนในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของแคปพาคาราจีแนนที่ประกอบด้วยหมู่ซัลเฟตที่เสถียรบนสายโซ่แคปพาคาราจีแนน ซึ่งแคปพาคาราจีแนนที่เสถียรโดยแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ด้วยไอออนของโลหะ ทำให้เกิดไฮโดรเจลแบบกายภาพ (Physical hydrogel) ที่เป็นโครงสร้างสามมิติที่ทนทาน โดยโครงสร้างนี้จะรองรับการแพร่ของน้ำในเมทริกซ์ของฟิล์ม นอกจากนี้การผสมแคปพาคาราจีแนนในฟิล์มไปลดอันตรกิริยาภายในสายโซ่แป้ง ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์ขยายตัวและค่าการบวมตัวมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ de Lima Barizao C. และคณะที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากแคปพาคาราจีแนนและแป้งมันสำปะหลัง พบว่าเมื่อปริมาณของแคปพาคาราจีแนนที่ผสมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการมีหมู่ซัลเฟตที่เสถียรบนสายโซ่แคปพาคาราจีแนน ซึ่งแคปพาคาราจีแนนที่เสถียรโดยแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ด้วยไอออนของโลหะ ทำให้เกิดไฮโดรเจลแบบกายภาพ (Physical hydrogel) ที่สามารถรองรับการแพร่ของน้ำในเมทริกซ์ของฟิล์มได้ [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย ไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมแคปาคาราจีแนน พบว่าเมื่อปริมาณของแคปาคาราจีแนน เพิ่มขึ้น ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีความหนาแน่นสูงกว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง เนื่องจากฟิล์มสูตร NS-CAR มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มากกว่าฟิล์มสูตร 30VA-CAR ที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่อะซิไทลจึงทำให้ฟิล์มสูตร NS-CAR บวมตัวมากกว่าฟิล์มสูตร 30VA-CAR จากความมีขี้และสมบัติชอบน้ำที่มากกว่า ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในฟิล์มได้มากกว่า อีกทั้งผลการทดสอบการบวมตัวยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.6.2 การวิเคราะห์การดูดความชื้นอีกด้วย

#### 4.7.3 การวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาการบวมตัวของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

**ตารางที่ 4.15** ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | ค่าการบวมตัว (%)            |                             |                             |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                 | ชั่วโมงที่ 1                | ชั่วโมงที่ 6                | ชั่วโมงที่ 24               |
| NS-30CAR        | 244.80 ± 10.63 <sup>a</sup> | 779.36 ± 8.30 <sup>a</sup>  | 1449.90 ± 9.54 <sup>a</sup> |
| NS-30CAR-10MA   | 219.99 ± 5.34 <sup>b</sup>  | 371.68 ± 14.38 <sup>b</sup> | 632.79 ± 8.21 <sup>b</sup>  |
| NS-30CAR-15MA   | 199.03 ± 6.88 <sup>c</sup>  | 303.75 ± 14.60 <sup>c</sup> | 451.50 ± 6.79 <sup>c</sup>  |
| NS-30CAR-20MA   | 182.65 ± 5.16 <sup>c</sup>  | 297.10 ± 8.34 <sup>c</sup>  | -                           |
| 30VA-30CAR      | 269.74 ± 0.93 <sup>a</sup>  | 643.62 ± 2.84 <sup>a</sup>  | 1459.33 ± 9.91              |
| 30VA-30CAR-10MA | 173.34 ± 2.89 <sup>b</sup>  | 285.74 ± 4.86 <sup>c</sup>  | -                           |
| 30VA-30CAR-15MA | 179.10 ± 0.94 <sup>c</sup>  | 307.81 ± 11.06 <sup>b</sup> | -                           |
| 30VA-30CAR-20MA | 183.00 ± 2.87 <sup>c</sup>  | 313.45 ± 4.29 <sup>b</sup>  | -                           |

จากตารางที่ 4.15 แสดงการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และนำมาเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนักในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักแสดงค่าการบวมตัวที่ลดลง เนื่องจากกรดแมนดีลิกประกอบด้วยหมู่แอริล (Aryl group) ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้ค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kumar R. และคณะที่ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมกรดแมนดีลิก พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มมีค่าลดลงเนื่องจากหมู่อะโรมาติก (Aromatic group) ในโมเลกุลของกรดแมนดีลิก [19] และนอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลกรดแมนดีลิกสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับกับสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ฟิล์มแป้งจึงมีความชอบน้ำลดลง

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนักเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ซึ่งในชั่วโมงที่ 24 ไม่สามารถบันทึกค่าการบวมตัวของฟิล์ม

สูตร NS-30CAR-20MA และ 30VA-30CAR-(10MA 15MA และ 20MA) ได้จึงพิจารณาค่าในชั่วโมงที่ 6 โดยฟิล์มแบ่งทั้งสองชนิดแสดงค่าแนวโน้มของการบวมตัวที่ตรงข้ามกัน โดยฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (NS-30CAR-MA) แสดงค่าการบวมตัวที่ลดลง ซึ่งคาดว่ากรดแมนดีลิกที่มากเกินไปไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่เมทริกซ์และกระจายตัวอยู่ในฟิล์ม ส่งผลให้ความชอบน้ำของฟิล์มแบ่งลดลง ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่ง (30VA-30CAR-MA) แสดงค่าการบวมตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดแมนดีลิกที่มากไปรบกวนโครงสร้างตาข่ายของเมทริกซ์ ซึ่งกรดแมนดีลิกไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสายโซ่แป้งและแคปปาคราจีแนน ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่มากขึ้น น้ำจึงสามารถแทรกเข้ามาในสายโซ่ได้ง่าย และจากผลการทดสอบสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าฟิล์มแบ่งสูตร 30VA-30CAR-MA สามารถเกิดอันตรกิริยากับกรดแมนดีลิกได้ดีกว่าฟิล์มแบ่งสูตร NS-30CAR-MA จึงคาดว่ากรดแมนดีลิกสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งได้ดีกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร อีกทั้งผลการทดสอบการบวมตัวยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.6.3 การวิเคราะห์การดูดความชื้นอีกด้วย

## 4.8 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำ

### 4.8.1 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแบ่ง โดยแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.16 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร    | อัตราการซึมผ่านไอน้ำ<br>(กรัม.เมตร <sup>-2</sup> .วัน <sup>-1</sup> ) |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|
| Control | 583.07 ± 3.08                                                         |
| NS      | 309.00 ± 3.61 <sup>b</sup>                                            |
| 10VA    | 315.33 ± 1.53 <sup>ab</sup>                                           |
| 20VA    | 321.00 ± 3.61 <sup>ab</sup>                                           |
| 30VA    | 326.31 ± 3.31 <sup>a</sup>                                            |

จากตารางที่ 4.16 แสดงค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งสูตร NS คือ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุด และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกนำมาปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งสูตร 30VA คือ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักของแป้งมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มหมู่อะซิทิลในโมเลกุลของแป้ง เกิดความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นผลของความเกะกะของหมู่แทนที่ (Steric effect) และการขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกผ่านเข้ามาในสายโซ่โมเลกุลของแป้งภายในบริเวณออสซิลันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งสูตร 30VA มากขึ้น อีกทั้งผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.6.1 การวิเคราะห์การดูดความชื้นและผลการทดสอบ 4.7.1 การวิเคราะห์การบวมตัวอีกด้วย

#### 4.8.2 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.17 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | อัตราการซึมผ่านไอน้ำ<br>(กรัม.เมตร <sup>-2</sup> .วัน <sup>-1</sup> ) |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Control    | 583.07 ± 3.08                                                         |
| NS         | 309.00 ± 3.61 <sup>d</sup>                                            |
| NS-10CAR   | 366.65 ± 3.09 <sup>c</sup>                                            |
| NS-20CAR   | 416.12 ± 4.05 <sup>b</sup>                                            |
| NS-30CAR   | 432.83 ± 3.29 <sup>a</sup>                                            |
| 30VA       | 326.31 ± 3.31 <sup>c</sup>                                            |
| 30VA-10CAR | 354.89 ± 3.57 <sup>b</sup>                                            |
| 30VA-20CAR | 408.67 ± 7.31 <sup>a</sup>                                            |
| 30VA-30CAR | 414.83 ± 5.04 <sup>a</sup>                                            |

จากตารางที่ 4.17 แสดงค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าทั้งสูตรฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มีแนวโน้มอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูงขึ้น เมื่อปริมาณของแคปทาการจีแนนสูงขึ้น ซึ่งแสดงแนวโน้มคล้ายกับการศึกษาของ Abdou, E. S. และ Sorour, M. A. ที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้ง/การจีแนน ใช้แป้งและการจีแนนที่ความเข้มข้น 0.75 1 และ 1.25% และ 0.5 และ 0.75% ตามลำดับ ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าเมื่อปริมาณของการจีแนนในฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [11] เนื่องจากแคปทาการจีแนนมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณของแคปทาการจีแนนในฟิล์มแป้ง ปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งจึงลดลงตามไปด้วยดังแสดงในผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ส่งผลให้ไอน้ำสามารถแทรกผ่านโมเลกุลของเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้น จึงมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูงขึ้น อีกทั้งผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ 4.6.2 การวิเคราะห์การดูดความชื้นและผลการทดสอบ 4.7.2 การวิเคราะห์การบวมตัวอีกด้วย

#### 4.8.3 การวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้ง มาผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.18 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | อัตราการซึมผ่านไอน้ำ<br>(กรัม.เมตร <sup>-2</sup> .วัน <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Control         | 583.07 ± 3.08                                                         |
| NS-30CAR        | 432.83 ± 3.29 <sup>a</sup>                                            |
| NS-30CAR-10MA   | 317.47 ± 2.87 <sup>b</sup>                                            |
| NS-30CAR-15MA   | 313.86 ± 3.49 <sup>b</sup>                                            |
| NS-30CAR-20MA   | 312.15 ± 3.50 <sup>b</sup>                                            |
| 30VA-30CAR      | 414.83 ± 5.04 <sup>a</sup>                                            |
| 30VA-30CAR-10MA | 294.90 ± 8.88 <sup>b</sup>                                            |
| 30VA-30CAR-15MA | 297.23 ± 5.42 <sup>b</sup>                                            |
| 30VA-30CAR-20MA | 305.67 ± 3.82 <sup>b</sup>                                            |

จากตารางที่ 4.18 แสดงอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และนำมาเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนักในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนักแสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง เนื่องจากกรดแมนดีลิกประกอบด้วยหมู่แอริล (Aryl group) ที่ไม่ชอบน้ำ

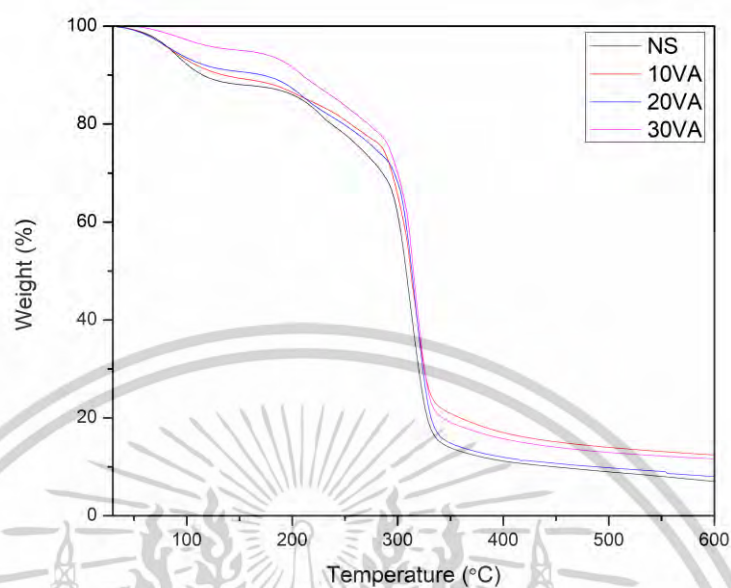
(Hydrophobic) ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแบ่งลดลง และนอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลกรดแมนดีลิกสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ฟิล์มแบ่งจึงมีความชอบน้ำลดลง

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งผสมกับแคปทาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนักเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น ซึ่งฟิล์มแบ่งทั้งสองชนิดแสดงค่าแนวโน้มของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในตารางที่ 4.9 ที่แสดงค่าปริมาณผลึกของฟิล์มแบ่งที่ไม่แตกต่างกัน จึงคาดว่าช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลเมทริกซ์และการถ่ายเทความชื้นของฟิล์มแบ่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

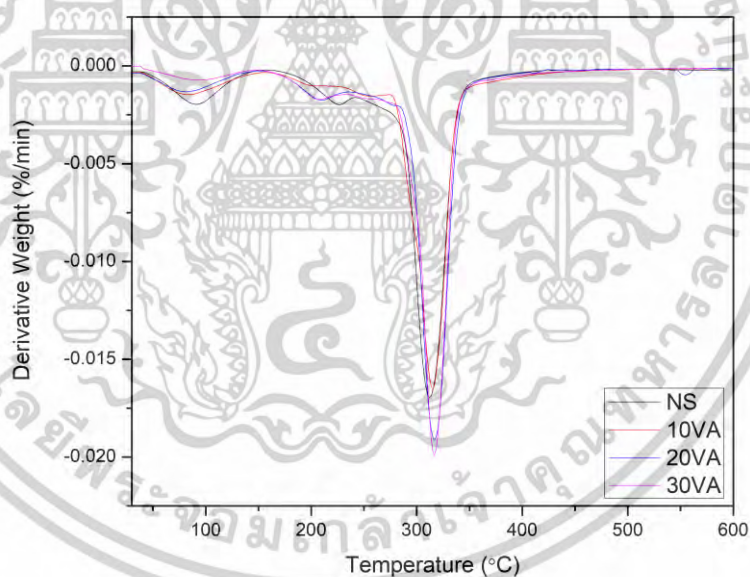
## 4.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

### 4.9.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแบ่ง โดยแสดงผลการทดสอบดังนี้



(ก)



(ข)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.19** อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) |                          |                     | น้ำหนักที่หายไป<br>ที่ 600 °C<br>(%) |
|------|---------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|
|      | ขั้นที่ 1<br>(น้ำ)        | ขั้นที่ 2<br>(กลีเซอรอล) | ขั้นที่ 3<br>(แป้ง) |                                      |
| NS   | 81.33                     | 207.50                   | 317.17              | 90.85                                |
| 10VA | 82.67                     | 197.67                   | 315.17              | 84.29                                |
| 20VA | 75.50                     | 198.83                   | 312.67              | 83.26                                |
| 30VA | 80.17                     | 202.33                   | 306.17              | 85.52                                |

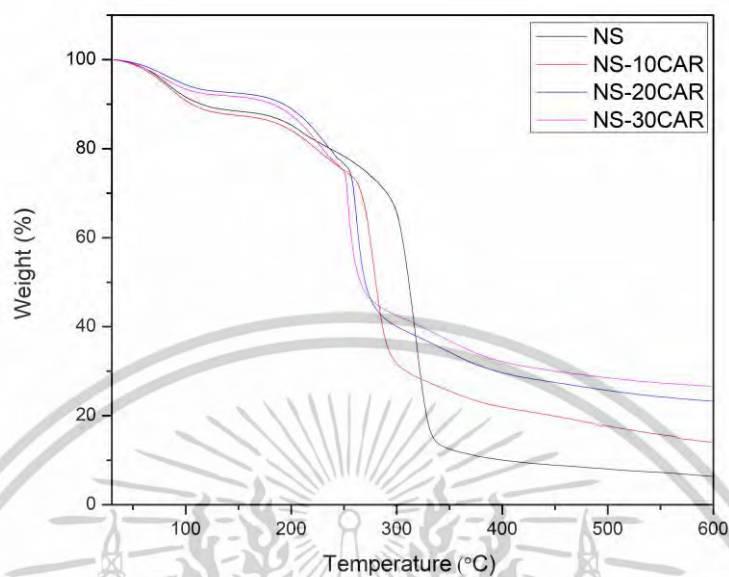
จากรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแป้งทุกสูตรสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวได้ทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงอุณหภูมิการระเหยของโมเลกุลน้ำในช่วง 75-81 °C ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 197-207 °C และช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในช่วง 306-317 °C [36] ดังตารางที่ 4.16 ซึ่งฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทมีแนวโน้มของอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลงตามปริมาณของไวโนลอะซิเตทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงด้วยกระบวนการอะซิไทเลชันจะส่งผลต่อความเป็นผลึกของแป้ง คือ ความเป็นอสัณฐานของแป้งเพิ่มขึ้นจากการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ด้วยหมู่อะซิทิล (-COCH<sub>3</sub>) ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย ซึ่งความเป็นผลึกของแป้งที่ลดลงนั้นสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งลดลงจากการใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างลดลง [51]

#### 4.9.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแข็งผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

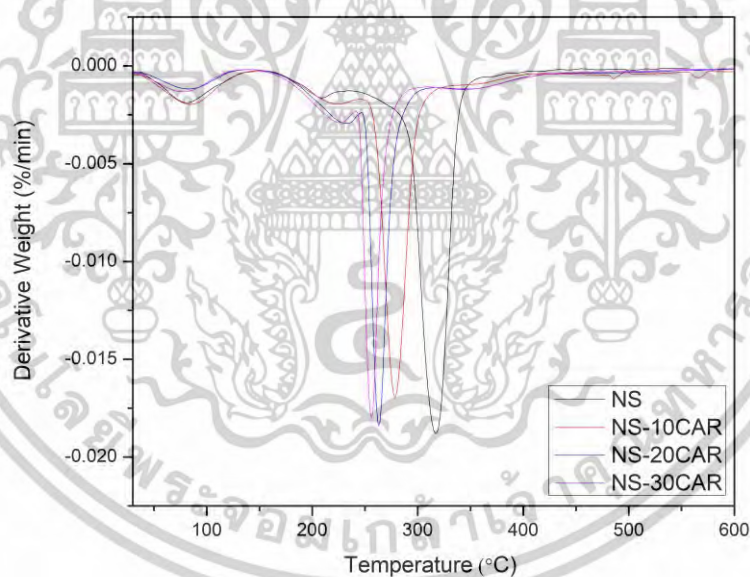
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็ง มาผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิในการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | อุณหภูมิในการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) |                          |                                      | น้ำหนักที่หายไป<br>ที่ $600^{\circ}\text{C}$<br>(%) |
|------------|---------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|            | ขั้นที่ 1<br>(น้ำ)                          | ขั้นที่ 2<br>(กลีเซอรอล) | ขั้นที่ 3<br>(แข็ง + แคปพาคาราจีแนน) |                                                     |
| NS         | 81.33                                       | 207.50                   | 317.17                               | 90.85                                               |
| NS-10CAR   | 85.33                                       | 217.17                   | 278.50                               | 78.66                                               |
| NS-20CAR   | 85.00                                       | 227.17                   | 263.17                               | 70.88                                               |
| NS-30CAR   | 78.67                                       | 221.67                   | 256.17                               | 69.09                                               |
| 30VA       | 80.17                                       | 202.33                   | 306.17                               | 85.52                                               |
| 30VA-10CAR | 77.50                                       | 210.67                   | 278.17                               | 78.21                                               |
| 30VA-20CAR | 94.83                                       | 228.17                   | 264.83                               | 71.71                                               |
| 30VA-30CAR | 87.33                                       | 221.83                   | 256.00                               | 66.62                                               |



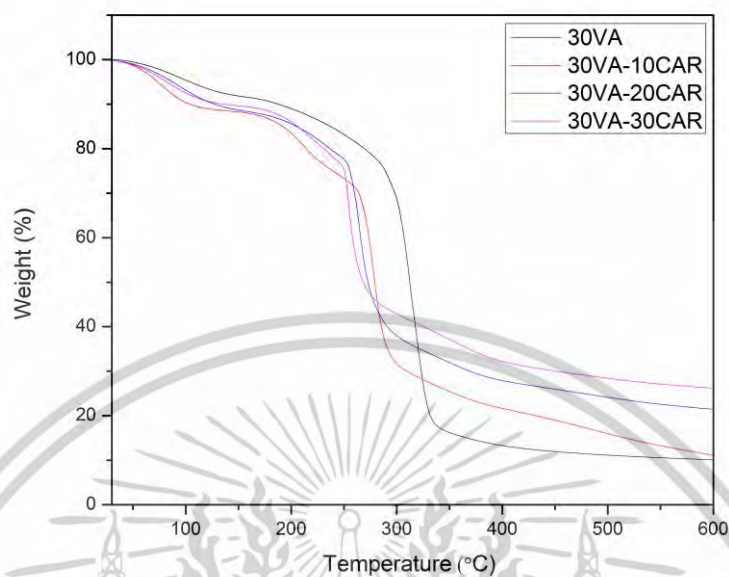
(ก)



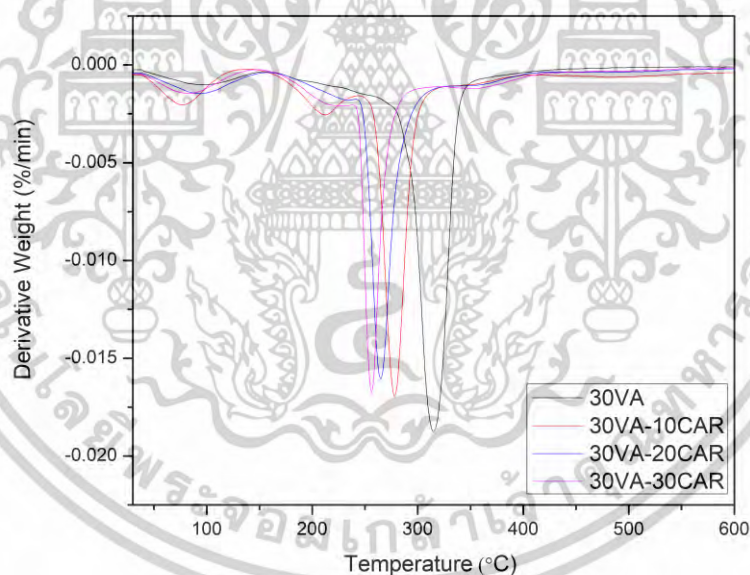
(ข)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

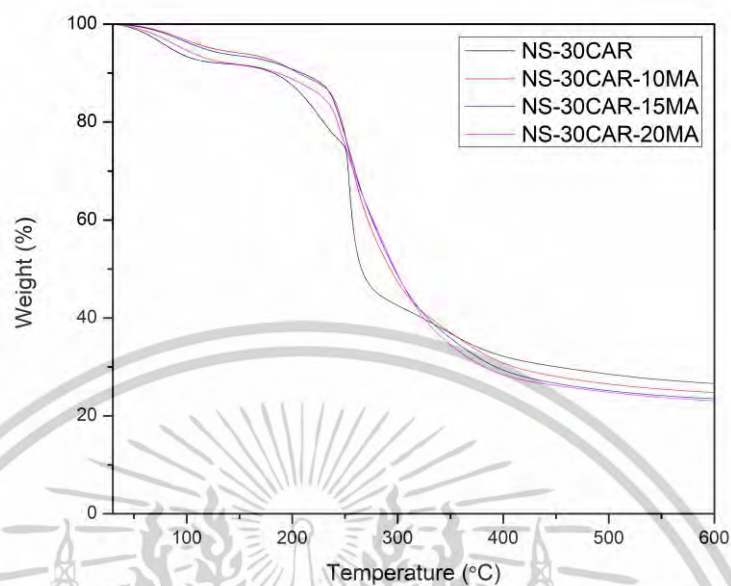
รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาคาร์บอนที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

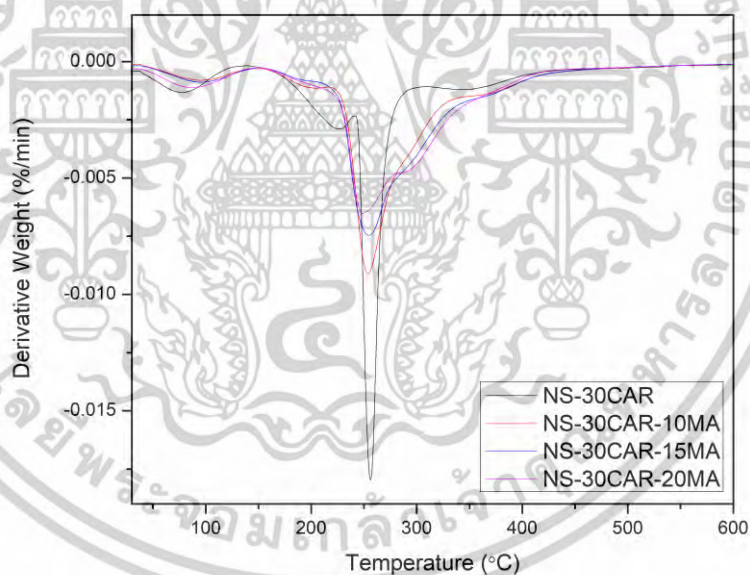
จากรูปที่ 4.25-4.26 และตารางที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนนที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแข็งทุกสูตรสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวได้ทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงอุณหภูมิการระเหยของโมเลกุลน้ำในช่วง 77-95 °C ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 202-228 °C และช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแข็งและแคปทาคาราจีแนนที่ซ้อนทับกันในช่วง 256-317 °C ดังตารางที่ 4.17 ซึ่งฟิล์มแคปทาคาราจีแนนมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 210 °C [57] โดยฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่มีแนวโน้มของอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลงตามปริมาณของแคปทาคาราจีแนนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ไม่ได้ผสมแคปทาคาราจีแนน โดยฟิล์มแข็งสูตร NS-30CAR และ 30VA-30CAR มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำสุด เนื่องจากฟิล์มทั้งสองสูตรมีปริมาณแคปทาคาราจีแนนสูงที่สุด ซึ่งแคปทาคาราจีแนนมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าแข็ง [53] จากความเป็นอิสระฐาน แต่ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่ 600 °C มีค่าแนวโน้มที่ลดลงแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของฟิล์มแข็งจากพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของแข็งช่วยให้เสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น [57] ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มแข็งสูตร 30VA-CAR มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มแข็งสูตร NS-CAR เล็กน้อย เนื่องจากผลของปริมาณผลึกดังตารางที่ 4.5 โดยฟิล์มแข็งสูตร NS-CAR มีปริมาณผลึกที่มากกว่าฟิล์มแข็งสูตร 30VA-CAR จึงสามารถทนทานต่อความร้อนได้ดีกว่า

#### 4.9.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแบ่งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็ง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ไม่ผ่านการดัดแปรและฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบ่ง มาผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้



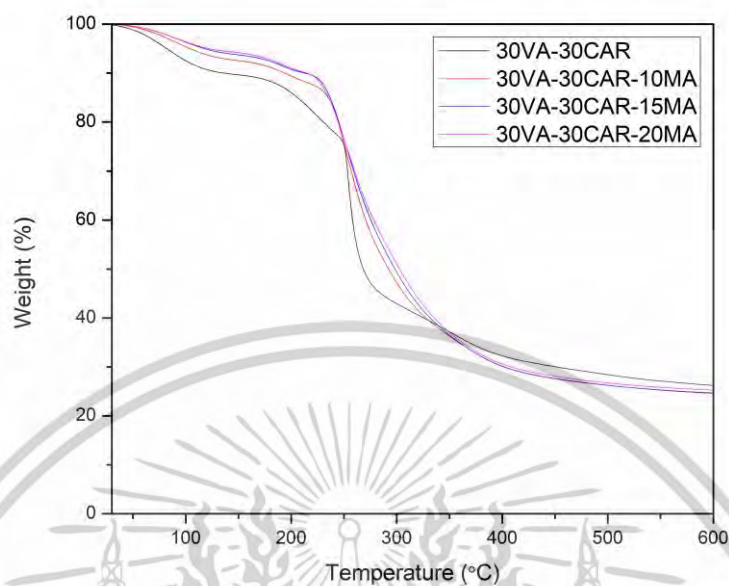
(ก)



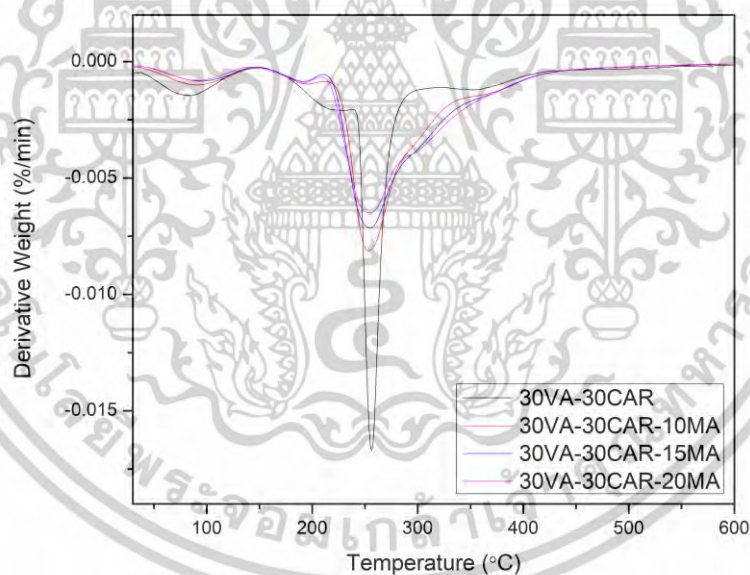
(ข)

รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งน้ำมันสำหรับหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ผสมกับแคปซูลคาร์บอน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.21** อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปปาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | อุณหภูมิในการสลายตัว (°C) |                          |                                                    |                                                    | น้ำหนักที่หายไปที่ 600 °C (%) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
|                 | ขั้นที่ 1<br>(น้ำ)        | ขั้นที่ 2<br>(กลีเซอรอล) | ขั้นที่ 3<br>(แข็ง + แคปปาการาจีแนน + กรดแมนดีลิก) | ขั้นที่ 4<br>(แข็ง + แคปปาการาจีแนน + กรดแมนดีลิก) |                               |
| NS-30CAR        | 78.67                     | 221.67                   | 256.17                                             | -                                                  | 69.09                         |
| NS-30CAR-10MA   | 94.00                     | 194.33                   | 254.00                                             | -                                                  | 71.34                         |
| NS-30CAR-15MA   | 94.83                     | 187.17                   | 254.83                                             | -                                                  | 72.92                         |
| NS-30CAR-20MA   | 88.33                     | -                        | 250.67                                             | 293.17                                             | 73.89                         |
| 30VA-30CAR      | 87.33                     | 221.83                   | 256.00                                             | -                                                  | 66.62                         |
| 30VA-30CAR-10MA | 90.17                     | 191.67                   | 253.33                                             | -                                                  | 71.92                         |
| 30VA-30CAR-15MA | 93.83                     | 190.17                   | 255.17                                             | -                                                  | 71.94                         |
| 30VA-30CAR-20MA | 90.67                     | 189.50                   | 254.83                                             | -                                                  | 71.46                         |

จากรูปที่ 4.27-4.28 และตารางที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปปาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแข็งทุกสูตรสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวได้ทั้งหมด 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงอุณหภูมิการระเหยของโมเลกุลน้ำในช่วง 78-95 °C ช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 187-222 °C และช่วงที่ 3 และ 4 เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของแข็ง แคปปาการาจีแนน และกรดแมนดีลิกที่ซ้อนทับกันในช่วง 250-256 °C โดยฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ผสมแคปปาการาจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกมีแนวโน้มของอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลงเล็กน้อยตามปริมาณของกรดแมนดีลิกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมกรดแมนดีลิก เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของกรดแมนดีลิกสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของเมทริกซ์ได้ แต่โมเลกุลของกรดแมนดีลิกยังไปขัดขวางความเป็นผลึกของสายโซ่ของแข็งและไปลดพันธะไฮโดรเจนและ

แรงดึงดูดระหว่างประจุระหว่างแป้ง-แคปพาคาราจีแนนและแคปพาคาราจีแนน-แคปพาคาราจีแนนอีกด้วย อีกทั้งกรดแมนดีลิกสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ ทำให้สายโซ่แป้งและคาราจีแนนสั้นลง และการเพิ่มปริมาณของกรดแมนดีลิกที่เติมลงในฟิล์มแป้งยังส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แป้งและแคปพาคาราจีแนนนั้นลดลงด้วย ส่งผลให้สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนได้ง่ายขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการสลายตัวของฟิล์มแป้งสูตร NS-30CAR-MA และ 30VA-30CAR-MA พบว่าฟิล์มแป้งแสดงคุณสมบัติการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณผลึกดังตารางที่ 4.6 ที่แสดงปริมาณผลึกของฟิล์มแป้ง NS-30CAR-MA และ 30VA-30CAR-MA ที่ใกล้เคียงกัน

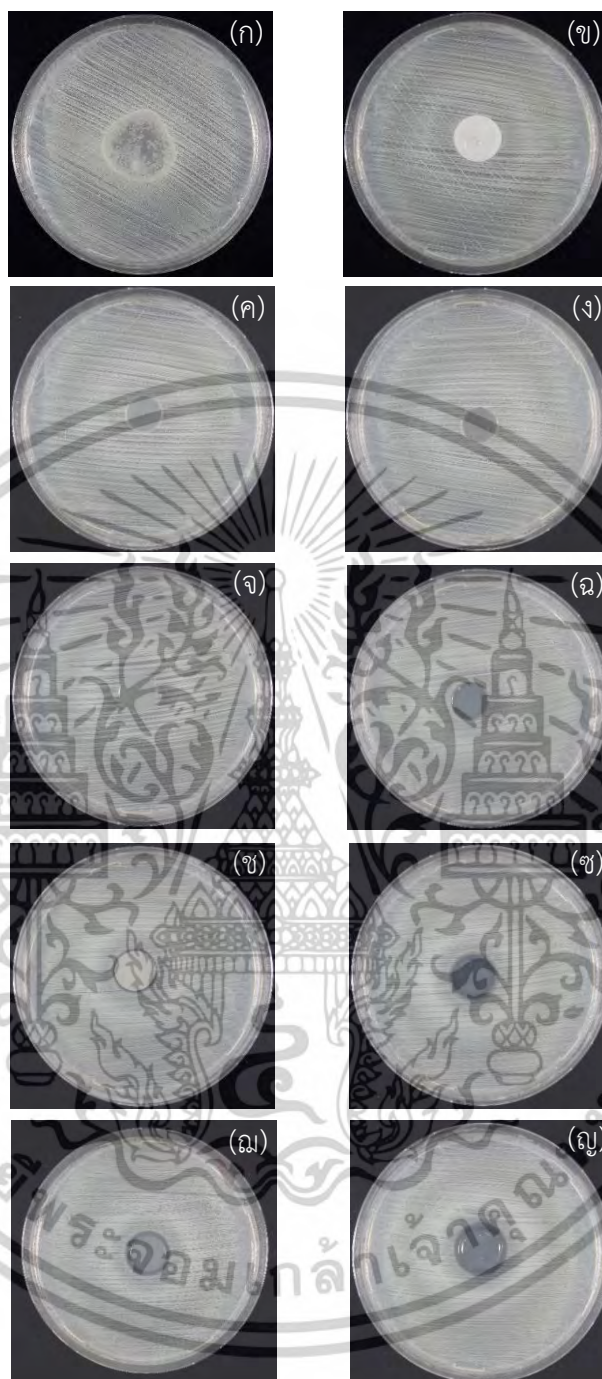
#### 4.10 สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบด้วยวิธี Agar diffusion เพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*Staphylococcus aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*Escherichia coli*) แสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.22 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแข็งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

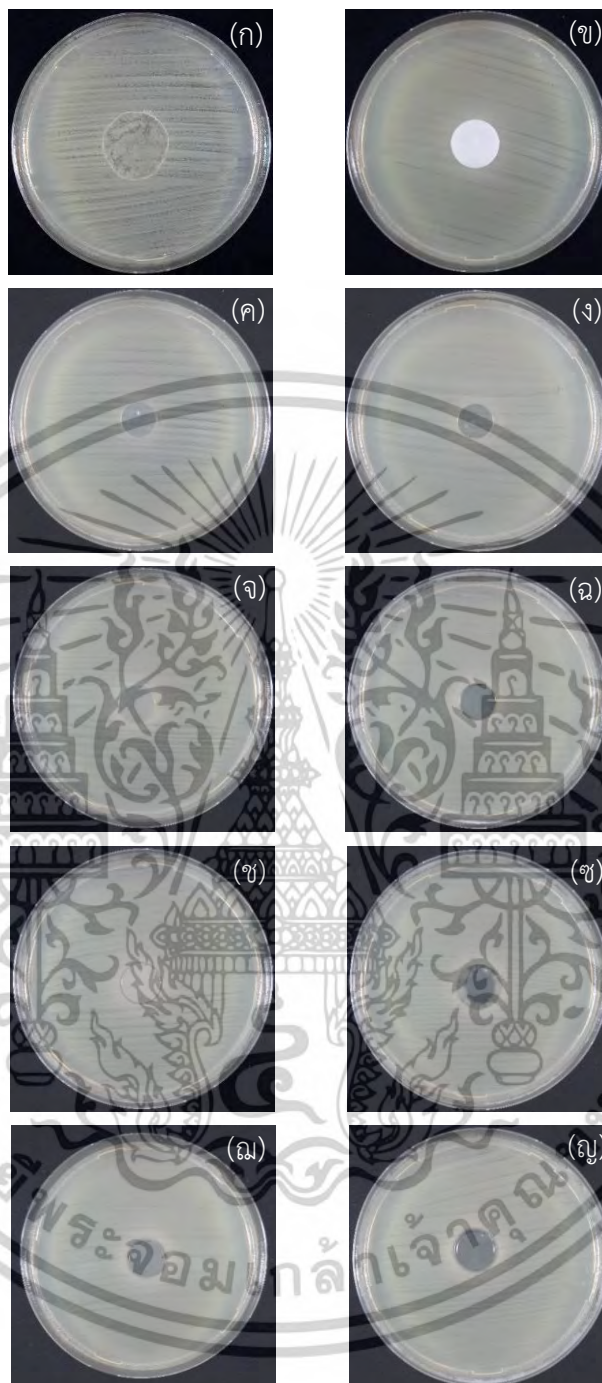
| สูตร            | บริเวณการต้านทานเชื้อ (มิลลิเมตร) |                | การต้านทานเชื้อ |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
|                 | <i>S. aureus</i>                  | <i>E. coli</i> |                 |
| NS              | -                                 | -              | Inactive        |
| NS-30CAR        | -                                 | -              | Inactive        |
| NS-30CAR-10MA   | -                                 | -              | Inactive        |
| NS-30CAR-15MA   | 16.15                             | -              | Active          |
| NS-30CAR-20MA   | 17.70                             | 14.59          | Active          |
| 30VA            | -                                 | -              | Inactive        |
| 30VA-30CAR      | -                                 | -              | Inactive        |
| 30VA-30CAR-10MA | -                                 | -              | Inactive        |
| 30VA-30CAR-15MA | 15.74                             | -              | Active          |
| 30VA-30CAR-20MA | 24.06                             | 18.22          | Active          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.29** ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของกรดแมนดีลิกต่อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* โดย (ก) NS (ข) 30VA (ค) NS-30CAR (ง) 30VA-30CAR (จ) NS-30CAR-10MA (ฉ) 30VA-30CAR-10MA (ช) NS-30CAR-15MA (ซ) 30VA-30CAR-15MA (ณ) NS-30CAR-20MA และ (ญ) 30VA-30CAR-20MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของกรดแมนดีลิกต่อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* โดย (ก) NS (ข) 30VA (ค) NS-30CAR (ง) 30VA-30CAR (จ) NS-30CAR-10MA (ฉ) 30VA-30CAR-10MA (ช) NS-30CAR-15MA (ฌ) 30VA-30CAR-15MA (ฉ) NS-30CAR-20MA และ (ญ) 30VA-30CAR-20MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29-4.30 และตารางที่ 4.22 แสดงระยะการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์ม  
 แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดย  
 น้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า  
 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดย  
 น้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 30% โดยน้ำหนักที่ไม่เติมกรดแมนดีลิกไม่พบการต้านทานเชื้อ  
 แบคทีเรียทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ เมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแป้งมัน  
 สำปะหลังพบว่าฟิล์มแป้งสูตร NS-30CAR-15MA และ 30VA-30CAR-15MA สามารถต้านทานเชื้อ  
 แบคทีเรียได้เฉพาะเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และฟิล์มแป้งสูตร NS-30CAR-20MA และ  
 30VA-30CAR-20MA สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และเชื้อ  
 แบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) โดยประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อ  
 ปริมาณกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น

กรดแมนดีลิกนั้นมีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก  
 (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) เนื่องจากกรดแมนดีลิกสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีน  
 และเอนไซม์ของเชื้อแบคทีเรีย โดยการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้สารภายในเซลล์ไหลออกสู่ภายนอก  
 เซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย และในขณะเดียวกันกรดแมนดีลิกสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของ  
 การแลกเปลี่ยนสารผ่านเนื้อเยื่อระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์และเยื่อหุ้มออร์แกเนลล์ของเชื้อแบคทีเรีย ทำให้เกิด  
 การสูญเสียพลังงานของเซลล์และเชื้อแบคทีเรียจะตายลง [58, 59]

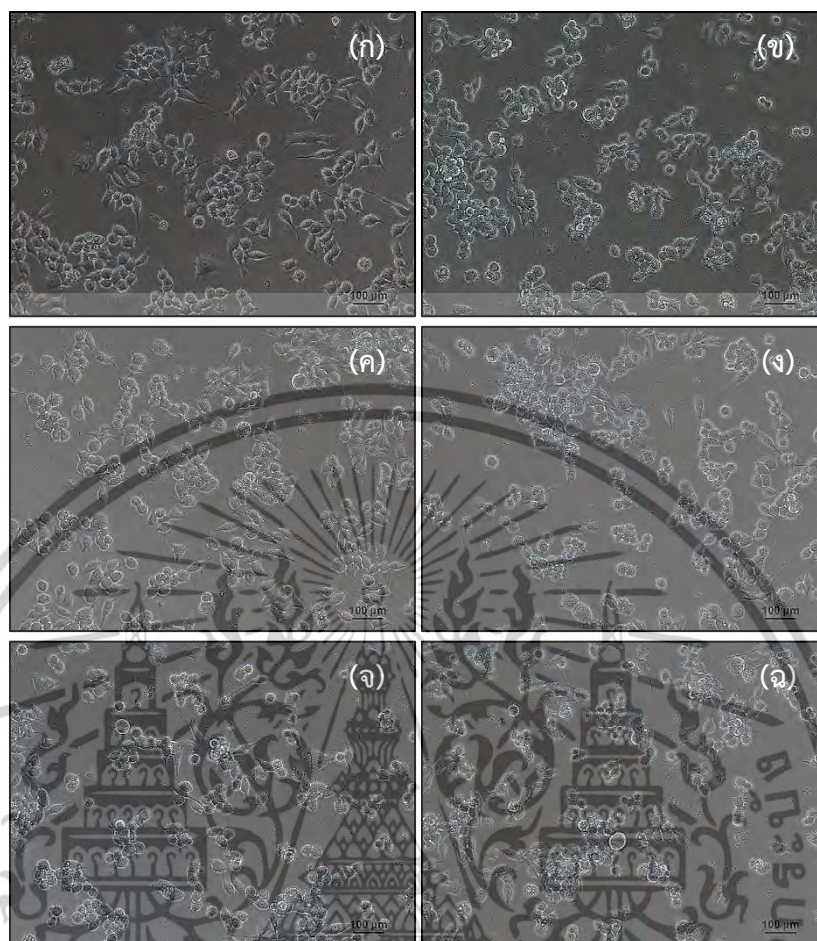
นอกจากนี้กรดแมนดีลิกยังมีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกมากกว่าเชื้อ  
 แบคทีเรียแกรมลบ เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียแกรมลบอ่อนไหวต่อการต้านทานเชื้อแบคทีเรียน้อยกว่าเชื้อ  
 แบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมีผนังเซลล์สองชั้นที่ซับซ้อนและโพลีแซ็กคาไรด์ที่ยับยั้งการ  
 แทรกซึมของสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ในทางตรงกันข้ามเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์หนาเพียง  
 หนึ่งชั้นคือเปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่า จึงส่งผลให้สารต้านทานเชื้อ  
 แบคทีเรียแพร่กระจายผ่านเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการทำลายของเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย  
 เซลล์ของเชื้อแบคทีเรียจึงตายลง [60]

#### 4.11 ความเป็นพิษต่อเซลล์

การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบด้วยวิธี MTT assay โดยใช้เซลล์ Keratinocytes (HaCat) ของมนุษย์ ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ HaCat ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร            | Cytotoxicity (%) | Cell viability (%) |
|-----------------|------------------|--------------------|
| Control         | 5.52             | 94.45              |
| 30VA            | 12.65            | 87.35              |
| 30VA-30CAR      | 3.33             | 96.67              |
| 30VA-30CAR-10MA | 14.51            | 85.49              |
| 30VA-30CAR-15MA | 17.63            | 82.37              |
| 30VA-30CAR-20MA | 19.86            | 80.14              |



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายการเจริญของเซลล์ HaCat หลังทดสอบกับตัวอย่างของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ โดย (ก) Control (ข) 3VA (ค) 30VA-30CAR (ง) 30VA-30CAR-10MA (จ) 30VA-30CAR-15MA (ฉ) 30VA-30CAR-20MA

การวิเคราะห์ผลความเป็นพิษต่อเซลล์เป็นการวัดความสามารถของเอนไซม์ในไมโทคอนเดรีย (Mitochondria enzyme) ที่เปลี่ยนสารละลาย MTT จากสีเหลืองเป็นสีม่วง โดยวัดค่า Optical density (OD) ด้วยเครื่อง Absorbance Microplate Reader ที่ความยาวคลื่น 570 nm ถ้าเซลล์มีชีวิตและสามารถเพิ่มจำนวนได้ตามปกติ ค่า OD จะสูง จากนั้นนำค่า OD จากตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับค่า OD ของชุดควบคุม (Control) เพื่อคำนวณหาความเป็นพิษต่อเซลล์ตามมาตรฐาน ISO 10993-5 ระบุว่าถ้าเซลล์มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต (Cell viability) สูงกว่า 80% แสดงว่าชิ้นงานที่ทดสอบไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตระหว่าง 60 ถึง 80% แสดงว่าชิ้นงานที่ทดสอบมีความเป็นพิษต่อเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อย เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตระหว่าง 40 ถึง 60% แสดงว่าชิ้นงานที่ทดสอบมีความเป็นพิษต่อเซลล์ปานกลาง และเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตต่ำกว่า 40 แสดงว่าชิ้นงานที่ทดสอบมีความเป็นพิษต่อเซลล์อย่างรุนแรง [61]

จากตารางที่ 4.23 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ HaCat ของฟิล์มแบงก์น้ำมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแบงก์ที่ผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มแบงก์สูตรทุกสูตรไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ เซลล์ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งมีอัตราการเติบโตมากกว่า 80% ตามมาตรฐาน ISO 10993-5 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.40 ที่แสดงถึงเซลล์ที่ยังสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้ แสดงว่าสารละลายตัวอย่างฟิล์มแบงก์ไม่มีสารประกอบที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ จึงไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ HaCat



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแผ่นปิดแผลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักแป้ง นำมาผสมกับแคปทาคราจีแนนที่ปริมาณ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งหลังจากการทำการทดสอบสมบัติและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาหาจำนวนหมู่อะซิทิลและองค์การแทนที่ (DS) ของแป้งอะซิทิลเลท พบว่าแป้งสูตร 10VA 20VA และ 30VA มีจำนวนเปอร์เซ็นต์หมู่อะซิทิลอยู่ที่ 0.90 1.40 และ 2.12 ตามลำดับ และองค์การแทนที่ (DS) อยู่ที่ 0.03 0.05 และ 0.08 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณไวนิลอะซิเตทนั้น ทำให้มีจำนวนหมู่อะซิทิลที่เข้าไปแทนที่อะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของแป้งเพิ่มมากขึ้น

2. จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อปรับปรุงแป้งมันสำปะหลังด้วยไวนิลอะซิเตทมีพิกัดใหม่ที่น่าสนใจ  $1724\text{ cm}^{-1}$  และ  $1242\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C=O stretching และ C-O stretching ของหมู่อะซิทิล ตามลำดับ และเมื่อผสมแคปทาคราจีแนนพบพิกัดที่แสดงเอกลักษณ์ของแคปทาคราจีแนน ได้แก่ พิกัดที่น่าสนใจ  $1242\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O=S=O stretching ของหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ (Ester sulfate group) พิกัดที่น่าสนใจ  $923\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของ 3,6-แอนไฮโดรกาแลคโทส (3,6-Anhydrogalactose) และพิกัดที่น่าสนใจ  $846\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-S stretching ของกาแลคโทส-4-ซัลเฟต (Galactose-4-sulfate) และพบว่าเลขคลื่นเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงในช่วงการสั่นของ O-H stretching จากพิกัดที่  $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ นอกจากนี้เมื่อเติมกรดแมนดีลิกพบเลขคลื่นของพิกัดการสั่นแบบ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$  เคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงและความเข้มของสัญญาณพิกัดลดลง อีกทั้งพิกัดการสั่นของ C=O stretching ที่ตำแหน่ง  $1724\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของโมเลกุลทั้งแป้งอะซิทิลเลทและกรดแมนดีลิกมีความเข้มของสัญญาณพิกัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วย ไวนิลอะซิเตททุกสูตรแสดงปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร อีกทั้งพบว่าการเติมแคปทาการจีแนนส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของแคปทาการจีแนนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมกรดแมนดีลิกยังส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน และเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังแสดงค่าปริมาณผลึกที่ไม่แตกต่างกัน

4. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทแสดงภาพตัดขวางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีพื้นผิวขรุขระลดลง เมื่อผสมกับแคปทาการจีแนน พบว่าสูตรฟิล์ม NS-CAR และ 30VA-CAR แสดงภาพตัดขวางมีลักษณะพื้นผิวเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน จากการเติมกรดแมนดีลิกพบว่าฟิล์มสูตร NS-30CAR-MA แสดงภาพตัดขวางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์มสูตร 30VA-30CAR-MA แสดงภาพตัดขวางมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเพิ่มขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดแมนดีลิกสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้ง 30VA ดีกว่า NS

5. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทแสดงค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสลดลง และมีเปอร์เซ็นต์ดัดยืดยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อผสมแคปทาการจีแนนส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ดัดยืดยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณของแคปทาการจีแนนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเติมกรดแมนดีลิกพบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลง และมีเปอร์เซ็นต์ดัดยืดยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นกันตามปริมาณของกรดแมนดีลิกที่เพิ่มขึ้น

6. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น การบวมตัว และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวนิลอะซิเตทและฟิล์มแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน ส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้น การบวมตัว และอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคปทาการจีแนน ส่วนการเติมกรดแมนดีลิกส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้น การบวมตัว และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังลดลง และเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้นฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดแสดงค่าแนวโน้มของการดูดซับความชื้นและการบวมตัวที่ตรงข้ามกัน โดยฟิล์ม NS-30CAR-MA แสดงแนวโน้มของค่าลดลง ส่วนฟิล์ม 30VA-30CAR-MA แสดงแนวโน้มของค่าเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราการซึมผ่าน

ไอน้ำของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังทั้งสองชนิดแสดงค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณของกรดแมนดีลิกเพิ่มขึ้น

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วย ไวนิลอะซิเตทและฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ผสมกับแคปทาการจีแนแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของผลึกที่ลดลง เนื่องจากการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วย หมู่อะซิทิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนลดลงและความเป็นอสัณฐานของแคปทาการจีแน และเมื่อปริมาณของแคปทาการจีแนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลง แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่ 600 °C ที่มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเติมกรดแมนดีลิกส่งผลให้ทั้งอุณหภูมิการสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของกรดแมนดีลิกที่เพิ่มขึ้น

8. จากการศึกษาสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธี Agar diffusion method พบว่าฟิล์มแข็งสูตร NS และฟิล์มแข็งสูตร 30VA ที่ผสมกับแคปทาการจีแน 30% โดยน้ำหนักที่ไม่เติมกรดแมนดีลิกไม่พบการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ เมื่อเติมกรดแมนดีลิกในฟิล์มแข็งมันสำปะหลังพบว่าฟิล์มแข็งสูตร NS-30CAR-15MA และ 30VA-30CAR-15MA สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้เฉพาะเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) แต่ฟิล์มแข็งสูตร NS-30CAR-20MA และ 30VA-30CAR-20MA สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*)

9. จากการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ HaCat พบว่าฟิล์มแข็งสูตรทุกสูตรไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ เซลล์ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดี แสดงว่าสารละลายตัวอย่างฟิล์มแข็งไม่มีสารประกอบที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ จึงไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ HaCat โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต (Cell viability) สูงกว่า 80% ซึ่งแสดงถึงการไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์

จากการทำการทดสอบสมบัติและวิเคราะห์สมบัติทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า ฟิล์มแข็งมันสำปะหลังสูตร 30VA-30CAR-20MA แสดงสมบัติที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติดังนี้ คือ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น การบวมตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำ และสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยและศึกษาสมบัติของฟิล์มแผ่นปิดบาดแผลจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยไวโนลอะซิเตท แคปทาการจีแนน และเติมกรดแมนดีลิกเป็นสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียสามารถนำไปปรับปรุงหรือพัฒนาให้ดีขึ้น ดังนี้

1. ศึกษาการนำสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่นมาใช้ร่วมกับกรดแมนดีลิก เช่น กรดกลลิก กรดไกลโคลิก เพื่อลดปริมาณการใช้กรดแมนดีลิกที่มากเกินไปจนกระทบต่อสมบัติอื่น นอกจากนี้การใช้สารต้านทานเชื้อแบคทีเรียหลายชนิดอาจส่งเสริมให้มีสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น
2. ศึกษาการนำพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เช่น ไคโตซาน แอลจีเนต กลูโคแมนแนน เป็นต้น มาใช้ร่วมกับแคปทาการจีแนน เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่แข็งเปราะจากการปรับปรุงด้วยแคปทาการจีแนนอย่างเดียว
3. ศึกษาการนำฟิล์มแผ่นปิดบาดแผลจากแป้งมันสำปะหลังนี้ไปพัฒนาต่อเป็นฟิล์มแผ่นปิดบาดแผลที่สามารถปลดปล่อยยาได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rashdan, H.R.M. and El-Naggar, M.E. 2023. "Traditional and modern wound dressings—characteristics of ideal wound dressings." 21-41. in Raju, K. and Sorna, G. **Antimicrobial Dressings**. Massachusetts : Academic Press.
- [2] Savencu, I., Iurian, S., Porfire, A., Bogdan, C. and Tomuță, I. 2021. "Review of Advances in Polymeric Wound Dressing Films." *Reactive and Functional Polymers*. 168 : 105059.
- [3] Wang, C., Lu, Y., Li, Z., An, X., Gao, Z. and Tian, S. 2022. "Preparation and Performance Characterization of a Composite Film Based on Corn Starch, K-Carrageenan, and Ethanol Extract of Onion Skin." *Polymers*. 14(15) : 2986.
- [4] Chuayjuljit, S., Hosililak, S. and Athisart, A. 2009. "Thermoplastic Cassava Starch /Sorbitol-Modified Montmorillonite Nanocomposites Blended with Low Density Polyethylene: Properties and Biodegradability Study." *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 19(1).
- [5] Colussi, R., El Halal, S.L.M., Pinto, V.Z., Bartz, J., Gutkoski, L.C., da Rosa Zavareze, E. and Dias, A.R.G. 2015. "Acetylation of Rice Starch in an Aqueous Medium for Use in Food." *LWT - Food Science and Technology*. 62(2) : 1076-1082.
- [6] Han, F., Liu, M., Gong, H., Lü, S., Ni, B. and Zhang, B. 2012. "Synthesis, Characterization and Functional Properties of Low Substituted Acetylated Corn Starch." *International Journal of Biological Macromolecules*. 50(4) : 1026-1034.
- [7] Ayucitra, A. 2012. "Preparation and characterisation of acetylated corn starches." *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 3(3) : 156.
- [8] Wani, I.A., Sogi, D.S. and Gill, B.S. 2015. "Physico-Chemical Properties of Acetylated Starches from Indian Black Gram (*Phaseolus Mungo* L.) Cultivars." *Journal of food science and technology*. 52 : 4078-4089.
- [9] Mehboob, S., Ali, T.M., Sheikh, M. and Hasnain, A. 2020. "Effects of Cross Linking and/or Acetylation on Sorghum Starch and Film Characteristics." *International journal of biological macromolecules*. 155 : 786-794.

- [10] Sonawane, R.O. and Patil, S.D. 2017. "Gelatin-K-Carrageenan Polyelectrolyte Complex Hydrogel Compositions for the Design and Development of Extended-Release Pellets." *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 66(16) : 812-823.
- [11] Abdou, E. and Sorour, M. 2014. "Preparation and Characterization of Starch/Carrageenan Edible Films." *International Food Research Journal*. 21(1) : 189 - 193.
- [12] Zhou, Y., Chen, F.-Q., Chen, S., Xiao, Q., Weng, H.-F., Yang, Q.-M. and Xiao, A.-F. 2021. "Preparation and Characterization of K-Carrageenan Modified with Maleic Anhydride and Its Application in Films." *Marine Drugs*. 19(9) : 486.
- [13] Flores, A.C., Punzalan, E.R. and Ambangan, N.G. 2015. "Effects of Kappa-Carrageenan on the Physico-Chemical Properties of Thermoplastic Starch." *Kimika*. 26(1) : 10-16.
- [14] Rhim, J.W. 2012. "Physical-Mechanical Properties of Agar/K-Carrageenan Blend Film and Derived Clay Nanocomposite Film." *Journal of Food Science*. 77(12) : 66-73.
- [15] de Lima Barizão, C., Crepaldi, M.I., Oscar de Oliveira, S., de Oliveira, A.C., Martins, A.F., Garcia, P.S. and Bonafé, E.G. 2020. "Biodegradable Films Based on Commercial κ-Carrageenan and Cassava Starch to Achieve Low Production Costs." *International Journal of Biological Macromolecules*. 165 : 582-590.
- [16] Tungmunnithum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A. and Yangsabai, A. 2018. "Flavonoids and Other Phenolic Compounds from Medicinal Plants for Pharmaceutical and Medical Aspects: An Overview." *Medicines*. 5(3) : 93.
- [17] Zavyalova, O., Gajewska, S., Dąbrowska-Wisłocka, D. and Sionkowska, A., 2021. "Characteristics of Physicochemical and Rheological Properties of Chitosan Hydrogels Based on Selected Hydroxy Acids." *Engineering of Biomaterials*. 24(161).
- [18] Kumar, R. and Rani, P. 2018. "Mandelic Acid Incorporated Antimicrobial Soy Protein Film Fabricated by Solution Casting." 13-19. in Gupta, B., Ghosh, A., Suzuki, A. and Rattan, S. **Advances in Polymer Sciences and Technology**. Singapore : Springer.

- [19] Kumar, R., Anandjiwala, R.D. and Kumar, A. 2015. "Thermal and Mechanical Properties of Mandelic Acid-Incorporated Soy Protein Films." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 123(2) : 1273-1279.
- [20] Motamedifar, M., Bazargani, A., Namazi, M.R., Sarai, E. and Sedigh, H. 2014. "Antimicrobial Activity of Mandelic Acid Against Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus: A Novel Finding with Important Practical Implications." *World Applied Sciences Journal*. 31(5) : 925-929.
- [21] Wongchindaphan, S. and Rojhirunsakool, S. 2017. "Wound Dressings in Dermatology." *Thai Journal of Dermatology*. 33(2) : 135-152.
- [22] Winaikosol, K. 2013. "Advanced Wound Dressing." *Srinagarind Medical Journal*. 28 : 18-23.
- [23] วรณฤดี ภูทอง. 2565. "สิ่งที่พยาบาลต้องเรียนรู้ก่อนการดูแลบาดแผล: อาวุธไม่ลับที่ต้องรู้." *วารสารพยาบาลสภาวิชาชีพไทย*. 15(2) : 41-54.
- [24] สุทธิณี สีสังข์. 2563. "คุณสมบัติของแป้งที่มีผลต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์สตรว์น้ำ." *กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง*. 1-7.
- [25] หทัยชนก นพจรุญศรี. 2554. "ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแคปซูลคาราจีแนนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมนม." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.
- [26] สุนันทา ทองทา และ ธนาวิทย์ กุศลรัตนรักษ์. 2559. *รายงานการวิจัยการผลิตสตรว์ชชีเครททนนย้อยต่อเอนไซม์*. [Online]. Available : <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/6212>.
- [27] จินตภา เต็มสีคราม. 2559. "สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลกติก และกรดมาลิก." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [28] Raina, C.S., Singh, S., Bawa, A.S. and Saxena, D.C. 2006. "Some Characteristics of Acetylated, Cross-Linked and Dual Modified Indian Rice Starches." *European Food Research and Technology*. 223(4) : 561-570.
- [29] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2543. *มันสำปะหลัง*. [Online]. Available : <https://tapiocathai.org/C.html>.

- [30] Solventis. n.d. **Vinyl Acetate Monomer**. [Online]. Available : <https://solventis.net/products/others/vinyl-acetate-monomer/>.
- [31] กรุงเทพเคมี. 2562. **Carrageenan (Food additive) : แครร์ราจีแนน (วัตถุเจือปนอาหาร)**. [Online]. Available : [https://xn--12cgi8d9atj3mva5fc.com/index.php?route=product/product&product\\_id=961](https://xn--12cgi8d9atj3mva5fc.com/index.php?route=product/product&product_id=961).
- [32] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนปนนท์. ม.ป.ท. **Carrageenan / แครร์ราจีแนน**. [Online]. Available : <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1274/carrageenan-แครร์ราจีแนน>.
- [33] วาริรัตน์ หนูหิต. 2557. "การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวสัมผัสโดยใช้สารสกัดจากพืชตระกูลขิง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [34] Kalita, D., Kaushik, N. and Mahanta, C.L. 2014. "Physicochemical, Morphological, Thermal and IR Spectral Changes in the Properties of Waxy Rice Starch Modified with Vinyl Acetate." *Journal of food science and technology*. 51 : 2790-2796.
- [35] Das, A.B., Singh, G., Singh, S. and Riar, C.S. 2010. "Effect of Acetylation and Dual Modification on Physico-Chemical, Rheological and Morphological Characteristics of Sweet Potato (*Ipomoea Batatas*) Starch." *Carbohydrate Polymers*. 80(3) : 725-732.
- [36] Colussi, R., Pinto, V.Z., El Halal, S.L.M., Biduski, B., Prietto, L., Castilhos, D.D., Zavareze, E.D.R. and Dias, A.R.G. 2017. "Acetylated Rice Starches Films with Different Levels of Amylose: Mechanical, Water Vapor Barrier, Thermal, and Biodegradability Properties." *Food Chemistry*. 221 : 1614-1620.
- [37] Chi, H., Xu, K., Wu, X., Chen, Q., Xue, D., Song, C., Zhang, W. and Wang, P. 2008. "Effect of Acetylation on the Properties of Corn Starch." *Food Chemistry*. 106(3) : 923-928.
- [38] Abdillah, A.A. and Charles, A.L. 2021. "Characterization of a Natural Biodegradable Edible Film Obtained from Arrowroot Starch and Iota-Carrageenan and Application in Food Packaging." *International Journal of Biological Macromolecules*. 191 : 618-626.

- [39] Abdullah, A.H.D., Firdiana, B., Nissa, R.C., Satoto, R., Karina, M. and Fransiska, D. 2021. "Effect of  $\kappa$ -Carrageenan on Mechanical, Thermal and Biodegradable Properties of Starch–Carboxymethyl Cellulose (CMC) Bioplastic." *Cellulose Chemistry and Technology*. 55(9-10) : 1109-1117.
- [40] Kumar, R., Anandjiwala, R.D. and Kumar, A. 2016. "Thermal and Mechanical Properties of Mandelic Acid-Incorporated Soy Protein Films." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 123 : 1273-1279.
- [41] Fang, Y., Fu, J., Tao, C., Liu, P. and Cui, B. 2020. "Mechanical Properties and Antibacterial Activities of Novel Starch-Based Composite Films Incorporated with Salicylic Acid." *International journal of biological macromolecules*. 155 : 1350-1358.
- [42] Smith, R., Whistler, R. and Paschall, E. 1967. **Starch chemistry and technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Academic Press.
- [43] Abdullah, A.H.D., Chalimah, S., Primadona, I. and Hanantyo, M.H.G. 2018. "Physical and Chemical Properties of Corn, Cassava, and Potato Starches." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 160 : 012003.
- [44] Singh, N., Chawla, D. and Singh, J. 2004. "Influence of Acetic Anhydride on Physicochemical, Morphological and Thermal Properties of Corn and Potato Starch." *Food Chemistry*. 86(4) : 601-608.
- [45] de Souza Silva, G.M., de Carvalho Batista Muniz, I., Veloso, C.M., Santos, L.S., de Melo Neto, B.A. and Bonomo, R.C.F. 2021. "Chemical, Morphological, Thermal and Technological Properties of Acetylated White Inhambu Starch." *Journal of Polymers and the Environment*. 30(1) : 246-257.
- [46] Wang, R., Zhang, S., Liu, S., Sun, Y. and Xu, H. 2023. "A Contribution to Improve Barrier Properties and Reduce Swelling Ratio of  $\kappa$ -Carrageenan Film from the Incorporation of Guar Gum or Locust Bean Gum." *Polymers*. 15(7) : 1751.
- [47] Zhang, M., Yang, B., Yuan, Z., Sheng, Q., Jin, C., Qi, J., Yu, M., Liu, Y. and Xiong, G. 2023. "Preparation and Performance Testing of Corn Starch/Pullulan/Gallic Acid Multicomponent Composite Films for Active Food Packaging." *Food Chemistry: X*. 19 : 100782.

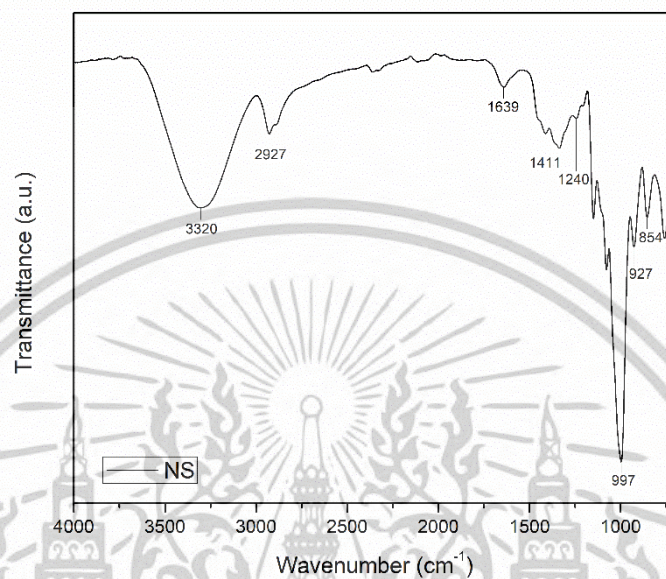
- [48] Fu, Y., Liu, X. and Zhao, S. 2022. "Mandelic Acid as an Interfacial Modifier for High Performance  $\text{NiO}_x$ -based Inverted Perovskite Solar Cells." *Chemistry of Nanomaterials for Energy, Biology and More*. 8(7) : e202200091.
- [49] Leon-Bejarano, M., Durmus, Y., Ovando-Martínez, M. and Simsek, S. 2020. "Physical, Barrier, Mechanical, and Biodegradability Properties of Modified Starch Films with Nut by-Products Extracts." *Foods*. 9(2) : 226.
- [50] Noivoil, N. and Yoksan, R. 2020. "Compatibility Improvement of Poly(Lactic Acid) /Thermoplastic Starch Blown Films Using Acetylated Starch." *Journal of Applied Polymer Science*. 138(2) : 49675.
- [51] Han, F., Liu, M., Gong, H., Lu, S., Ni, B. and Zhang, B. 2012. "Synthesis, Characterization and Functional Properties of Low Substituted Acetylated Corn Starch." *International journal of biological macromolecules*. 50(4) : 1026-1034.
- [52] Sindhu, R., Devi, A. and Khatkar, B.S. 2021. "Morphology, Structure and Functionality of Acetylated, Oxidized and Heat Moisture Treated Amaranth Starches." *Food Hydrocolloids*. 118 : 106800.
- [53] Hartiati, A., Harsojuwono, B.A., Suyanto, H. and Arnata, I.W. 2021. "Characteristics of Starch-Based Bioplastic Composites in the Ratio Variations of the Polysaccharide Mixture." *International Journal of Pharmaceutical Research*. 13(2).
- [54] Fitriani, L., Fadina, H., Usman, H. and Zaini, E. 2023. "Formation and Characterization of Multicomponent Crystal of Trimethoprim and Mandelic Acid by Solvent Drop Grinding Method." *International Journal of Applied Pharmaceutics*. 75-79.
- [55] Colivet, J. and Carvalho, R.A. 2017. "Hydrophilicity and Physicochemical Properties of Chemically Modified Cassava Starch Films." *Industrial Crops and Products*. 95 : 599-607.
- [56] Dawam Abdullah, A.H., Firdiana, B., Choerun Nissa, R., Satoto, R., Karina, M., Fransiska, D., Nurhayati, N., Agusman, A., Irianto, H.E., Priambudi, P., Marliah, S.R.I. and Ismadi, I. 2021. "Effect of K-Carrageenan on Mechanical, Thermal and Biodegradable Properties of Starch-Carboxymethyl Cellulose (CMC) Bioplastic." *Cellulose Chemistry and Technology*. 55(9-10) : 1109-1117.

- [57] de Lima Barizao, C., Crepaldi, M.I., Junior, O.O.S., de Oliveira, A.C., Martins, A.F., Garcia, P.S. and Bonafe, E.G. 2020. "Biodegradable films based on commercial kappa-carrageenan and cassava starch to achieve low production costs." *International journal of biological macromolecules*. 165(Pt A) : 582-590.
- [58] Fang, Y., Fu, J., Tao, C., Liu, P. and Cui, B. 2020. "Mechanical properties and antibacterial activities of novel starch-based composite films incorporated with salicylic acid. *International journal of biological macromolecules*. 155 : 1350-1358.
- [59] Hu, X., Yuan, L., Han, L., Li, S. and Song, L. 2019. "Characterization of Antioxidant and Antibacterial Gelatin Films Incorporated with Ginkgo Biloba Extract." *RSC advances*. 9(47) : 27449-27454.
- [60] Gutiérrez, T.J., Seligra, P.G., Jaramillo, C.M., Famá, L. and Goyanes, S. 2017. "Effect of Filler Properties on the Antioxidant Response of Thermoplastic Starch Composites." 337-370. in Thakur, V.K., Thakur, M.K. and Kessler, M.R. **Handbook of Composites from Renewable Materials, Structure and Chemistry**. New Jersey : Wiley.
- [61] Zepon, K.M., Martins, M.M., Marques, M.S., Heckler, J.M., Morisso, F.D.P., Moreira, M.G., Ziulkoski, A.L. and Kanis, L.A. 2019. "Smart Wound Dressing Based on  $\kappa$ -Carrageenan/Locust Bean Gum/Cranberry Extract for Monitoring Bacterial Infections." *Carbohydrate Polymers*. 206 : 362-370.

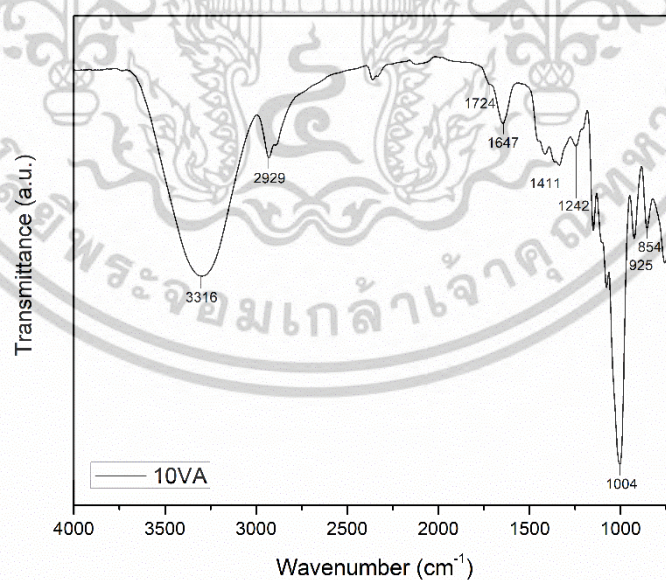


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

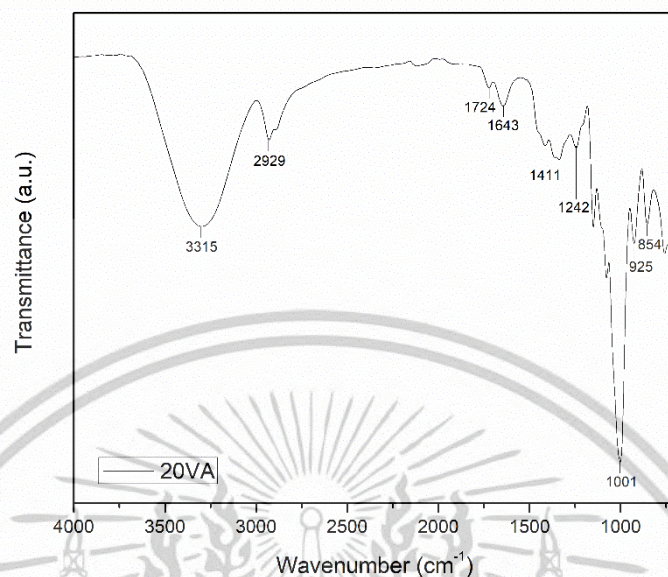


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป

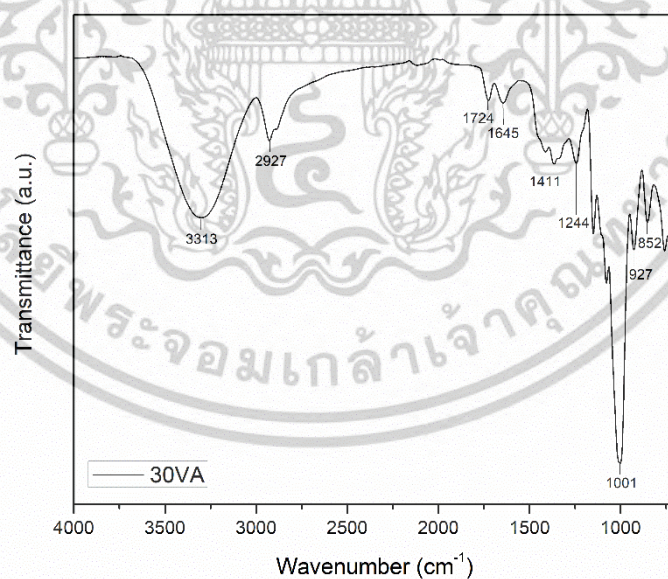


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

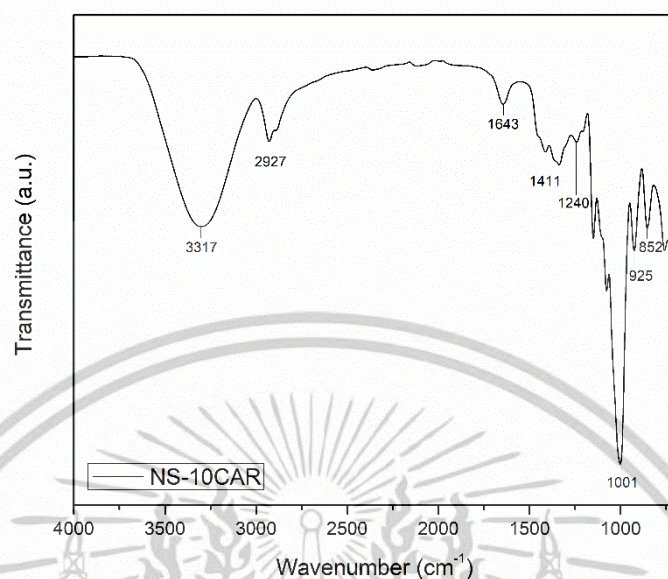


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 20% โดยน้ำหนัก แป้ง

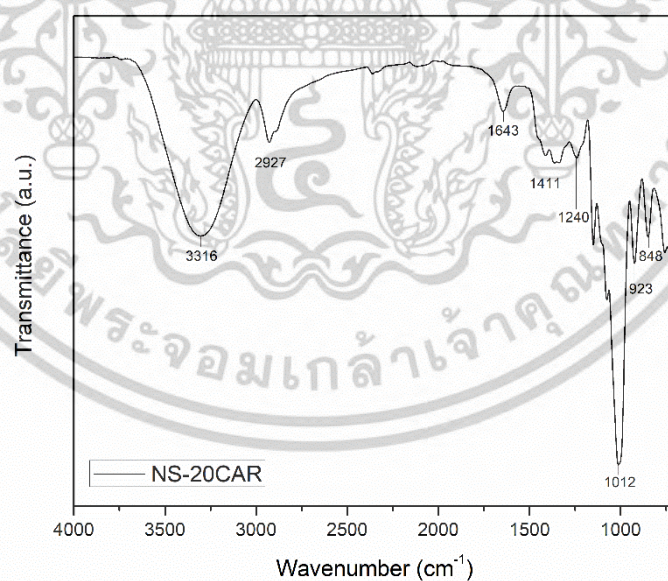


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

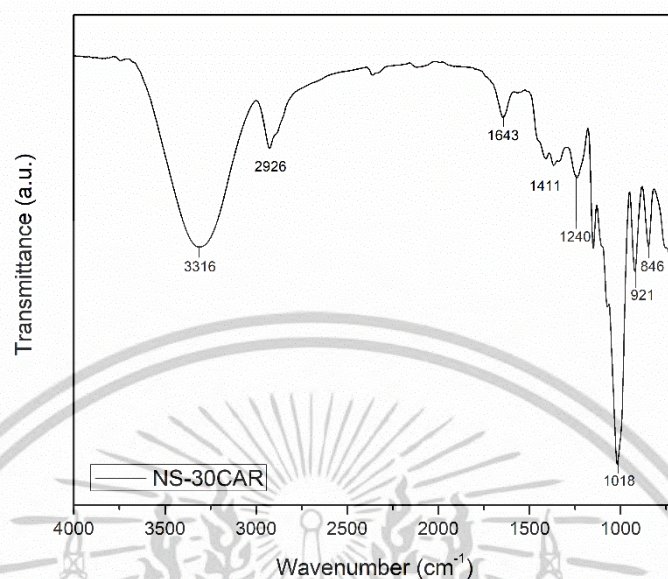


รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

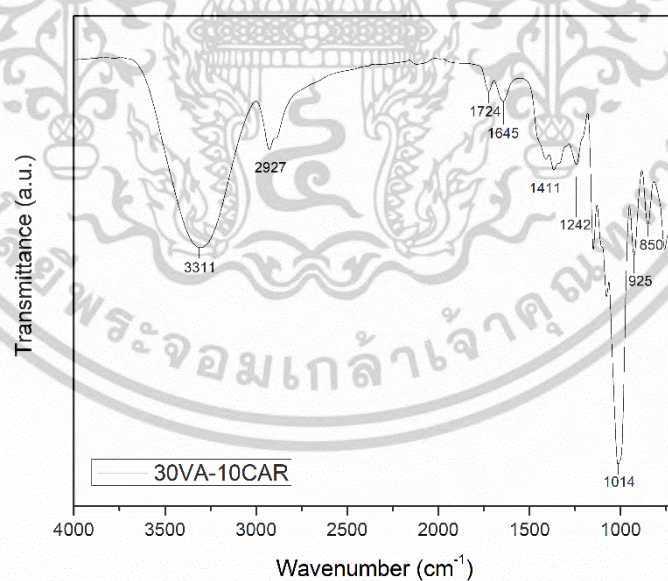


รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

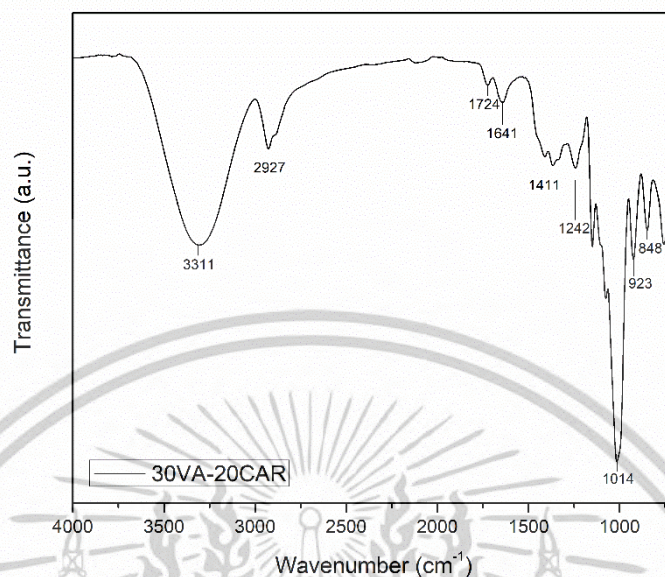


รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

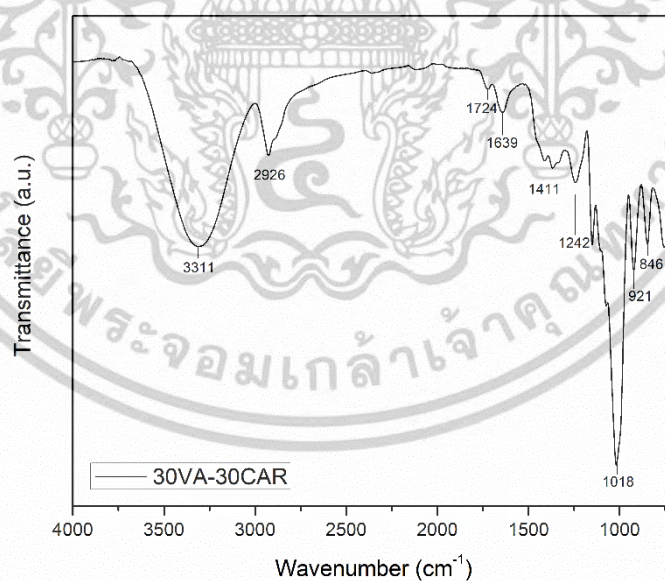


รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปทาการจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

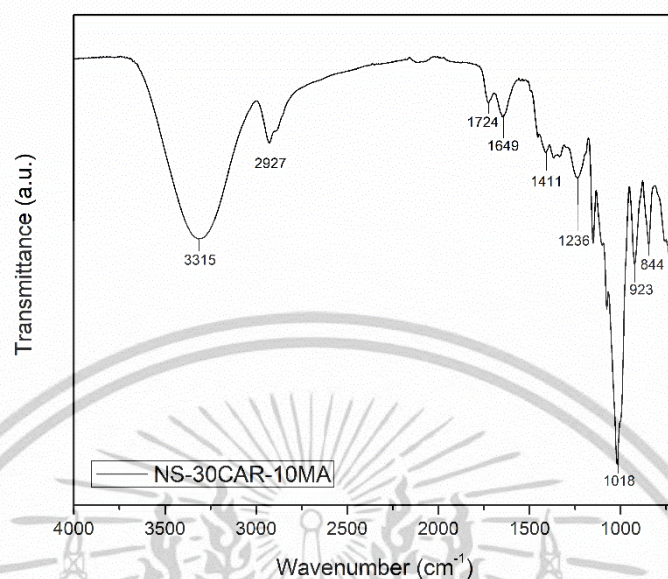


รูปที่ ก.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก

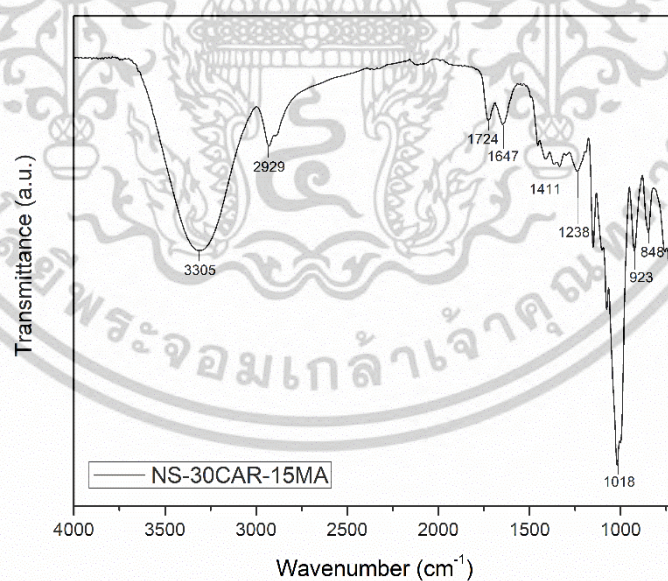


รูปที่ ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

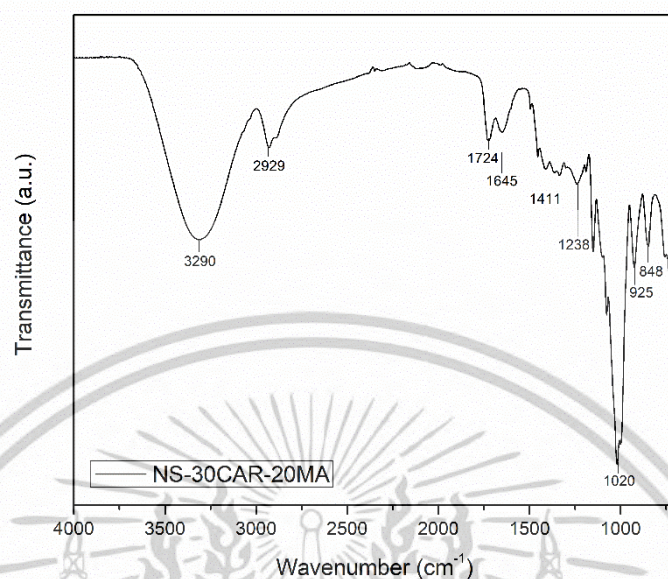


รูปที่ ก.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทาการ-จีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

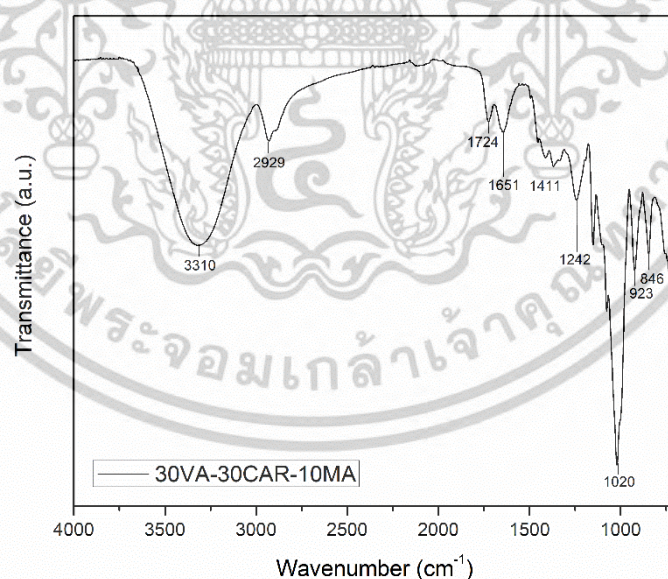


รูปที่ ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทาการ-จีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

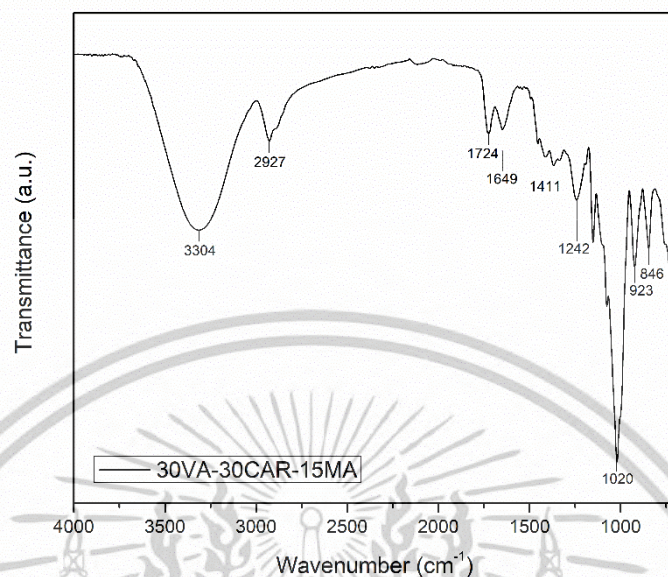


รูปที่ ก.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทาการาจี้แนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

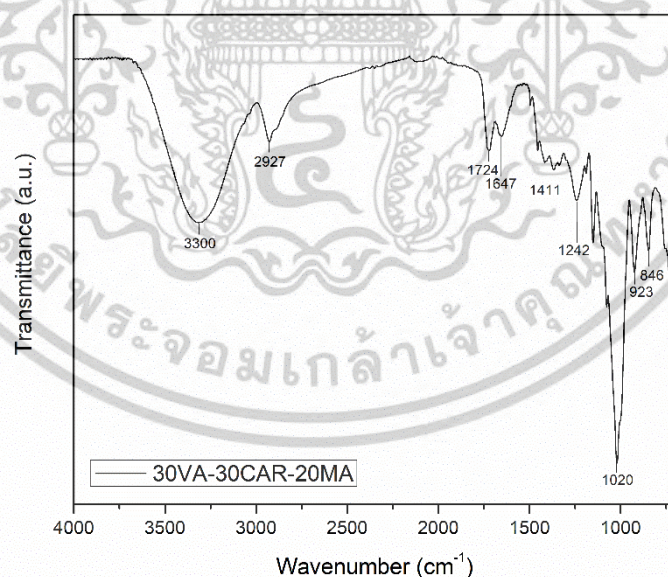


รูปที่ ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปทาการาจี้แนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



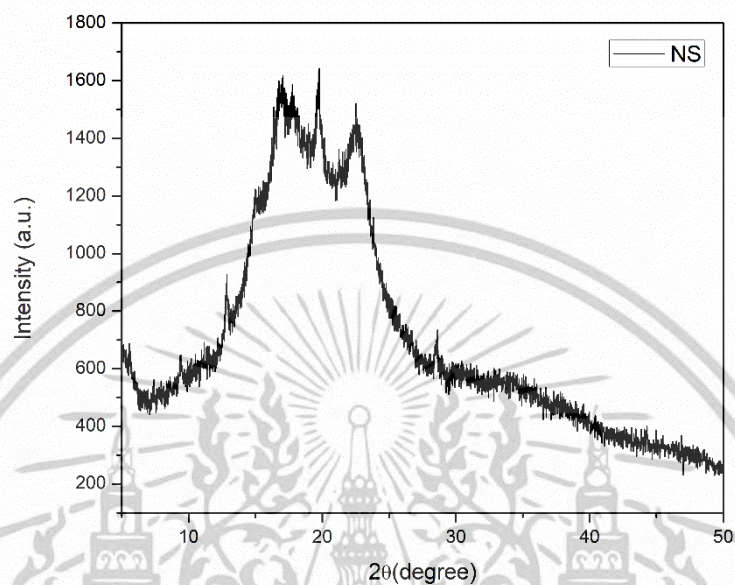
รูปที่ ก.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก



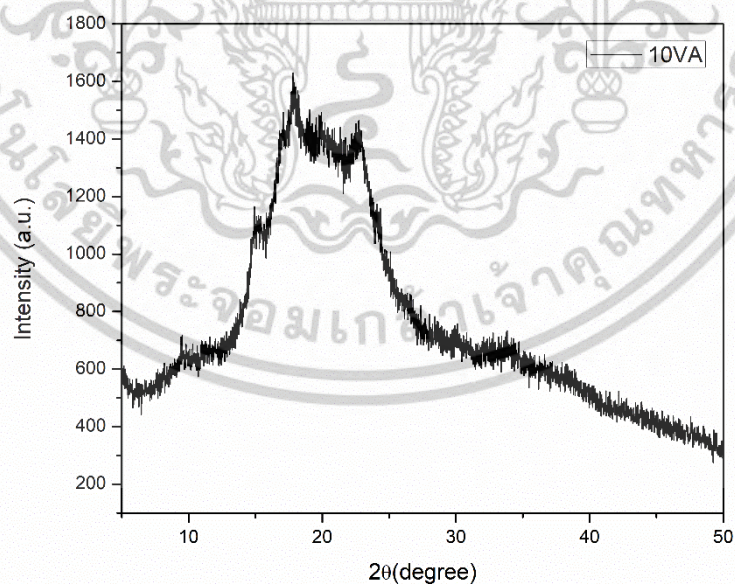
รูปที่ ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

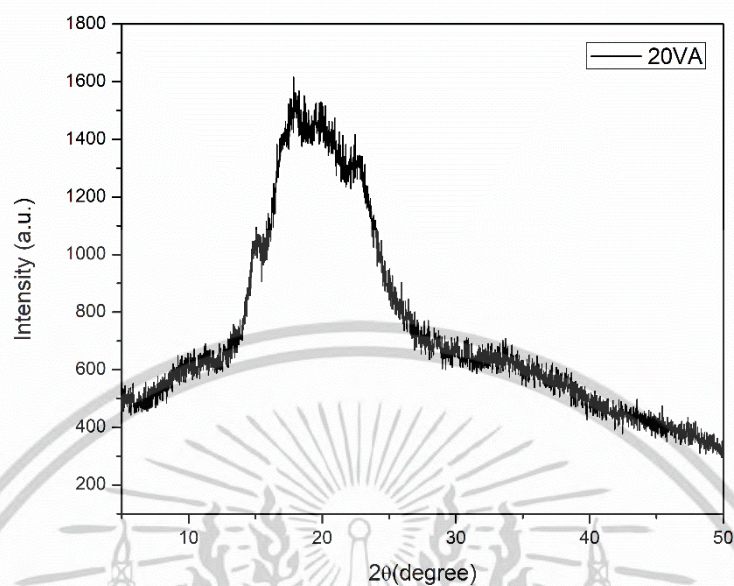


รูปที่ ข.1 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแก้มน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร

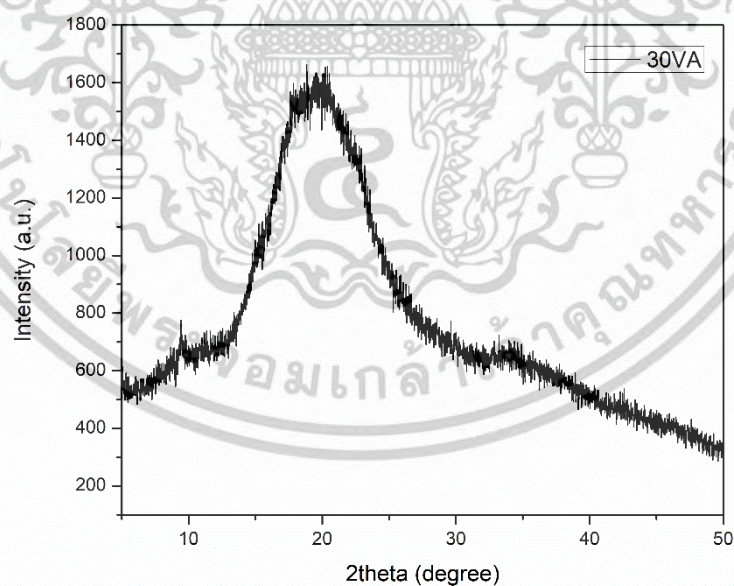


รูปที่ ข.2 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแก้มน้ำมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

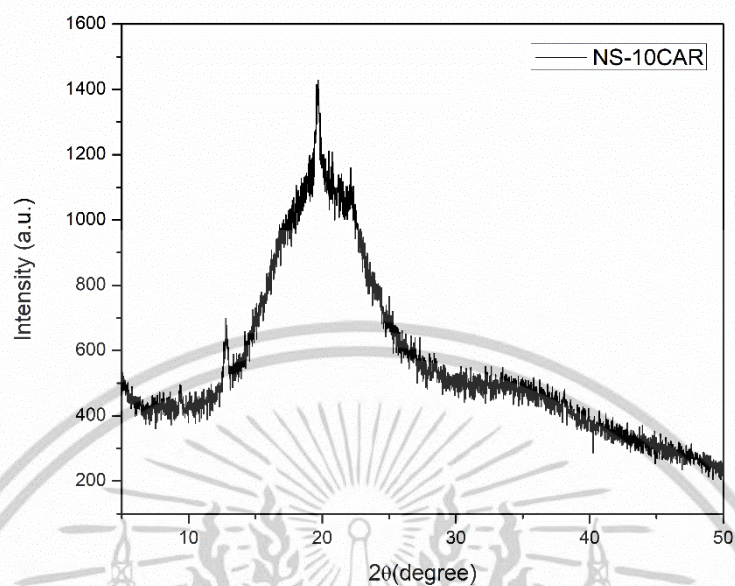


รูปที่ ข.3 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 20% โดยน้ำหนัก แป้ง

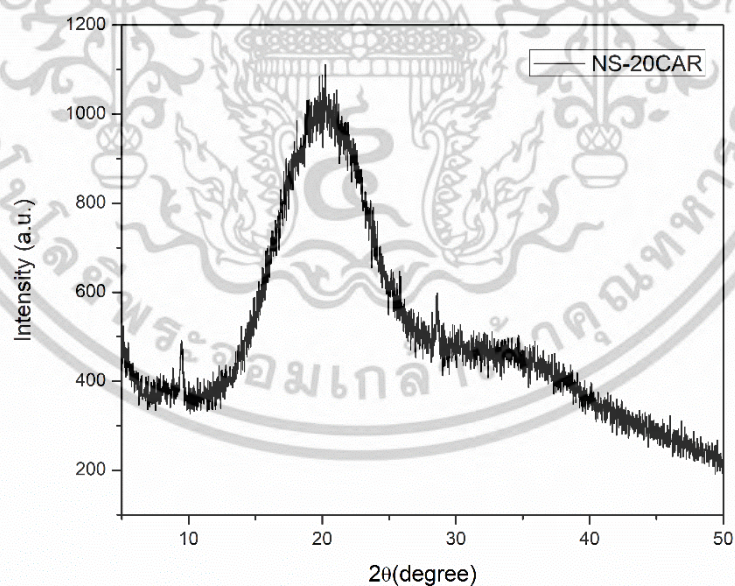


รูปที่ ข.4 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

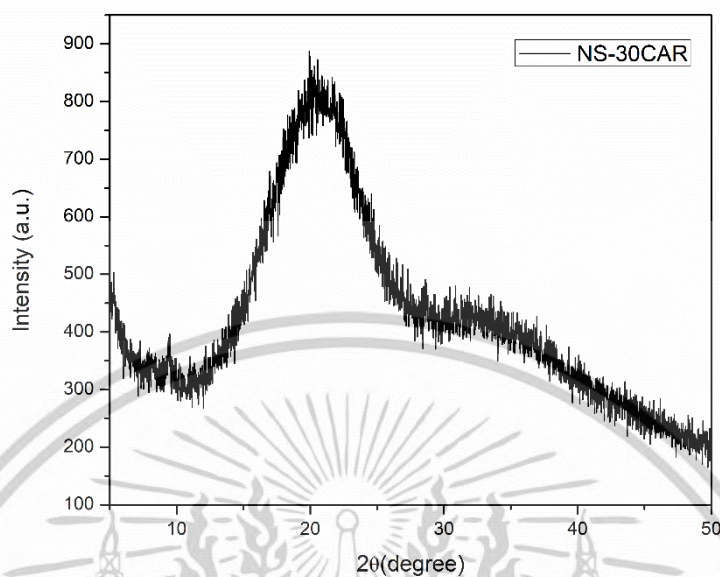


รูปที่ ข.5 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปพาคาราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

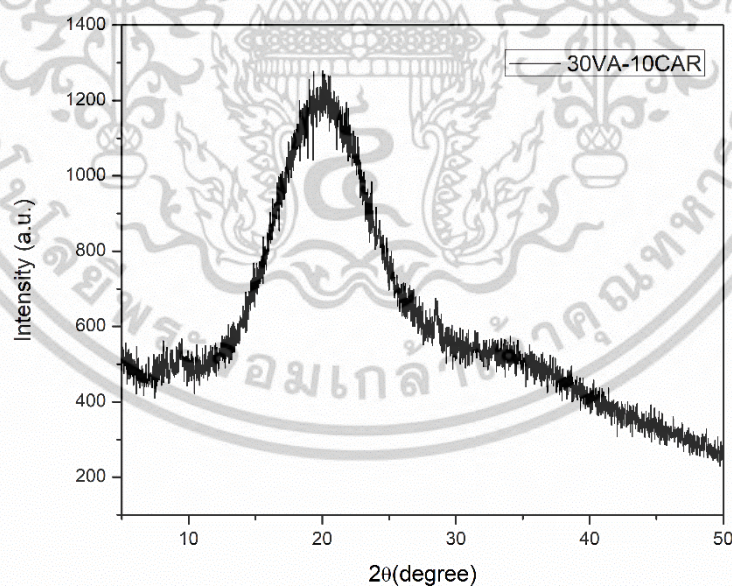


รูปที่ ข.6 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปพาคาราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

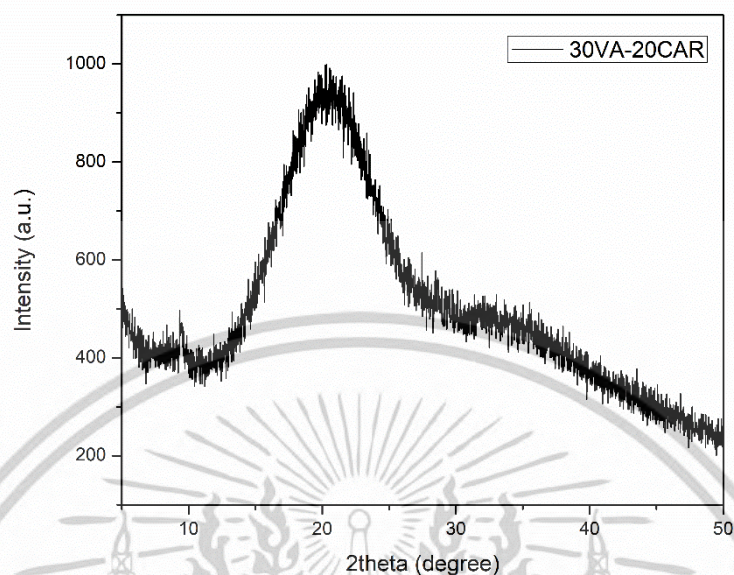


รูปที่ ข.7 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

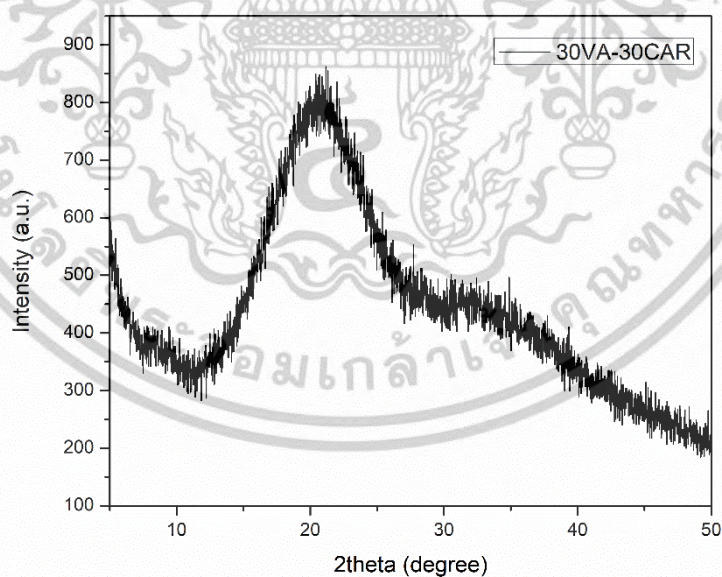


รูปที่ ข.8 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปพาคาราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

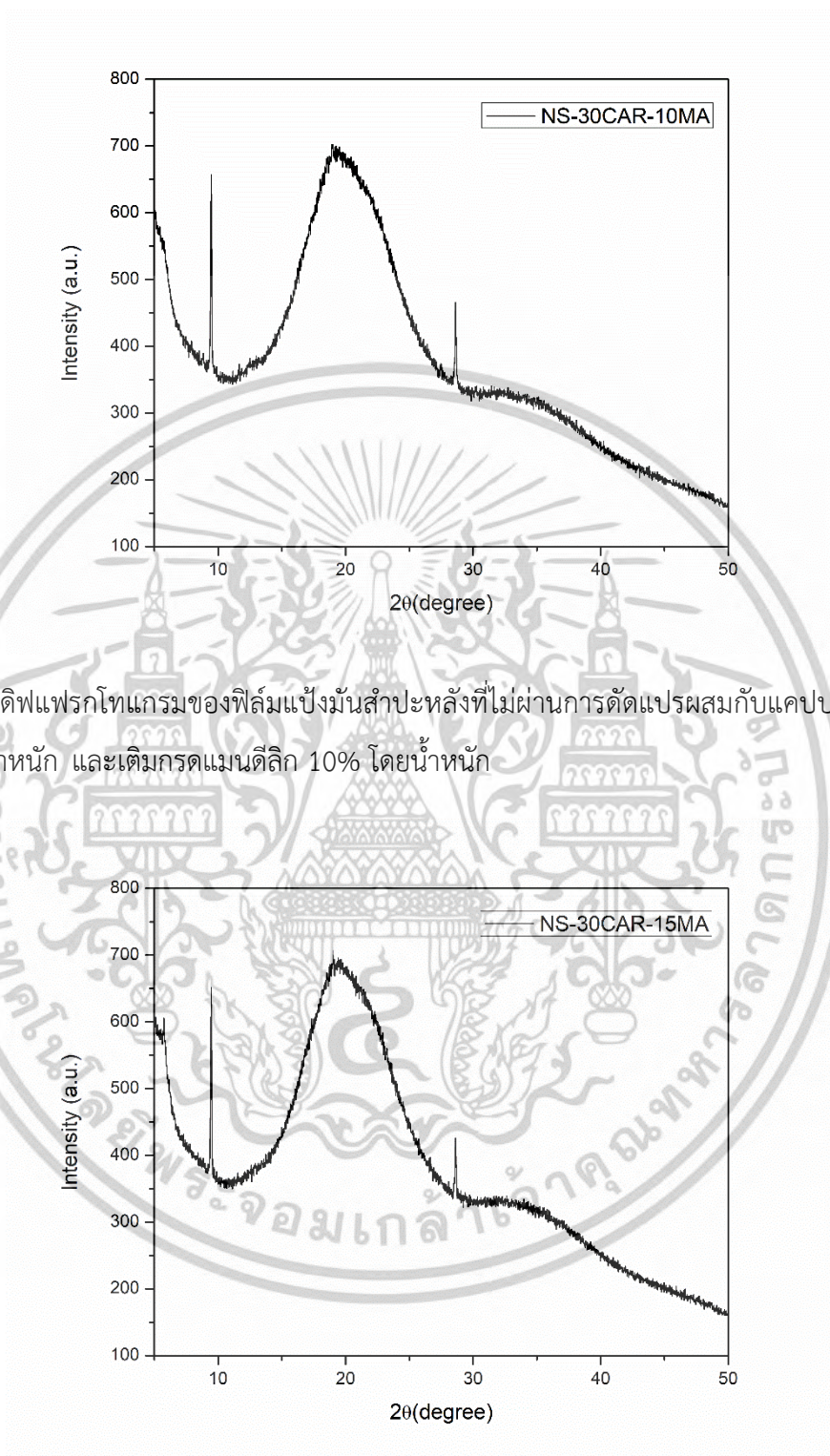


รูปที่ ข.9 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ข.10 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปซูลคาร์ราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

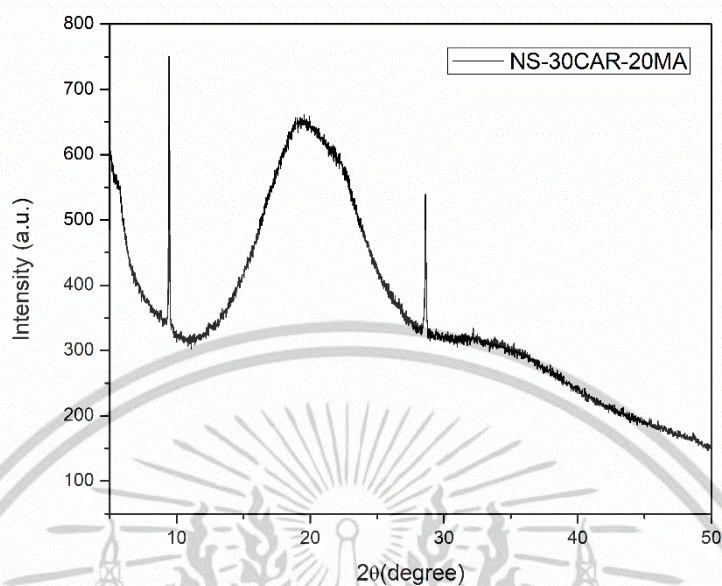
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



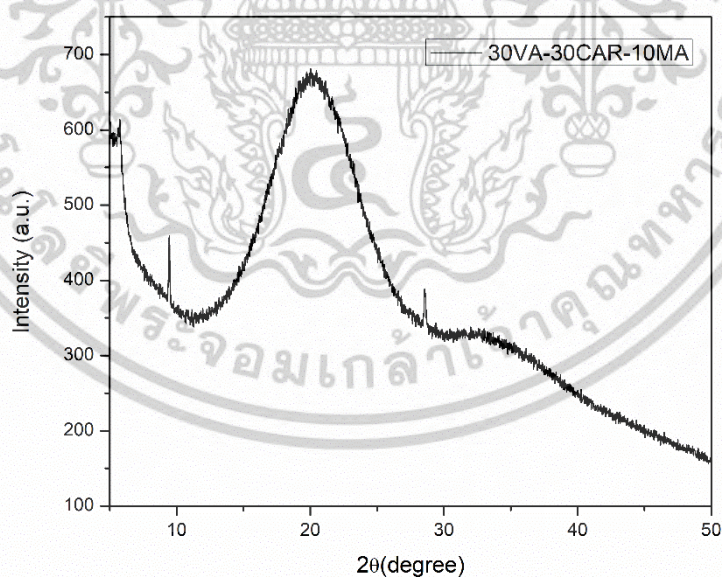
รูปที่ ข.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

รูปที่ ข.12 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปพาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

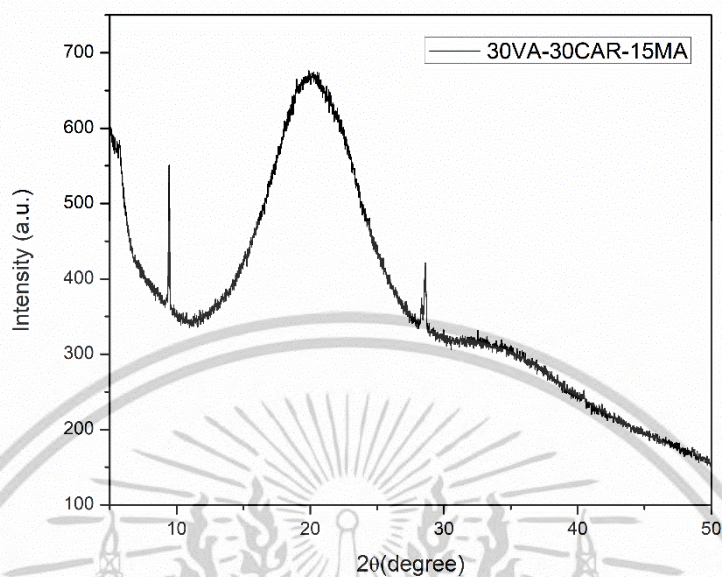


รูปที่ ข.13 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

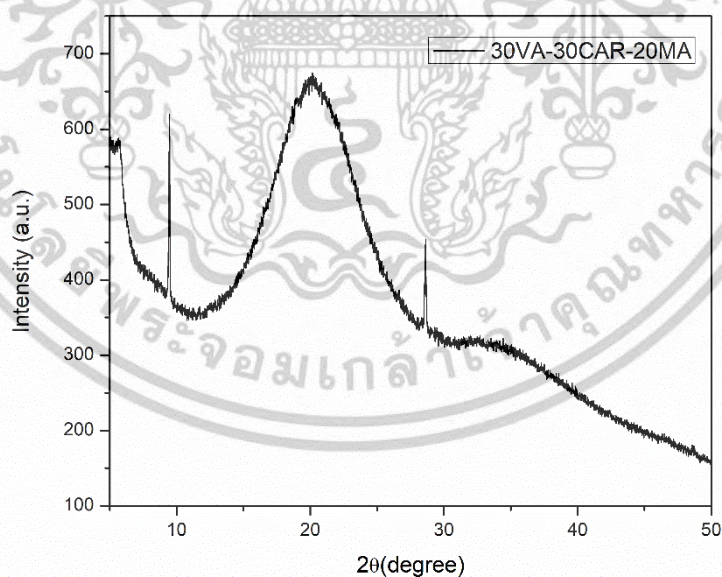


รูปที่ ข.14 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ข.16 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปทาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตทที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร | ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa) | มอดุลัส (MPa)      | เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%) |
|------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| NS   | $3.08 \pm 0.04^a$                   | $18.46 \pm 1.43^a$ | $53.62 \pm 3.11^c$                         |
| 10VA | $2.81 \pm 0.35^a$                   | $10.63 \pm 1.88^b$ | $74.51 \pm 9.65^{bc}$                      |
| 20VA | $2.35 \pm 0.50^a$                   | $6.09 \pm 0.55^c$  | $91.21 \pm 2.54^b$                         |
| 30VA | $1.13 \pm 0.13^b$                   | $5.66 \pm 1.39^c$  | $172.16 \pm 2.57^a$                        |

ตารางที่ ค.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปไซซินที่ปริมาณต่าง ๆ

| สูตร       | ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa) | มอดุลัส (MPa)       | เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%) |
|------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|
| NS         | $3.08 \pm 0.04^c$                   | $18.46 \pm 1.43^d$  | $53.62 \pm 3.11^a$                         |
| NS-10CAR   | $4.54 \pm 0.18^b$                   | $81.95 \pm 1.29^c$  | $47.42 \pm 1.77^{ab}$                      |
| NS-20CAR   | $4.90 \pm 0.18^{ab}$                | $88.95 \pm 2.31^b$  | $44.35 \pm 2.27^b$                         |
| NS-30CAR   | $5.19 \pm 0.29^a$                   | $102.17 \pm 1.25^a$ | $42.74 \pm 3.22^c$                         |
| 30VA       | $1.13 \pm 0.13^d$                   | $5.66 \pm 1.39^d$   | $172.16 \pm 2.57^a$                        |
| 30VA-10CAR | $2.34 \pm 0.04^c$                   | $24.61 \pm 0.35^c$  | $59.75 \pm 2.29^b$                         |
| 30VA-20CAR | $2.80 \pm 0.18^b$                   | $64.23 \pm 0.47^b$  | $44.61 \pm 2.18^c$                         |
| 30VA-30CAR | $5.24 \pm 0.16^a$                   | $105.69 \pm 2.32^a$ | $33.70 \pm 1.65^d$                         |

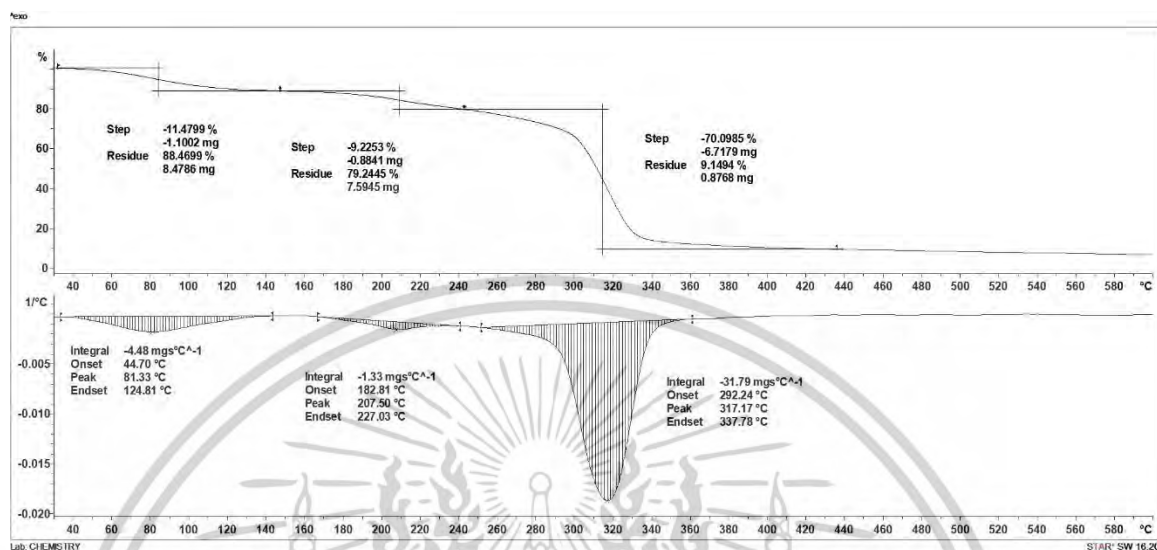
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรและแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวโนลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งที่ผสมกับแคปทาการจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิกที่ปริมาณต่าง ๆ

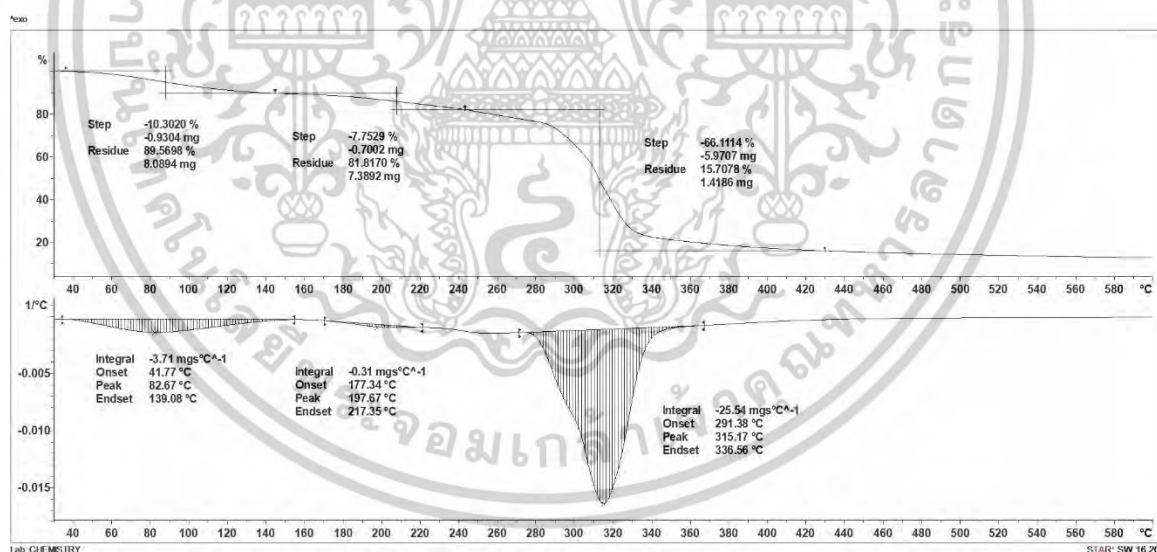
| สูตร            | ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa) | มอดุลัส (MPa)         | เปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| NS-30CAR        | $5.19 \pm 0.29^a$                   | $102.17 \pm 1.25^a$   | $42.74 \pm 3.22^c$                         |
| NS-30CAR-10MA   | $2.00 \pm 0.74^b$                   | $29.53 \pm 2.97^b$    | $52.85 \pm 1.93^b$                         |
| NS-30CAR-15MA   | $1.58 \pm 0.40^c$                   | $25.22 \pm 2.19^{bc}$ | $58.79 \pm 3.51^b$                         |
| NS-30CAR-20MA   | $1.33 \pm 0.17^c$                   | $19.98 \pm 2.60^c$    | $68.08 \pm 3.05^a$                         |
| 30VA-30CAR      | $5.24 \pm 0.16^a$                   | $105.69 \pm 2.32^a$   | $33.70 \pm 1.65^c$                         |
| 30VA-30CAR-10MA | $1.46 \pm 0.05^b$                   | $23.84 \pm 3.76^b$    | $90.54 \pm 7.24^b$                         |
| 30VA-30CAR-15MA | $0.71 \pm 0.04^c$                   | $11.45 \pm 0.35^c$    | $106.20 \pm 9.62^b$                        |
| 30VA-30CAR-20MA | $0.67 \pm 0.05^c$                   | $9.93 \pm 1.87^c$     | $184.67 \pm 9.46^a$                        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

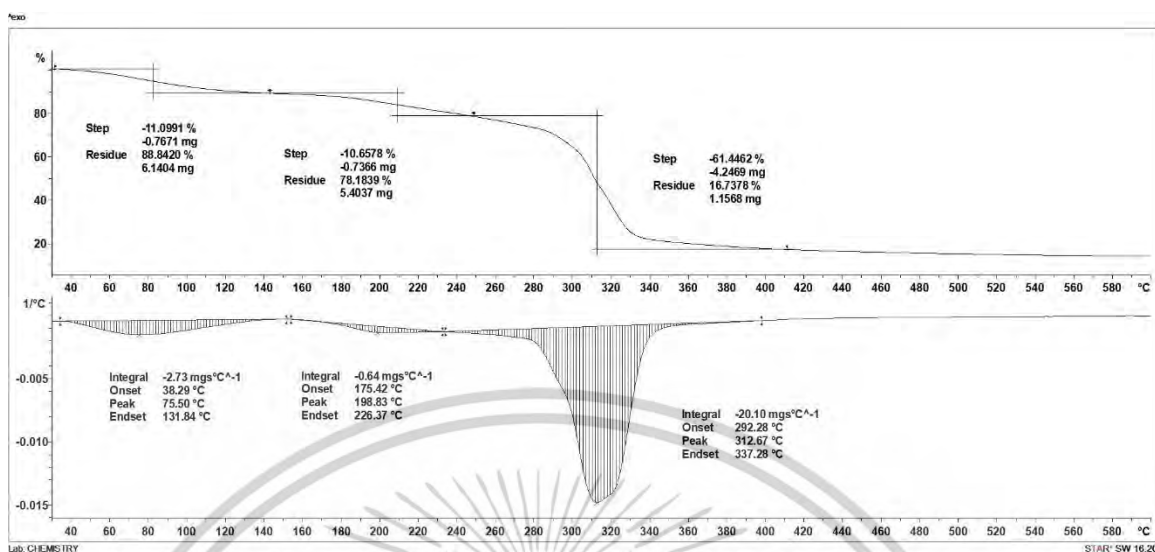


รูปที่ ง.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร

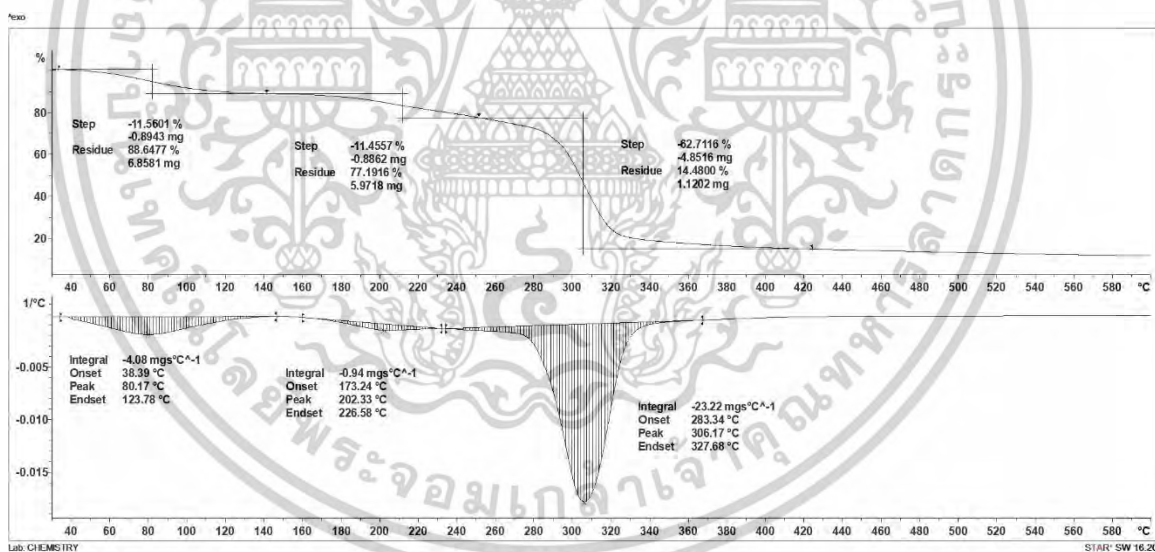


รูปที่ ง.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 10% โดยน้ำหนักแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

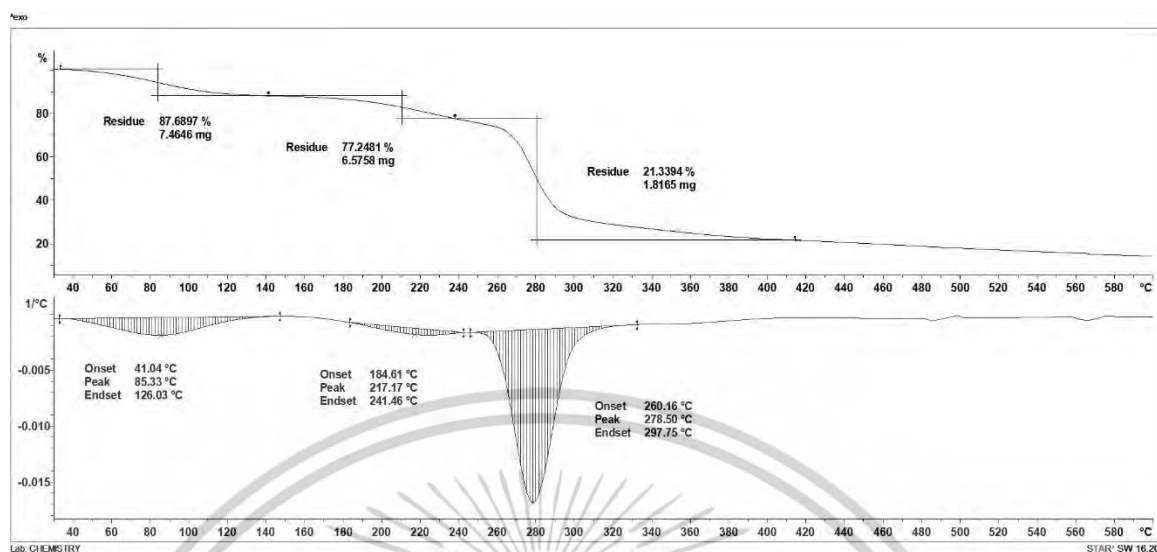


รูปที่ ง.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 20% โดย น้ำหนักแป้ง

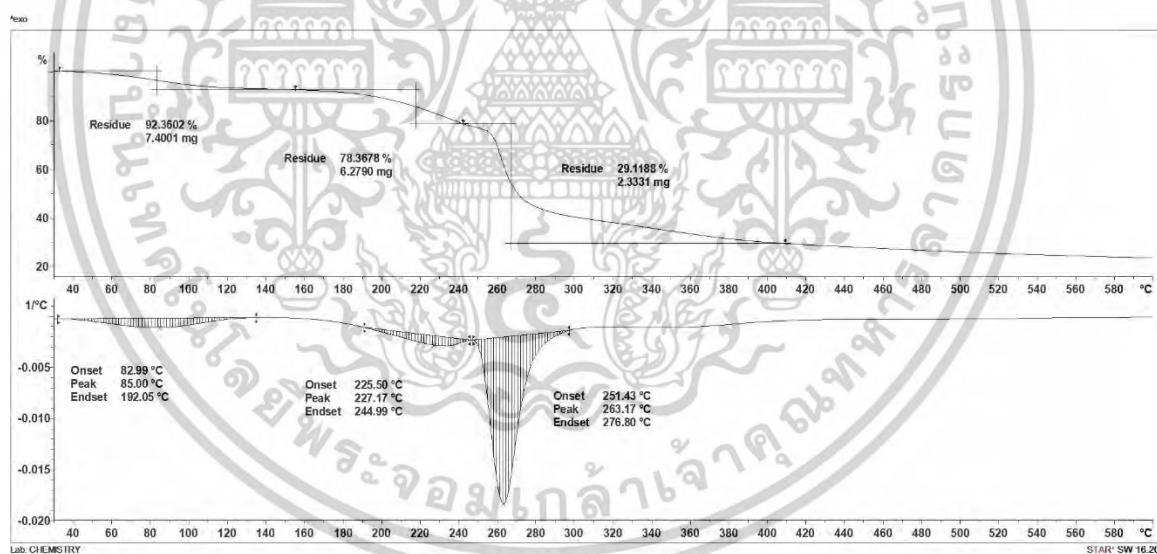


รูปที่ ง.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

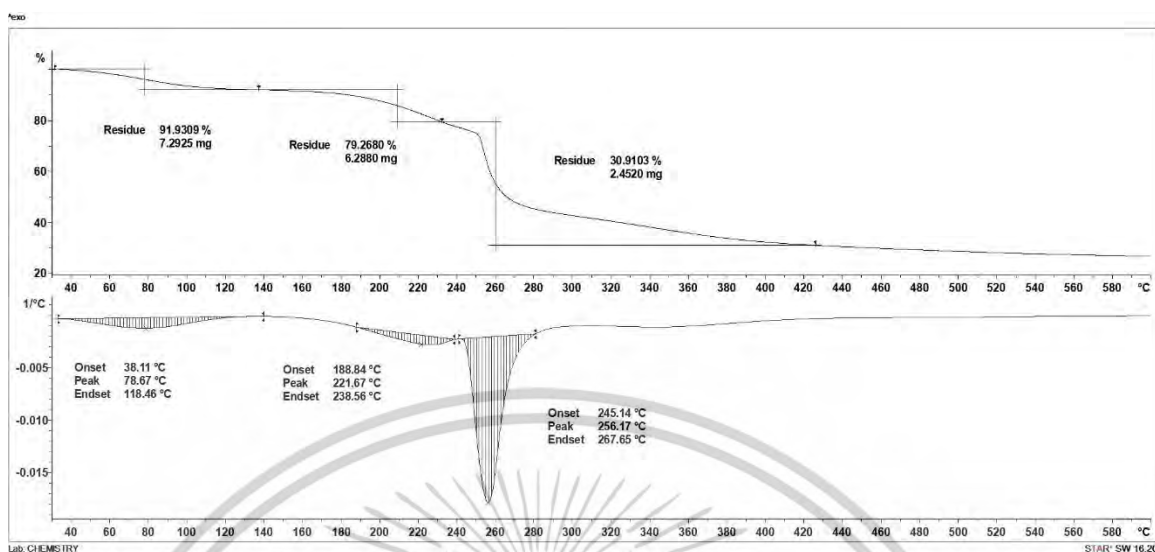


รูปที่ ๕.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทา-  
ราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

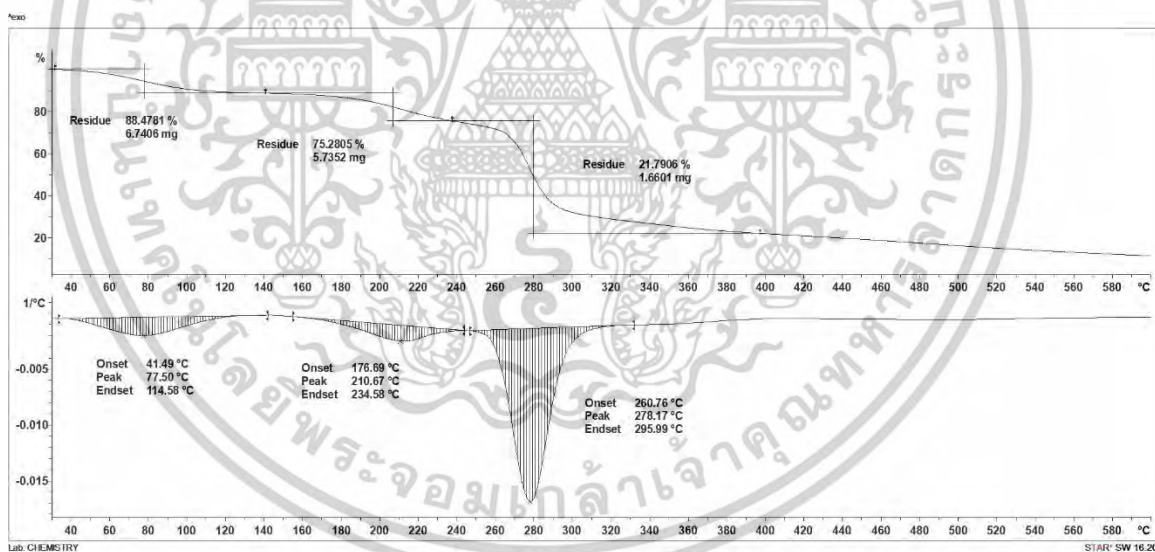


รูปที่ ๕.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปทา-  
ราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

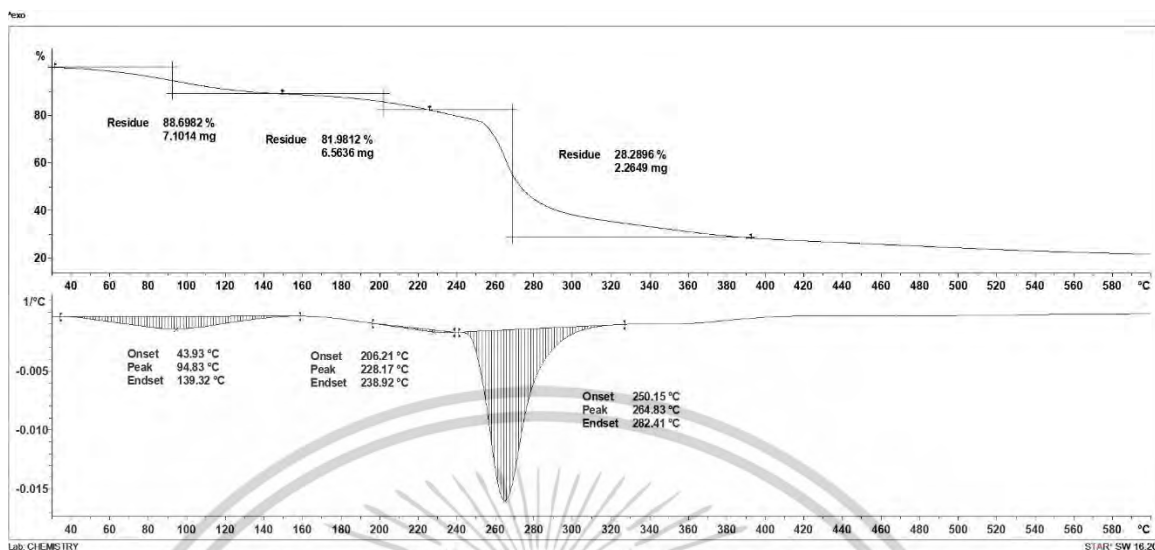


รูปที่ ๗.๗ TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

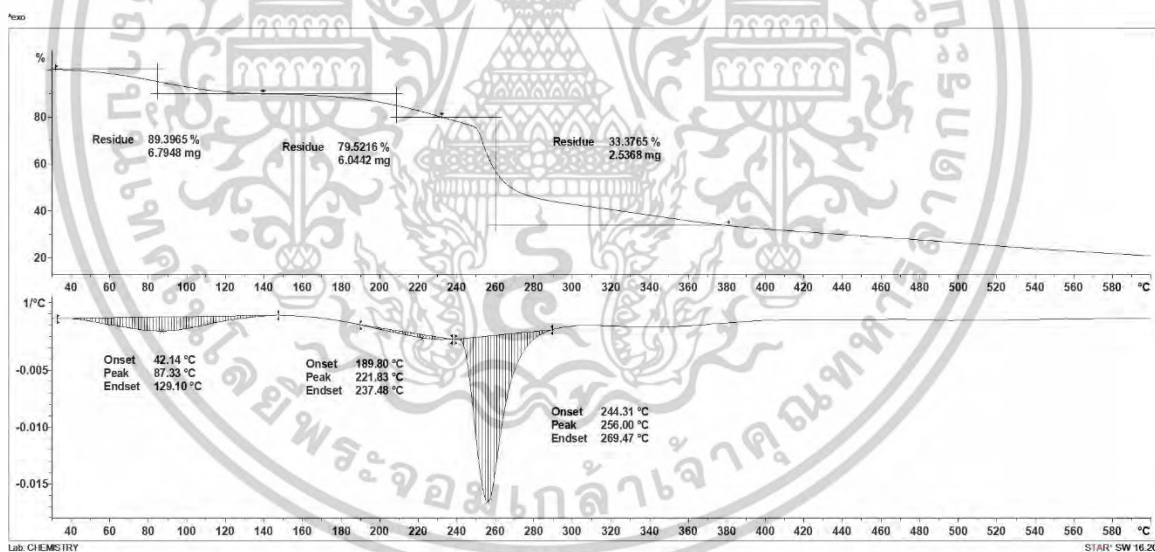


รูปที่ ๗.๘ TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

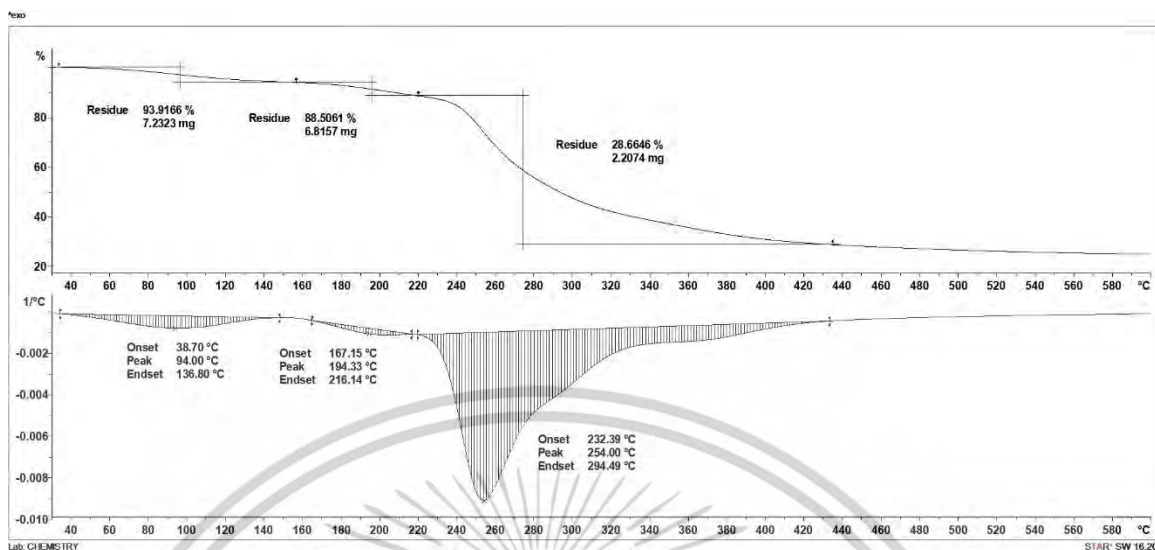


รูปที่ ง.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 20% โดยน้ำหนัก

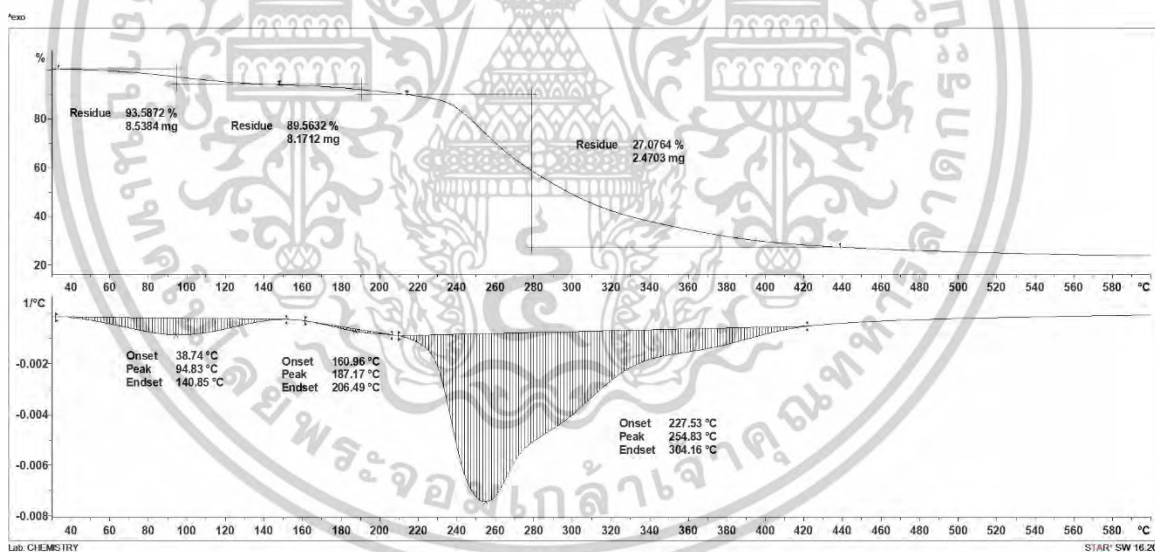


รูปที่ ง.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดย น้ำหนักแป้งผสมกับแคปซาคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

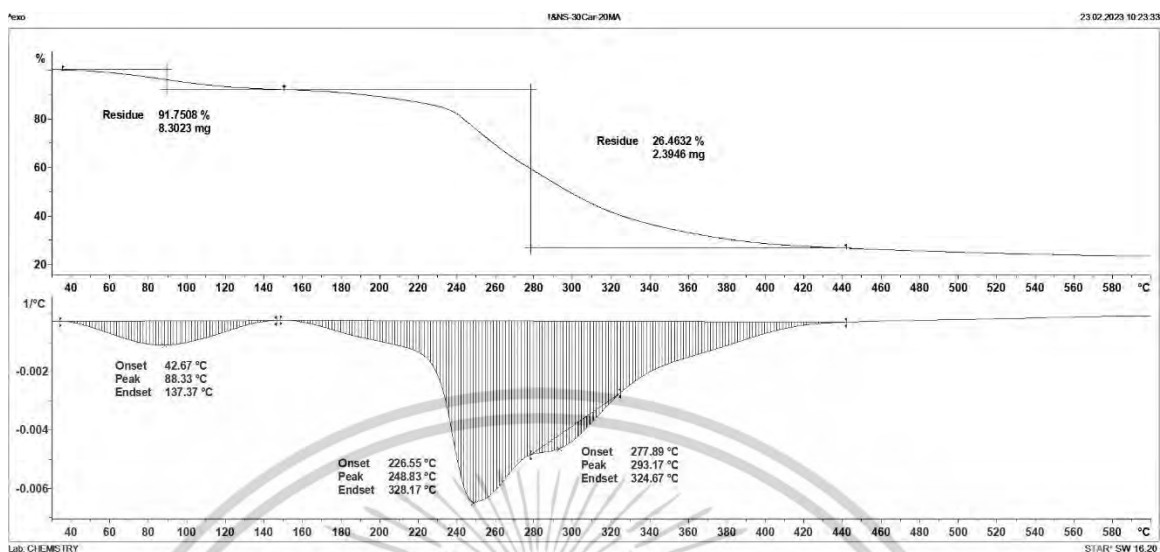


รูปที่ ง.11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

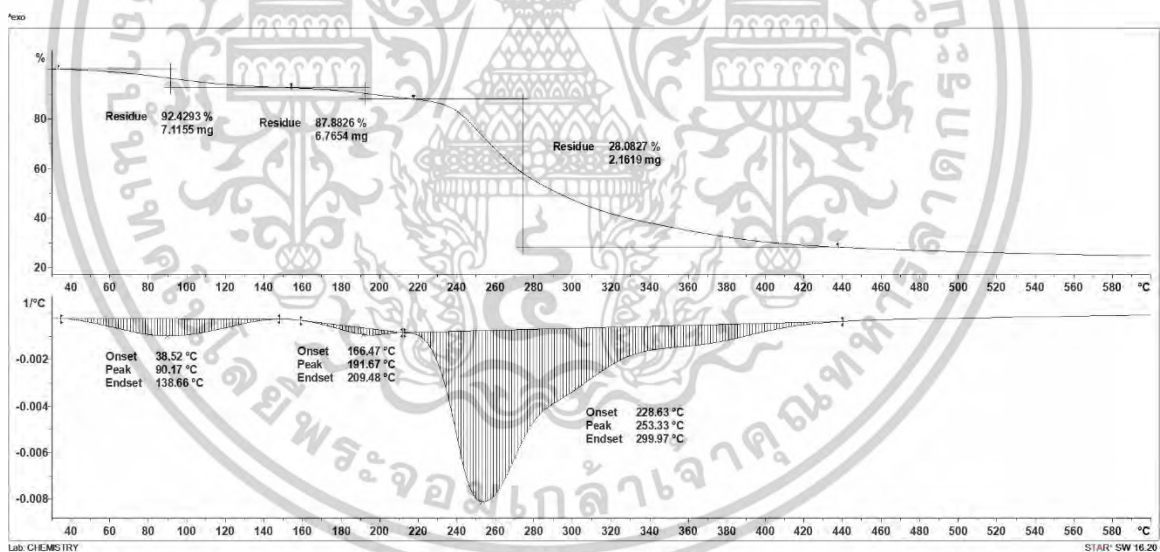


รูปที่ ง.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

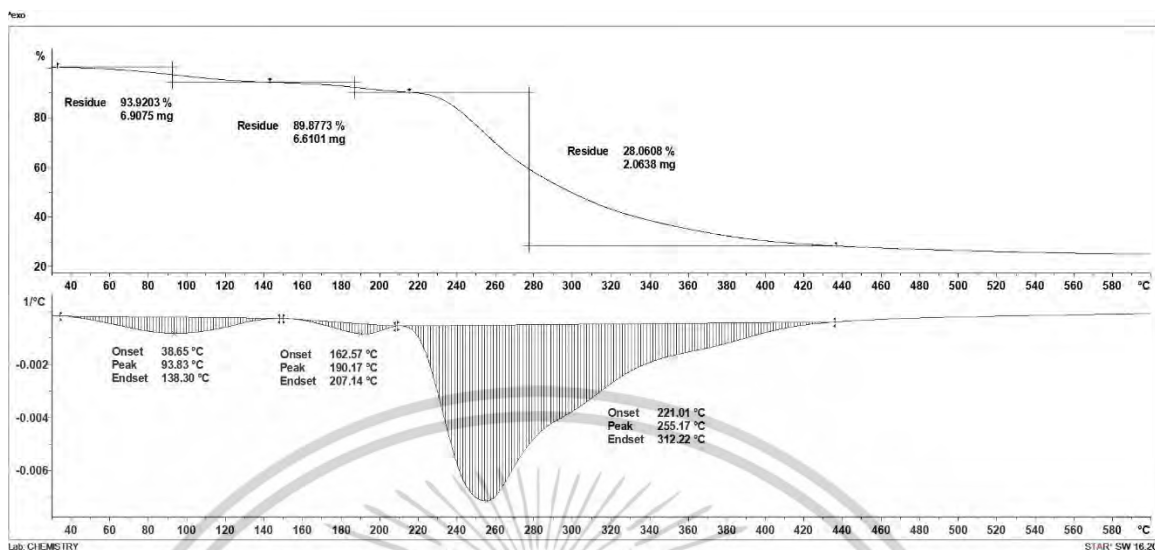


รูปที่ ง.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

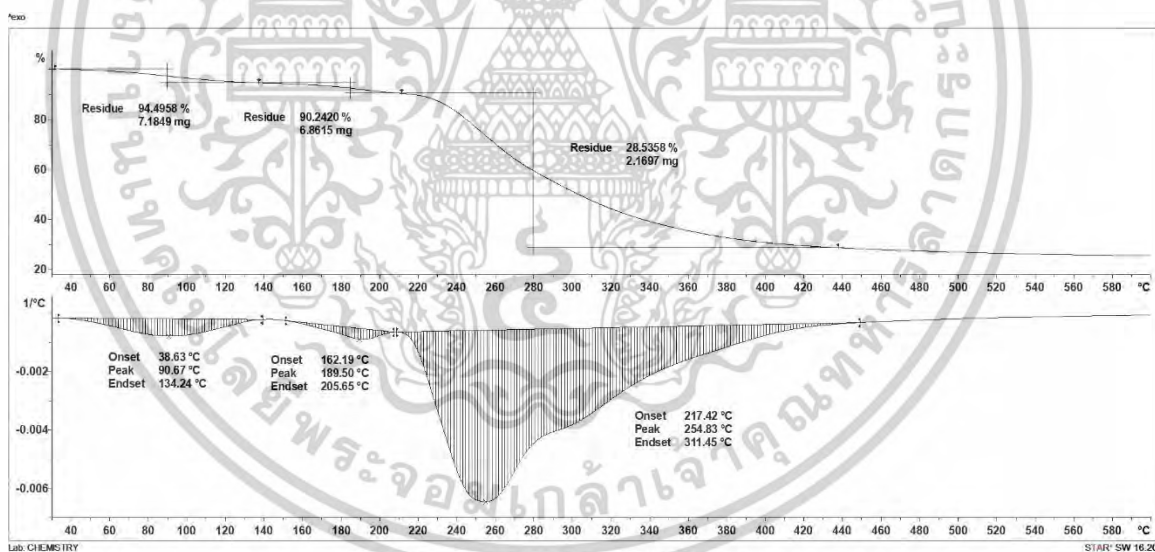


รูปที่ ง.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนัก แป้งผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 10% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.15 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 15% โดยน้ำหนัก



รูปที่ ง.16 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยไวนิลอะซิเตท 30% โดยน้ำหนักแป้งผสมกับแคปซูลคาราจีแนน 30% โดยน้ำหนัก และเติมกรดแมนดีลิก 20% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ            | วิมลสิริ ศรีโพธิ์ชัย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| วันเดือน ปีเกิด | 21 มีนาคม 2540                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ภูมิลำเนา       | กรุงเทพมหานคร                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 17 ซอยฉลองกรุง 53 แยก 3 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| ประวัติการศึกษา | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระดับมัธยมต้น-ปลาย โรงเรียนมาเรียลัย จ.กรุงเทพมหานคร</li> <li>- ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</li> <li>- ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</li> </ul> |
| ผลงานทางวิชาการ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- W. SRIPHOCHEI, J. PRACHAYAWARAKORN, Natural wound dressing films prepared from acetylated starch/k-carrageenan blend incorporated with mandelic acid, Journal of Metals, Materials and Minerals 34(2) (2024) 1984-1984.</li> </ul>                                                                                                             |