

ผลของแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติของฟิล์มผสม
ระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

EFFECT OF CALCIUM CHLORIDE AND CITRIC ACID ON THE
PROPERTIES OF FILM BETWEEN MUNG BEAN STARCH
AND SODIUM ALGINTE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติของฟิล์มผสม
ระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

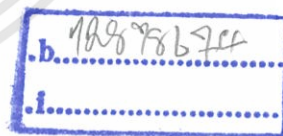
EFFECT OF CALCIUM CHLORIDE AND CITRIC ACID ON THE
PROPERTIES OF FILM BETWEEN MUNG BEAN STARCH
AND SODIUM ALGINATE



T149008

กุลนันท์ จำปาทอง
จันทร์จิรา พวงวา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149008
วัน,เดือน,ปี... 1 8 S.A. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF CALCIUM CHLORIDE AND CITRIC ACID ON THE
PROPERTIES OF FILM BETWEEN MUNG BEAN STARCH
AND SODIUM ALGINATE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRY CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจีเนต
EFFECT OF CALCIUM CHLORIDE AND CITRIC ACID ON THE PROPERTIES OF FILM BETWEEN MUNG BEAN STARCH AND SODIUM ALGINATE

ชื่อนักศึกษา นางสาวกุลนันท์ จำปาทอง รหัสนักศึกษา 56050443
นางสาวจันทร์จิรา พงวา รหัสนักศึกษา 56050454




ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|--|
| รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ประธานกรรมการ |  |
| รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย กรรมการ |  |
| รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|--|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | ผลของแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวกุลนันท์ จำปาทอง รหัสนักศึกษา 56050443 นางสาวจันทร์จิรา พวงวา รหัสนักศึกษา 56050454 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) |
| ภาควิชา | เคมี |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) |
| ปีการศึกษา | 2559 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v แป้งข้าวเหนียวกับ 5 %w/v โซเดียมอัลจิเนตที่อัตราส่วน 80:20 ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยมีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกเป็นสารเติมแต่ง ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยการหล่อแบบ นำมาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียว และที่มีต่อฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต สมบัติที่จะศึกษา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน การบวมน้ำ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

ผลการทดลองพบว่าทั้งแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกมีผลต่อสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวเหนียว กล่าวคือทำให้ฟิล์มบวมน้ำลดลง สามารถทนน้ำได้นานขึ้น สมบัติเชิงกลดีขึ้น และฟิล์มแป้งข้าวเหนียวที่เติมกรดซิตริกทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูงขึ้น ในขณะที่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำลง ส่วนฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต พบว่าการเติมทั้งแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริก ทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดี บวมน้ำลดลง ทนน้ำได้นานขึ้น และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ห่อผลไม้

คำสำคัญ : แป้งข้าวเหนียว โซเดียมอัลจิเนต แคลเซียมคลอไรด์ กรดซิตริก

| | |
|----------------------|--|
| Title | Effect of calcium chloride and citric acid the properties of film between sodium alginate and mung bean starch |
| Students | Miss. Kulanan Jampathong Student ID 56050443 Miss. Janjira Puangwa Student ID 56050454 |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Chemistry) |
| Department | Chemistry |
| Faculty | Science |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) |
| Academic Year | 2016 |
| Advisor | Assoc. Prof. Dr. Malinee Chaisupakitsin |

Abstract

This special project aims to preparation films from blending solutions of 5 %w/v mung bean starch and 5 %w/v sodium alginate at 80:20 ratio, using glycerol as a plasticizer and 2 %w/v calcium chloride and 2 %w/v citric acid were used as a additives. The mixture solution was cast and dried in the oven at temperature of 80 °C for 2 hr. and 60 °C for 4 hr. The effect of calcium chloride and citric acid on the properties of mung bean starch films and blend film between alginate and mung bean starch were studied. Physical properties, functional group analysis, swelling, mechanical properties and thermal stability of films were investigated.

The results were found that both calcium chloride and citric acid decreased swelling, longer time of water resistance and improved mechanical properties. Addition of citric acid into mung bean starch films indicated higher thermal stability, but addition of calcium chloride dominated lower thermal stability of the film. In case of the blend films between sodium alginate and mung bean starch, the addition of both calcium chloride and citric acid showed good mechanical properties, lower swelling, higher water resistance for a long period time and higher thermal stability film. The appropriate formula in this research well provided film for fruit packaging.

Keywords : Mung bean starch, Sodium Alginate, Calcium chloride, Citric acid

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้หากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำ จากบุคคลและองค์กรต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ คำปรึกษาในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย และรองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษโดยช่วยตรวจทาน ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ซึ่งทำให้คณะผู้จัดทำสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและคอยให้ความช่วยเหลือรวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณกัญญา มงคลโกชน ที่กรุณาช่วยสอนการใช้เครื่อง TGA คุณสุภัทร บานเย็น ที่กรุณาช่วยสอนการใช้เครื่อง FT-IR และคุณทองสุข ภูริ้อย ที่ให้ความร่วมมือในการเปิดอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดลอง รวมทั้งสอนเทคนิคต่างๆแก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างดี สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายปฏิบัติการห้องคอมพิวเตอร์ของคณะวิทยาศาสตร์ รวมทั้งบุคลากรท่านอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่คอยให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

กุลนันท์ จำปาทอง
จันทร์จิรา พวงวา

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| คำย่อ/สัญลักษณ์..... | ต |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 แป้ง (Starch)..... | 4 |
| 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง..... | 4 |
| 2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง..... | 4 |
| 2.1.3 สมบัติของแป้ง..... | 6 |
| 2.2 แป้งถั่วเขียว..... | 8 |
| 2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วเขียว..... | 8 |
| 2.2.2 ชนิดแป้งถั่วเขียว..... | 9 |
| 2.3 อัลจีเนต (Alginate)..... | 9 |
| 2.3.1 แหล่งที่มาของอัลจีเนต..... | 9 |
| 2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของอัลจีเนต..... | 9 |
| 2.3.3 กระบวนการผลิตโซเดียมอัลจีเนต..... | 12 |
| 2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel)..... | 12 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)..... | 16 |
| 2.5.1 ประโยชน์ของพลาสติไซเซอร์..... | 16 |
| 2.6 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)..... | 16 |
| 2.6.1 การผลิตแคลเซียมคลอไรด์..... | 17 |
| 2.6.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์..... | 17 |
| 2.7 กรดซิตริก (Citric acid)..... | 18 |
| 2.8 กลีเซอรอล (Glycerol)..... | 19 |
| 2.8.1 สมบัติของกลีเซอรอล..... | 19 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 20 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 24 |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 24 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 24 |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง..... | 25 |
| 3.3.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก ที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียว..... | 25 |
| 3.3.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกใน ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต..... | 26 |
| 3.3.3 การเตรียมสารละลาย..... | 26 |
| 3.3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มผสมจากแป้งข้าวเหนียวโดยเติมสารละลายแคลเซียม คลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน..... | 27 |
| 3.3.5 วิธีการเตรียมฟิล์มผสมจากสารละลายผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียว กับโซเดียมอัลจิเนตโดยเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลาย กรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน..... | 28 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 3.4 วิเคราะห์สมบัติต่างๆของฟิล์ม..... | 29 |
| 3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม..... | 29 |
| 3.4.2 ทดสอบหุ้มฟังก์ชัน..... | 29 |
| 3.4.3 การหาสมบัติการบวมน้ำ (Swelling property)..... | 29 |
| 3.4.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D882..... | 29 |
| 3.4.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อน..... | 30 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... | 31 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพ..... | 31 |
| 4.1.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก ที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว..... | 33 |
| 4.1.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกใน ฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต..... | 35 |
| 4.2 การวิเคราะห์หาหุ้มฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)..... | 37 |
| 4.2.1 แป้งถั่วเขียว..... | 37 |
| 4.2.2 โซเดียมอัลจิเนต..... | 37 |
| 4.2.3 กรดซิตริก..... | 39 |
| 4.2.4 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก ที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว..... | 39 |
| 4.2.5 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกใน ฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต..... | 41 |
| 4.3 ผลการทดสอบการบวมน้ำ..... | 43 |
| 4.3.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก ที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว..... | 45 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.3.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต | 46 |
| 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล | 47 |
| 4.4.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว | 47 |
| 4.4.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต | 49 |
| 4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) | 52 |
| 4.5.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว | 52 |
| 4.5.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต | 55 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 58 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 59 |
| เอกสารอ้างอิง | 60 |
| ภาคผนวก | 64 |
| ภาคผนวก ก | 64 |
| ภาคผนวก ข | 70 |
| ภาคผนวก ค | 72 |
| ภาคผนวก ง | 76 |
| ประวัติผู้เขียน | 83 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเขียว..... | 9 |
| 2.2 สมบัติของแคลเซียมคลอไรด์..... | 17 |
| 2.3 สมบัติของกรดซิตริก..... | 18 |
| 2.4 สมบัติของกลีเซอรอล..... | 19 |
| 3.1 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 3 %v/v กลีเซอรอล และ 2 %w/v สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์..... | 25 |
| 3.2 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 3 %v/v กลีเซอรอล และ 2 %w/v สารละลาย กรดซิตริก..... | 25 |
| 3.3 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 5 %w/v โซเดียมอัลจิเนต 3 %v/v กลีเซอรอล 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริก..... | 26 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม 5%w/v แป้งถั่วเขียว 100 ml. กลีเซอรอล 3 ml. 2 % w/v แคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริกที่ปริมาณแตกต่างกัน..... | 33 |
| 4.2 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 80 ml. 5 %w/v โซเดียมอัลจิเนต 20 ml. กลีเซอรอล 3 ml. 2 %w/v แคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v กรดซิตริกที่ปริมาณแตกต่างกัน..... | 35 |
| 4.3 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มหลังแช่น้ำที่ชั่วโมงต่างๆ..... | 43 |
| 4.4 แสดงค่าอนุกรมการสลายตัวของฟิล์มแป้งถั่วเขียวสูตรต่างๆ..... | 52 |
| 4.5 แสดงค่าอนุกรมการสลายตัวของฟิล์มผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และ โซเดียมอัลจิเนตสูตรต่างๆ..... | 55 |
| ข.1 แสดงค่าน้ำหนักของฟิล์มหลังทดสอบการบวมน้ำ..... | 70 |
| ข.2 แสดงค่าการทดสอบการบวมน้ำของฟิล์ม..... | 71 |
| ค.1 แสดงค่าความหนาของฟิล์ม..... | 72 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ค.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์ม | 73 |
| ค.3 แสดงค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของฟิล์ม | 74 |
| ค.4 แสดงค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์ม | 75 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส..... | 5 |
| 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน..... | 6 |
| 2.3 โครงสร้างของอัลจินต (Alginate) ชนิดต่างๆ..... | 10 |
| 2.4 กลไกการเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model)..... | 11 |
| 2.5 โครงสร้างของโซเดียมอัลจินต (Structure of sodium alginate)..... | 11 |
| 2.6 กระบวนการผลิตโซเดียมอัลจินต..... | 12 |
| 2.7 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล..... | 14 |
| 2.8 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์..... | 15 |
| 2.9 สูตรโครงสร้างของ Citric acid monohydrate..... | 18 |
| 2.10 โครงสร้างกลีเซอรอล (Glycerol)..... | 19 |
| 4.1 IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียว..... | 37 |
| 4.2 IR สเปกตรัมของโซเดียมอัลจินต..... | 37 |
| 4.3 โครงสร้างของแป้งข้าวเหนียว..... | 38 |
| 4.4 แสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจินต..... | 38 |
| 4.5 IR สเปกตรัมของกรดซิตริก..... | 39 |
| 4.6 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1). 0 ml. 2). 0.1 ml. 3). 0.5 ml. 4). 1.0 ml..... | 39 |
| 4.7 แสดงการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับแคลเซียมคลอไรด์..... | 40 |
| 4.8 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก 1). 0 ml. 5). 0.1 ml. 6). 0.5 ml. 7). 1.0 ml..... | 40 |
| 4.9 แสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับกรดซิตริก..... | 41 |
| 4.10 IR สเปกตรัมของฟิล์มผสมที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก 8) ไม่เติมทั้ง 2 สาร 9). CaCl ₂ 0.1 ml. 10). Citric acid 0.1 ml..... | 41 |
| 4.11 IR สเปกตรัมของฟิล์มผสมที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลาย กรดซิตริก 9). 0 ml. 11). 0.1 ml. 12). 0.3 ml. 13). 0.5 ml. 14). 1.0 ml..... | 42 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.12 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์..... | 45 |
| 4.13 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก | 45 |
| 4.14 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่เติม สารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก | 46 |
| 4.15 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่เติมสาร ละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริกที่ปริมาณ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml..... | 46 |
| 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับ สารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml..... | 47 |
| 4.17 กราฟแสดงค่าร้อยละการดึงยึดของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ กับสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml..... | 48 |
| 4.18 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ กับสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml..... | 48 |
| 4.19 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่ เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก | 49 |
| 4.20 กราฟแสดงค่าร้อยละการดึงยึดของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่ เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก | 50 |
| 4.21 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่ เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก | 51 |
| 4.22 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่ เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์..... | 53 |
| 4.23 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่ เติมสารละลายกรดซิตริก..... | 54 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.24 TG (ก) และ DTG (ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมระหว่าง แป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่เติมสารเติมแต่งชนิดเดียวและสองชนิด..... | 56 |
| 4.25 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมระหว่าง แป้งข้าวเหนียวและโซเดียมอัลจิเนตที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่ปริมาณต่างๆ..... | 57 |
| ก.1 สเปกตรัมของสูตร St..... | 65 |
| ก.2 สเปกตรัมของสูตร StCa0.1..... | 65 |
| ก.3 สเปกตรัมของสูตร StCa0.5..... | 65 |
| ก.4 สเปกตรัมของสูตร StCa1.0..... | 66 |
| ก.5 สเปกตรัมของสูตร StCi0.1..... | 66 |
| ก.6 สเปกตรัมของสูตร StCi0.5..... | 66 |
| ก.7 สเปกตรัมของสูตร StCi1.0..... | 67 |
| ก.8 สเปกตรัมของสูตร StAg..... | 67 |
| ก.9 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1..... | 67 |
| ก.10 สเปกตรัมของสูตร StAgCi0.1..... | 68 |
| ก.11 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1Ci0.1..... | 68 |
| ก.12 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1Ci0.3..... | 68 |
| ก.13 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1Ci0.5..... | 69 |
| ก.14 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1Ci1.0..... | 69 |
| ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร St..... | 76 |
| ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAg..... | 76 |
| ง.3 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1..... | 77 |
| ง.4 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.5..... | 77 |
| ง.5 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa1.0..... | 78 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| ง.6 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCi0.1 | 78 |
| ง.7 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCi0.5 | 79 |
| ง.8 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCi1.0 | 79 |
| ง.9 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1 | 80 |
| ง.10 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCi0.1 | 80 |
| ง.11 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1Ci0.1 | 81 |
| ง.12 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1Ci0.3 | 81 |
| ง.13 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1Ci0.5 | 82 |
| ง.14 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAgCa0.1Ci1.0 | 82 |

คำย่อ/สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|----------------|--|
| St | ฟิล์มที่มีแต่แป้งข้าวเพียงอย่างเดียว กลีเซอรอล 3 ml. |
| StCa0.1 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. |
| StCa0.5 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 ml. |
| StCa1.0 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1.0 ml. |
| StCi0.1 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StCi0.5 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.5 ml. |
| StCi1.0 | ฟิล์มแป้งข้าว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. |
| StAg | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 และกลีเซอรอล 3 ml. |
| StAgCa0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. |
| StAgCi0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80 : 20 กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StAgCa0.1Ci0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StAgCa0.1Ci0.3 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.3 ml. |
| StAgCa0.1Ci0.5 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.5 ml. |
| StAgCa0.1Ci1.0 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันนี้โลกกำลังประสบกับปัญหาสภาวะโลกร้อน ประกอบกับการขาดแคลนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมี จึงได้มีงานวิจัยคิดค้นและพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable polymer) เพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง วัสดุที่ได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างมาก คือ แป้ง (starch) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่ายและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

การพัฒนาแป้งให้มีสมบัติคล้ายพลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ นำแป้ง 6-15 % มาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยใช้เป็นสารตัวเติม^[1] นำแป้งมาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เช่น ไคโตซาน เซลลูโลส เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ^[2] การใส่สารเคมีดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน -OH ของแป้ง^[3] หรือการตอกริงมอนอเมอร์บนโครงสร้างของแป้ง^[4]

แป้งที่ปรับปรุงแล้วเหล่านี้นำมาใช้ทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร (Food Industry) โดยทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร (Food Packaging) หรือฟิล์มที่สามารถกินได้ (Edible Films) เพื่อทดแทน LDPE ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาขยะล้นเมือง^[5] โดยลักษณะของบรรจุภัณฑ์อาหารที่เราต้องการ คือลดการสูญเสียของอาหาร รักษาความสด และปลอดภัยต่อผู้บริโภค^[6] ทางด้านการเกษตรแป้งที่ปรับปรุงดัดแปรสามารถนำมาใช้ได้ 3 ด้าน ได้แก่ หลังคาเรือนเพาะชำต้นไม้ คลุมดินและปุ๋ย^[7] และทางด้านการแพทย์ (Medical field) ใช้ทำวัสดุเชื่อมต่อกระดูก วัสดุปลดปล่อยยา เช่น ทำไฮโดรเจล และเนื้อเยื่อโครงสร้าง^[8]

จากการสำรวจงานวิจัยพบว่ามีการใช้แป้งชนิดต่างๆเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคู และแป้งมันเทศ แต่แป้งที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่งคือ แป้งถั่วเขียว (Mung bean Starch) ซึ่งเป็นแป้งที่สกัดมาจากถั่วเขียว เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะข้นค่อนข้างใส เมื่อพักให้เย็นจะจับตัวเป็นก้อนแข็งอยู่ตัวค่อนข้างเหนียว ถั่วเขียวเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกได้ดีในเขตร้อน แหล่งปลูกส่วนใหญ่จะอยู่ในเอเชีย สำหรับประเทศไทย ถั่วเขียวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ไม่ได้ปลูกเป็นพืชหลักแต่ปลูกเป็นพืชประกอบร่วมกับพืชอื่นๆ ถั่วเขียวเป็นพืชตระกูลถั่วที่เกษตรกรให้ความสนใจที่จะทำการเพาะปลูกมากดังนั้นจึงมีการวิจัยเพื่อนำแป้งถั่วเขียวมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น^[9] ซึ่งในงานวิจัยนี้ นำแป้งถั่วเขียวมาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ชนิดอื่น คือโซเดียมอัลจิเนต เพื่อพัฒนาเป็นฟิล์มไฮโดรเจลผสม

ไฮโดรเจล เป็นพอลิเมอร์ชนิดขบบน้ำที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติที่สามารถดูดซับน้ำได้มากเนื่องจากสามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ขบบน้ำ เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH-, NH₂ และ -SOH เป็นต้น โดยระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่างๆในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมาก และเมื่อโมเลกุลมีการรวมตัวกันและขดตัวอยู่จะทำให้โครงสร้างโดยรวมเกิดเป็นรูพรุนและร่องขนาดเล็กรวมๆกัน จึงทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับน้ำ และของเหลวทางชีวภาพ^[10]

อัลจินเตเป็นเกลือของกรดอัลจินิก เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ไม่มีความเป็นพิษ สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล สามารถรวมตัวในน้ำได้ดี อัลจินเตสามารถใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการทำฟิล์ม และสารเคลือบ เพราะด้วยลักษณะเด่นที่เป็นคอลลอยด์ และสมบัติในการก่อตัวเป็นเจล (Gel-forming) และมีสมบัติเฉพาะตัว โดยสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะได้ เช่น แคลเซียมไอออน ในตัวกลางที่เป็นของเหลว ทำให้ได้เจลที่แข็งแรง และเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ^[11] เนื่องจากมีงานวิจัย^[12] ศึกษาสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจินเตโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยงซึ่งพบว่าสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้เรียบสวย ไม่หดตัว มีความยืดหยุ่นดี สำหรับงานวิจัยนี้ได้เพิ่มกรดซิตริกในฟิล์มผสมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งเพิ่มสมบัติการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์^[13] และเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงสามารถนำไปใช้งานและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เตรียมและศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มผสม จากสารละลายแป้งข้าวและสารละลายโซเดียมอัลจินเต (Sodium alginate) ที่ใช้สารเติมแต่งสองชนิดคือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมฟิล์มจาก 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวและ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจินเต อัตราส่วนของสารละลายแป้ง : สารละลายโซเดียมอัลจินเต คือ 80 : 20 โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใช้ 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริก เป็นสารเติมแต่งของฟิล์มแป้งข้าวและฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจินเต นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติการบวมน้ำ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยเปรียบเทียบอิทธิพลของสารเติมแต่งทั้งสองชนิด เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร และทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มจากของผสมระหว่างสารละลายแป้งถั่วเขียวกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความแข็งแรงพอที่จะใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ใช้เป็นฟิล์มห่อผลไม้ และทราบถึงผลของการใช้สารเติมแต่งสองชนิดที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง (Starch)

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่สำคัญ พบได้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น ราก ลำต้น และเมล็ด แป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว อาจจะไม่มันและกลื่น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 1-100 ไมครอน หรืออาจมากกว่านี้ขึ้นกับแหล่งที่มาของแป้ง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนิด เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น ถึงแม้ว่าบทบาทที่สำคัญของแป้ง คือใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากคุณสมบัติเฉพาะของแป้งจึงได้มีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมการคงตัว และเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุป และน้ำปรุงรสอาหาร เพื่อป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) สภาวะกรด การทำพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) เป็นต้น นอกจากนี้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว ยังมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมแป้งตัดแปรรูป เป็นต้น เพราะสามารถควบคุมคุณภาพได้ง่ายอีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและราคาถูก^[11]

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

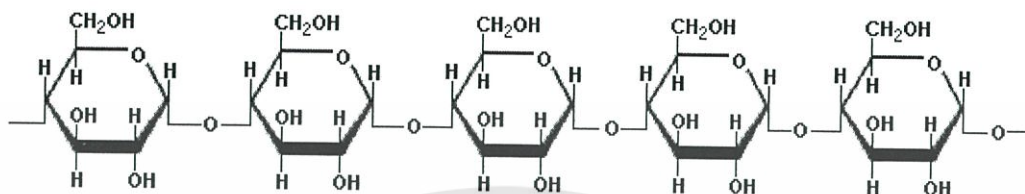
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส และ อะไมโลเพคติน วางตัวในแนวรัศมี โดยทั่วไปแป้งจะมีองค์ประกอบของอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส โดยอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินเป็นประมาณ 30 ต่อ 70 หรือ 20 ต่อ 80 ขึ้นกับชนิดของแป้ง อัตราส่วนที่ต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งจึงทำให้แป้งที่มาจากแหล่งที่ต่างกันมีคุณสมบัติแตกต่างกัน^[11]

องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

1. อะไมโลส (amylose)
2. อะไมโลเพคติน (amylopectin)
3. สารตัวกลาง (intermediate material)

1. อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา - 1,4 ($\alpha - 1,4$) มีสูตรโครงสร้างดังภาพ



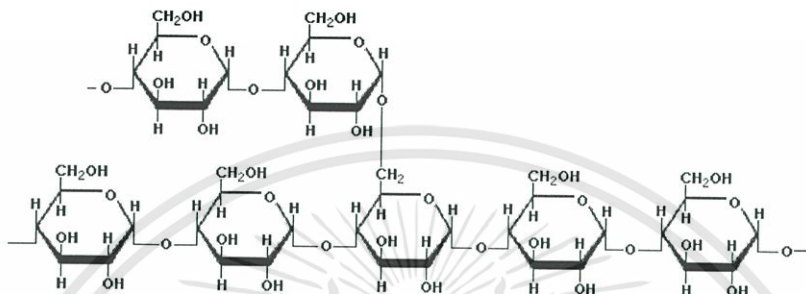
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส^[14]

แป้งจากธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28 % แป้งจากรากและหัวมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าประมาณ 20 % น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง

จากโครงสร้างของอะไมโลส พบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จำนวนมากซึ่งส่งผลให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำและสามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นไม่มีโซ่กิ่ง มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก อะไมโลสจึงมีแนวโน้มในการจัดเรียงตัวขนานและชิดกันทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน ด้วยสาเหตุนี้ความชอบน้ำของโมเลกุลอะไมโลสจึงลดลง ทำให้ของผสมระหว่างอะไมโลสกับน้ำซึ่งอยู่ในลักษณะโซล (Sol) ชุ่มชื้น ในสภาวะที่สารละลายเจือจางอะไมโลสมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดการตกตะกอน ในสภาวะที่สารละลายเข้มข้นอะไมโลสจะมีความเกาะก่กันและกันจึงรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้อยู่ชิดติดกัน ดังนั้นอะไมโลสจึงมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้เพียงบางส่วนทำให้มีปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่จำนวนมากซึ่งน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปและสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะไมโลส เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติในรูปของเจล (Gel)

2. อะไมโลเพคติน (amylopectin)

เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงของหมู่กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 มีสูตรโครงสร้างดังภาพ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะไมโลเพคติน^[14]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำเนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพคติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนอะไมโลส อะไมโลเพคติน และสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น^[11]

2.1.3 สมบัติของแป้ง

2.1.3.1 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและความหนืดมากขึ้น พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็วทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) อาจลดลงหรือคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดแป้งและมีขึ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลของอะไมโลส

กับอะไมโลเพกทินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีค่ามากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง เมื่อลดอุณหภูมิลงโมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา โดยเฉพาะในส่วนของอะไมโลสถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมไม่สั้นและไม่ยาวจนเกินไปจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ และกักน้ำไว้ทำให้มีความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับมาสูงอีกเรียก Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพกทิน อุณหภูมิ ฯลฯ^[11]

2.1.3.2 การดูดซับน้ำและการเกิดเจลของแป้ง

กระบวนการเกิดเจลของแป้งเป็นการผสมแป้งลงในน้ำและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งสลายออก ทำให้ตำแหน่งที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ ไฮโดรเจนและ/หรือออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแป้งเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำที่แพร่เข้าไปในโครงสร้างของแป้งยังมีปริมาณมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้จำนวนและขนาดของผลึกลดลงโดยปกติบริเวณที่มีความเป็นผลึก น้ำจะไม่สามารถแพร่เข้าไปได้ แต่ถ้าให้ความร้อนแก่ระบบน้ำก็จะสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึกได้ และทำให้โมเลกุลแยกออกจากกันที่สุดในบริเวณที่เป็นผลึกนี้จะเปลี่ยนรูปไปเป็นอสัณฐาน

เนื่องจากแป้งมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้ในปริมาณหนึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูงหรือขณะที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้แป้งเกิดการบวมตัวขึ้นอย่างไรก็ตามแป้งก็สามารถหดตัวกลับไปที่ขนาดเดิมได้ถ้าปริมาณความชื้นลดลงหรือทำให้แห้ง เมื่อให้ความร้อนแก่ของผสมระหว่างแป้งกับน้ำ (slurry) จนถึงอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของแป้งแต่ละชนิดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้งซึ่งมีบทบาททำให้เกิดการรวมตัวและจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีค่าอ่อนลง ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งและล้อมรอบส่วนที่เป็นโครงสร้างเชิงเส้นของอะไมโลเพกทิน โมเลกุลของอะไมโลเพกทินจะเริ่มบิดเป็นเกลียวขด (helix or coils) เม็ดแป้งก็จะดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้างและสามารถบวมตัวได้หลายเท่า ในระหว่างที่เกิดการบวมตัวนี้ อะไมโลสมีแนวโน้มที่จะถูกชักออกมาจากเม็ดแป้งในขณะที่อะไมโลเพกทินดูดซับน้ำเข้าไปในปริมาณมาก ของผสมที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยในช่วงเริ่มต้นเริ่มใสขึ้นและความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่โครงสร้างของแป้งสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gellatinization)

ถ้าให้ความร้อนต่อไปจากช่วงอุณหภูมิที่เกิดเจลเม็ดแป้งก็จะแตกออก โมเลกุลอะไมโลสในแป้งจะหลุดออกมาส่งผลให้ความหนืดลดลง ของผสมจะอยู่ในรูปของโซล (sol) และมีลักษณะเป็นกาวเหนียว เมื่อปล่อยให้ของผสมเย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ โดยเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนจนเกิดเป็นร่างแหขึ้น โซลจะเปลี่ยนรูปเป็นเจลถ้าความเข้มข้นของแป้งในสารผสมมีค่ามากพอ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เมื่อลด

อุณหภูมิของอีกโครงสร้างของแป้งจะเกิดการจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น น้ำที่อยู่ในโครงสร้างของแป้งจะถูกผลักรวมออกนอกเจล ทำให้เจลมีลักษณะขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น^[10]

2.2 แป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch)

2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วเขียว

- ชื่ออื่น : ถั่วจิม (เชียงใหม่) ถั่วมุ่ม (ภาคเหนือ) ถั่วดำ ถั่วเขียว ถั่วทอง (ไทย-ภาคกลาง)
- ชื่อสามัญ : Mung Bean, Mung, Green Bean
- ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Phaseolus Aureus Roxb*
- ลักษณะทั่วไป
- ต้น : เป็นพรรณไม้ล้มลุกเนื้ออ่อนและจะมีอายุเพียงไม่เกิน 1 ปี ลำต้นมีสีน้ำตาลและแตกกิ่งก้านสาขา
- ใบ : เป็นใบรวมประกอบด้วยใบย่อยประมาณ 3 ใบ ฐานใบจะกว้างตรงปลายใบจะแหลม
- ดอก : มีสีเหลือง
- ผล : เป็นฝักและมีขนสีน้ำตาลอยู่ทั่วฝัก ฝักจะมีความยาวประมาณ 6-10 ซม. ส่วนเมล็ดจะมีสีต่างกัน อาจมีสีเขียวหรือสีเหลือง
- ถิ่นที่อยู่ : พรรณไม้นี้มักจะปลูกทั่วไปในเขตร้อน โดยเฉพาะประเทศจีน อินเดีย มาเลเซีย ในบางประเทศบางท้องถิ่นก็นิยมปลูกกันในนา
- สรรพคุณ : รสหวาน ช่วยขับร้อน ถอนพิษ ขับของเหลวในร่างกาย บำรุงสายตา ลดความดันโลหิต มีประโยชน์ต่อลำคอและผิวหนัง รักษาอาการกระหายน้ำ ไตอักเสบ หรือลำไส้อักเสบ ไข้หวัด ผื่นคัน เบาหวาน พิษจากพืชและสารหนู ช่วยกระตุ้นประสาทเจริญอาหาร มีแคลเซียม ฟอสฟอรัส และเหล็ก มักทำเป็นเครื่องดื่มแก้ร้อนใน และแก้พิษในฤดู ผู้ที่มีลมและกระเพาะอาหารอ่อนแอ ถ่ายอุจจาระบ่อยหรือท้องเดินควรกินแต่น้อย

2.2.2 ชนิดแป้งถั่วเขียว

แป้งที่สกัดมาจากถั่วเขียว เมล็ดแห้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สามารถทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำด้วยไฟอ่อนปานกลาง แป้งละลายง่าย สุกง่าย ชื่นเร็ว เมื่อสุกแล้ว แป้งมีลักษณะเหนียวใส ไม่ติดภาชนะ เมื่อเย็นสนิทจะรวมเป็นก้อนแข็งอยู่ตัว ใส แป้งถั่วเขียวมีอยู่ 2 ลักษณะ ซึ่งมีประโยชน์ที่แตกต่างกันดังนี้

- **แป้งข้าวัดดแปร** เป็นแป้งข้าวัดที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปเหมาะสำหรับทำอาหารที่ต้องการความใส อยู่ตัว เช่น สาหรืม ขนมลืมกลืน ตะโก้
- **แป้งข้าวัดธรรมชาติ** เป็นแป้งที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นเส้นหรือก๋วยเตี๋ยวเซีงไฮ้ และอาหารแบบตะวันออก (oriental foods)^[15]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวัด^[16]

| องค์ประกอบ | ร้อยละ |
|--------------------|--------|
| ความชื้น | 9.49 |
| คาร์โบไฮเดรต | 3.20 |
| โปรตีน | 22.26 |
| ไขมัน | 0.33 |
| เส้นใย | 0.53 |
| เถ้า | 3.20 |
| ปริมาณอะไมโลส | 37.90 |
| ปริมาณอะไมโลเพกติน | 62.10 |
| อื่นๆ | 0.90 |

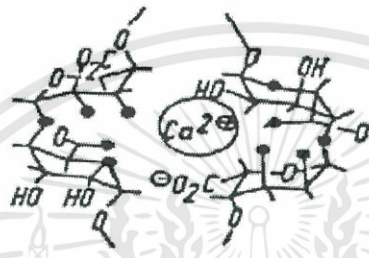
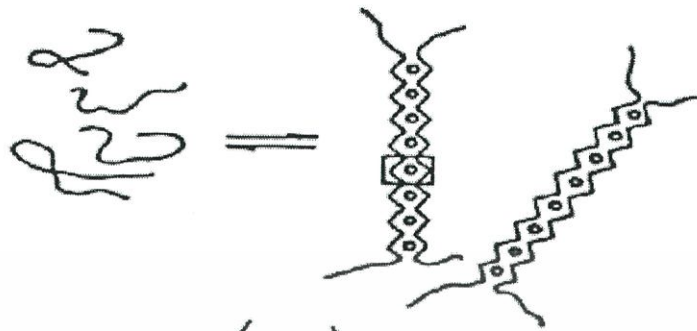
2.3 อัลจิเนต (Alginate)

2.3.1 แหล่งที่มาของอัลจิเนต

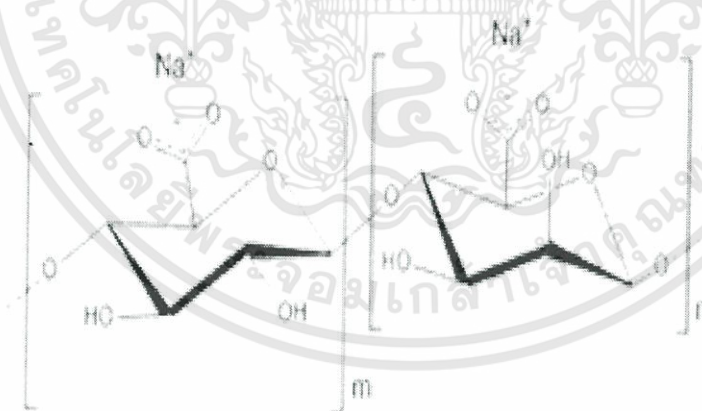
อัลจิเนต หรือ อัลจิ้น (Algin) เป็นสารสกัดที่ได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตในอุตสาหกรรมสาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ มาโครคิสทิส พายริเฟร่า (Macrocystis pyrifera) มีอัลจิ้นประมาณ 14-19 % ลามินาเรีย คัสโทนี (Laminaria cloustonii) และลามินาเรีย ดิจิตาต้า (Laminaria digitata) มีอัลจิ้นประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบขึ้นอยู่กับชนิดสาหร่าย ฤดูกาลสาหร่าย และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต

อัลจิเนต เป็นอันบลานไบนารีโคพอลิเมอร์ (Unbranched binary copolymer) ของกรด 1,4 เบตา-D-มานูโลนิค (1,4- β -D-manulonic acid (M)) และ กรดแอลฟา-แอล-กูรูโลนิค (α -L-gululonic acid (G)) ดังรูป 2.3a ในโมเลกุลประกอบด้วยบริเวณหน่วยของพอลิเมอร์ที่ซ้ำๆกันเพียงชนิดเดียว (Homopolymeric regions) ของ G และ M ที่เรียกว่า G-blocks และ M-blocks ตามลำดับ และมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น M-G Blocks ดังรูป 2.3b และ 2.3c สัดส่วนของ



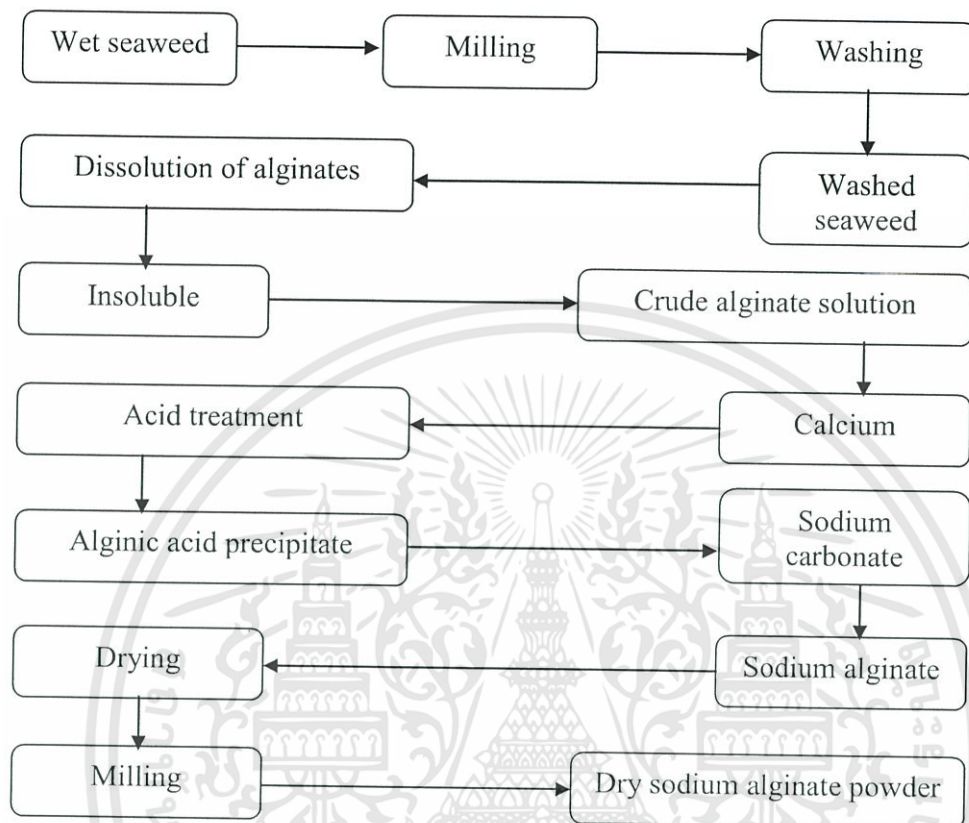
รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model)^[17]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต (Structure of sodium alginate)^[17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 กระบวนการผลิตโซเดียมอัลจิเนต



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตโซเดียมอัลจิเนต ^[18]

2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ $-OH$, $-COOH$, $-CONH_2$, $-CONH-$ และ $-SO_3H$ เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่ $-CH_2-$ และ $-CH_3$ เป็นต้น ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากมาย และโมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็กๆมากมาย สมบัติเด่นของไฮโดรเจล คือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) ดังรูป 2.7 พร้อมกับสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนั้นยังไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิด

การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะของการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

ก) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film)

ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มมักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.8 (ก)

ข) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)

ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมจากการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) ระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ (Monomer) ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.8 (ข)

ค) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการ เพื่อเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า หรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำ เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.8 (ค)

ง) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN)

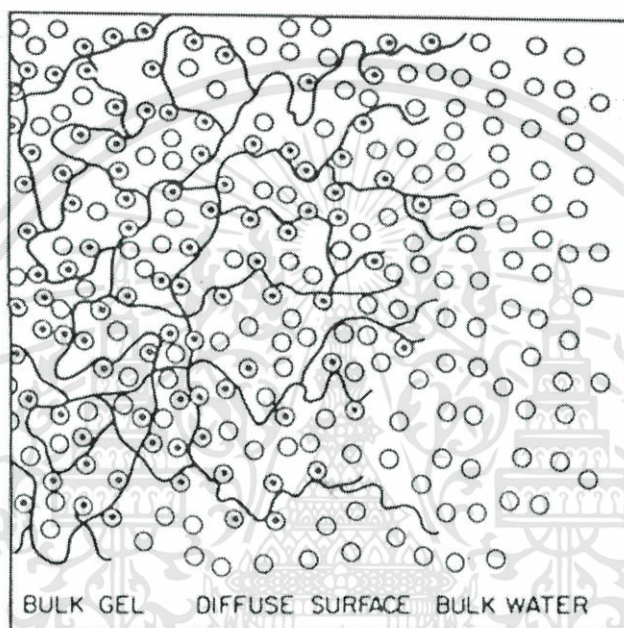
ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.8 (ง)

นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตเรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือสามารถพองตัวได้ แต่ไม่ละลายในน้ำเนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำ โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกันได้

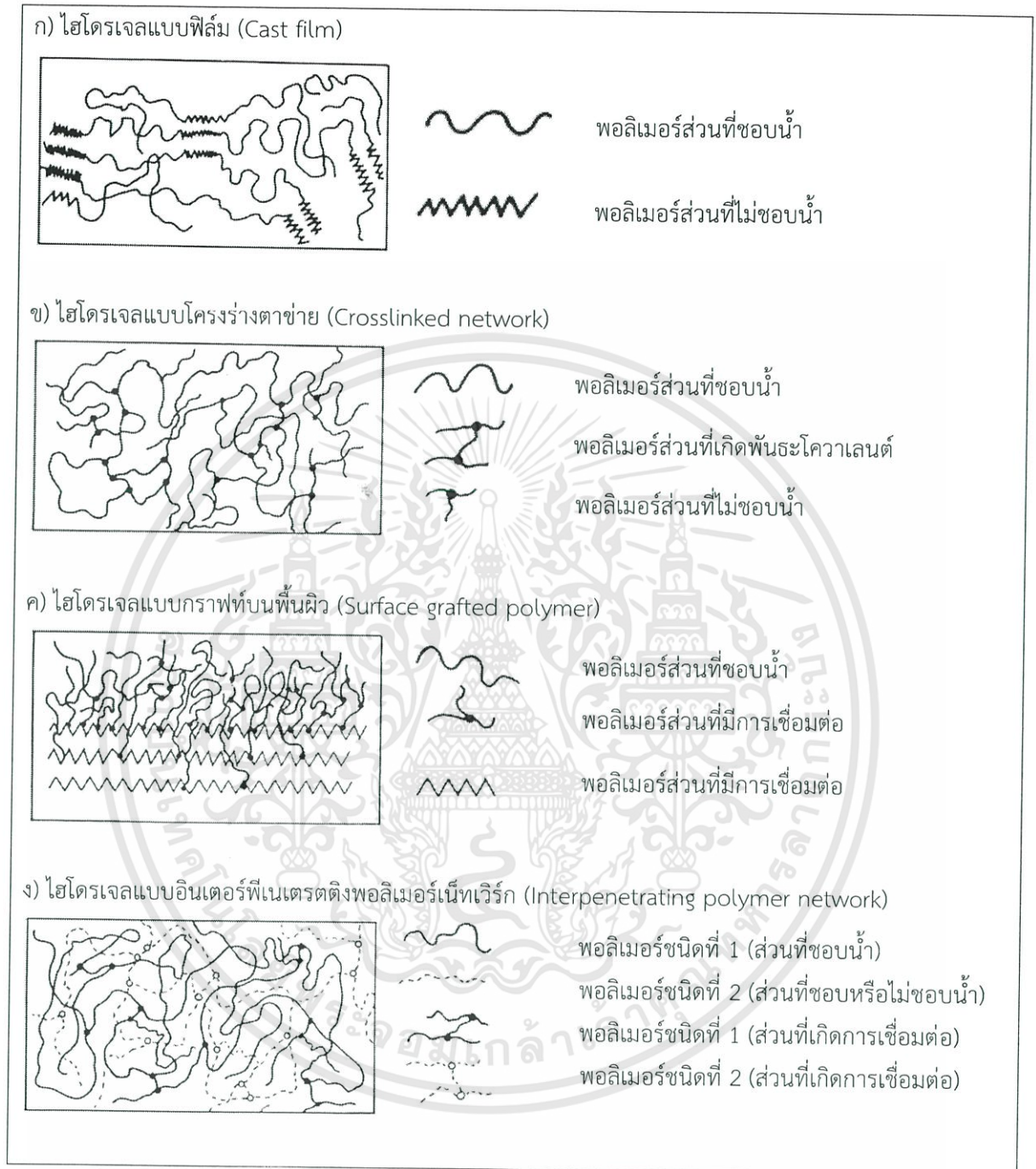
เนื่องจากภายในจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ไว้ การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว

สมบัติที่สำคัญอีกประการของไฮโดรเจลคือ การยอมให้มีการแพร่ผ่านของโมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำ โปรตีน ยา หรือแม้แต่ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านทางการแพทย์^[9]



คือ สายโซ่พอลิเมอร์
คือ น้ำโมเลกุลอิสระ
คือ โมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์

รูปที่ 2.7 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล^[16]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์^[16]

2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ คือสารเติมแต่ง (Additive) ที่ใส่ลงในกระบวนการผลิตพลาสติกเพื่อให้มีสมบัติเปลี่ยนไป คือมีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นสูง ทนต่อสภาวะความเป็นกรดต่าง ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องมือทางการแพทย์ ของเล่นสำหรับเด็ก เป็นต้น โดยสารเหล่านี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกแต่จะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติก ซึ่งทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง

2.5.1 ประโยชน์ของพลาสติไซเซอร์

1. เพิ่มความสามารถในการไหล ลดจุดหลอมที่ทำให้เกิดการไหล (Flexing temperature) ของพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกมีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มขึ้นสะดวกต่อการดัดรีด ฉาบหรือหล่อแบบ
2. เพิ่มความอ่อนตัว (Softness) เป็นตัวรักษาความอ่อนนุ่มไม่ให้เสียไปโดยง่าย ลดจุดอ่อนตัว (Softening point)
3. เพิ่มความสามารถในการดึงให้ยืดออก (Extensibility)
4. ลด Cold flex temperature อุณหภูมิซึ่งพอลิเมอร์จะสูญเสียความยืดหยุ่นไปหมด ($T < T_{cold\ flex}$)
5. ลดความทนแรงดึง และแรงอัด
6. เพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทก
7. เป็นฉนวนไฟฟ้า
8. ทนต่อกรดต่าง น้ำมัน และผงซักฟอกโดยจะใส่ประมาณ 20-40 % โดยน้ำหนัก^[10]

2.6 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride : CaCl_2)

แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวใช้มากในงานอุตสาหกรรมทั่วไป อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเกษตร เป็นสารที่ดูดซับความชื้น และละลายได้ดีในน้ำ เมื่อละลายน้ำจะเกิดกรดไฮโดรคลอริกและเกิดแคลเซียมประจุบวกมักใช้ในรูป $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ^[15]

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์^[15]

| รายการ | สมบัติ |
|-------------------------|---|
| สถานะ | ของแข็งสีขาวเงิน |
| จุดหลอมเหลว | 851 °C |
| ความร้อนในการหลอมเหลว | 2.23 kcal/mol |
| จุดเดือด | 1482 °C |
| ความร้อนในการกลายเป็นไอ | 36.7 Kcal/mol ที่ 1482 °C |
| ความหนาแน่น | 1.54 g/cc ที่ 20 °C |
| ความร้อนเมื่อเผาไหม้ | 151.9 cal/g |
| การละลาย | ละลายได้ดีในน้ำ ได้กรดแก๊สไฮโดรคลอริก ดังสมการ $\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaO} + 2\text{HCl}$ |

2.6.1 การผลิตแคลเซียมคลอไรด์

แคลเซียมคลอไรด์ส่วนใหญ่ได้มาจากระบวนการเตรียมโซดาแอช (Na_2CO_3)

2.6.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์

- งานเทคนิคกริด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งการแข็งตัวและเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นๆ
- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ นิยมใช้รักษาและยืดอายุผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผักผลไม้หลายชนิดโดยการฉีดพ่นสารละลายทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว หรือจุ่มผลผลิตในสารละลายโดยตรง
- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์สำหรับดูดซับความชื้นหรือดูดซับน้ำออกจากตัวทำละลาย
- ในอุตสาหกรรมอาหารผลไม้กระป๋อง นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มความกรอบให้แก่ผลไม้
- ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพิ่มความนุ่มของผลิตภัณฑ์เนื้อต่างๆ เช่น เนื้อโค เนื้อไก่ เป็นต้น
- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร
- ในอุตสาหกรรมอาหารบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มรสชาติและสกัดโปรตีนออกจากเนื้อ เช่น การผลิตไส้กรอก การผลิตเนื้อหมัก^[15]

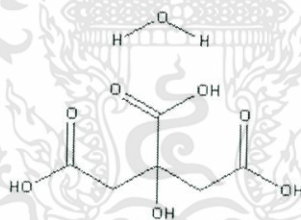
2.7 กรดซิตริก (citric acid)

กรดซิตริก (citric acid) เป็นกรดอินทรีย์ (organic acid) มีสมบัติเป็นกรดอ่อน (weak acid) มีสูตรโมเลกุล $C_6H_{10}O_8$ พบตามธรรมชาติในอาหารหลายชนิดได้แก่ พืชตระกูลส้ม (citrus) เช่น ส้ม มะนาว และผลไม้หลายชนิด มะนาวมีกรดซิตริกเป็นส่วนประกอบ 7-9 เปอร์เซ็นต์ กรดซิตริกเคยผลิตจากน้ำมะนาว ปัจจุบันกรดซิตริกส่วนใหญ่ผลิตจากเชื้อรา *Aspergillus niger* โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักคือกากน้ำตาล 2-Hydroxy-1,2,3-propane-tricarboxylic acid นิยมใช้กรดซิตริกเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ที่ใช้อย่างกว้างขวางในอาหารและเครื่องดื่ม

กรดซิตริกที่ผลิตในปัจจุบันอยู่ในรูปผลึก Monohydrate ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) ซึ่งมีน้ำประกอบอยู่ในโครงสร้างหนึ่งโมเลกุล มีสีใส ไม่มีกลิ่น มีรสเปรี้ยว และมีความสามารถละลายในน้ำเย็นได้ดี^[20]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของกรดซิตริก^[20]

| รายละเอียด | Anhydrous | Monohydrate |
|------------------|-----------|-------------|
| Molecular Weight | 192.12 | 210.14 |
| Specific Gravity | 1.665 | 1.542 |
| Melting Point | 153 °C | 70-75 °C |
| Boiling Point | - | 175 °C |



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของ citric acid monohydrate^[20]

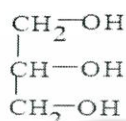
หน้าที่ในอาหาร

- กรดซิตริกใช้เพื่อปรับภาวะความเป็นกรด โดยปรับค่าพีเอชของอาหารให้เป็นอาหารปรับกรด (acidified food) ความเข้มข้น 5 % มีค่าพีเอชเท่ากับ 1.87
- ปรับแต่ง กลิ่นรส (flavoring agent) ปรับให้อาหารมีรสเปรี้ยว ใช้ในเครื่องปรุงรส (seasoning) ลูกอม ลูกกวาด acid regulator
- เป็นสารกันหืน (antioxidant) เป็นสารกันเสีย (preservative)
- เป็นสารจับโลหะ (chelating agent)
- เป็นสารทำความสะอาด (cleaning agent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กlycerol (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) หมายถึงสารจำพวกโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ มีสูตรเคมี $C_3H_8O_3$ มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-Propantriol) และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างกลีเซอรอล (Glycerol)^[18]

2.8.1 สมบัติของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาลจึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากในโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 °C ที่ความดันบรรยากาศ กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้ง ฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน (เช่น ไพรีดีน ควิโน-ลีน) กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกแฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สมบัติของกลีเซอรอล^[18]

| Property | Value |
|--|---|
| Molecular weight | 92.09 |
| Melting pint | 18.0 °C |
| Boiling point (101.3 kPa) | 290.0 °C |
| Density (20 °C) | 1.261 g/cm ³ |
| Refractive index,nD | 1.474 |
| Dynamic viscosity (20 °C) | 1.410 Pa.s |
| Compressibility (28.5 °C) | 2.1×10 ⁻⁴ MPa ⁻¹ |
| Gravity coefficient of thermal expansion (15-20 °C) | 0.000615 K ⁻¹ |
| Surface tension (20 °C) | 63.4 mN/m |
| Diffusion coefficient of water into glycerol (20 °C) | 1.336×10 ⁻¹¹ m ² /s |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 Narendra Reddy and Yiqi Yang (2010) งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมโยงของแป้งโดยใช้กรดซิตริก 5 % เพื่อปรับปรุงสมบัติการดึงยึด สมบัติทางความร้อน และลดการละลายของฟิล์มในน้ำและกรดฟอร์มิก เนื่องจากในสารเชื่อมโยงอื่นๆที่ใช้เชื่อมโยงแป้งมีราคาแพง เป็นพิษ และไม่ได้สมบัติตามต้องการงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กรดซิตริกในการเชื่อมโยง ผลการทดลองพบว่าแป้งที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าแป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยง และเมื่อนำไปทดสอบการละลายโดยแช่แผ่นฟิล์มในกรดฟอร์มิกพบว่าน้ำหนักหายไปประมาณ 15-25 % หลังจากแช่เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C ในขณะที่แป้งที่ไม่ได้เชื่อมโยงละลายในทันที และพบว่าแป้งที่เชื่อมโยงมีการละลายน้ำลดลง มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นและมีการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเล็กน้อย^[21]

2.9.2 กิตติพงษ์ พัฒนา และภาชิต อนุตระกูลชัย (2552) ศึกษาวิธีการเตรียมแป้งถั่วเขียวตัดแปรไฮดรอกซีพอลิคาร์บอกซีเมทิล และศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เตรียมไว้ การตัดแปรแป้งถั่วเขียวทำให้ได้แป้งถั่วเขียวตัดแปร 2 แบบ ได้แก่ แป้งถั่วเขียวตัดแปรชั้นตอนเดียว คือแป้งถั่วเขียวตัดแปรคาร์บอกซีเมทิล (ซีเอ็มเอ็มเอส) และแป้งถั่วเขียวตัดแปร 2 ชั้นตอน คือแป้งถั่วเขียวตัดแปรไฮดรอกซีพอลิคาร์บอกซีเมทิล (เอชพีซีเอ็มเอ็มเอส) และแป้งถั่วเขียวตัดแปรคาร์บอกซีเมทิลไฮดรอกซีพอลิ (ซีเอ็มเอชพีเอ็มเอ็มเอส) จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ค่าระดับการแทนที่ (ดีเอส) ของแป้งตัดแปรวัดได้ 0.25 0.27 และ 0.31 สำหรับแป้งซีเอ็มเอ็มเอส แป้งเอชพีซีเอ็มเอ็มเอส และแป้งซีเอ็มเอชพีเอ็มเอ็มเอส เรียงตามลำดับ ส่วนค่าโมลาร์การแทนที่วัดได้ 0.05 และวัดค่าได้น้อยมาก สำหรับแป้งเอชพีซีเอ็มเอ็มเอส และแป้งซีเอ็มเอชพีเอ็มเอ็มเอส ตามลำดับ การส่องจุลทรรศน์กล้องอิเล็กตรอน (เอสอีเอ็ม) และการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (เอ็กซ์อาร์ดี) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่ใช้ในการตัดแปรไม่ได้เปลี่ยนแปลงลักษณะและโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งถั่วเขียวตัดแปรทั้ง 3 ชนิดละลายน้ำ โดยค่าความหนืดปรากฏที่อัตราการเขย่าเท่ากับ 100 เรียงจากมากไปน้อย คือ แป้งซีเอ็มเอ็มเอส แป้งเอชพีซีเอ็มเอ็มเอส และแป้งซีเอ็มเอชพีเอ็มเอ็มเอส ค่าการดูดน้ำของแป้งเอชพีซีเอ็มเอ็มเอสใกล้เคียงกับค่าการดูดน้ำของแป้งซีเอ็มเอชพีเอ็มเอ็มเอส ซึ่งมากกว่าค่าการดูดน้ำของแป้งซีเอ็มเอ็มเอสอย่างมีนัยสำคัญ^[22]

2.9.3 ชัยวุฒิ วัตจิง และคณะ (2556) ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลเชื่อมขวางแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi-Interpenetrating polymer network, semi-IPN) ของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง (Semi-IPN NR/ST) เตรียมด้วยวิธีการผสมน้ำยางข้นและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเจลาติไนซ์ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และ N,N'-Methylene-Bis-Acrylamide (MBA) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและสารเชื่อมขวาง ตามลำดับ งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณ MBA ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำและเสถียรภาพทางความร้อนของ Semi-IPN NR/ST จากการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณของ MBA โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ Semi-IPN NR/ST ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม MBA โดยให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำสูงสุดประมาณ 90 % เมื่อเติม MBA 1.0 phr

ในขณะที่เสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MBA เนื่องจากความหนาแน่นของพันธะ การเชื่อมขวางในโครงสร้างของ Semi-IPN NR/ST เป็นผลให้การเสื่อมสภาพทางความร้อนของ Semi-IPN NR/ST เกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้ดูดซึมน้ำเอาไว้ในโครงสร้าง Semi-IPN NR/ST ได้ใน ปริมาณน้อยลง^[23]

2.9.4 พิสูจน์พันธุ์ กายูจันเตชะ และคณะ (2554) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผล ของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติเชิงกล และการต้านการซึมผ่านน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียว ตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AMS) โดยใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น ผล การศึกษาพบว่าแผ่นฟิล์ม AMS มีลักษณะโปร่งใส มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะและ ความสามารถในการยืดเท่ากับ 48.33 ± 1.44 MPa และ 17.88 ± 0.18 % ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ แผ่นฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC E15LV) สำหรับแผ่นฟิล์ม AMS ที่ใช้ซอร์บิทอลเป็น สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณ 30 % ของน้ำหนัก AMS มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าแผ่นฟิล์ม AMS การละลายในน้ำน้อยกว่าแผ่นฟิล์ม HPMC E15LV และสามารถต้านการซึมผ่านน้ำได้ดี จึงสรุปได้ว่า ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม AMS ซึ่งควรศึกษาการใช้ ประโยชน์ของแผ่นฟิล์ม AMS ต่อไป^[24]

2.9.5 กฤติกา บุรณโชคไพศาล (2556) แป้งถั่วเขียวเพาะงอกมีโปรตีนร้อยละ $30.66 + 0.07$ และสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเส้นจากแป้งถั่วเขียวเพาะงอก ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทาง กายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อแผ่นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากแป้งถั่วเขียวเพาะ งอก ซึ่งใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำ และสัดส่วนแป้งต่างๆ กันรวม 6 สูตร พบว่า แผ่นก๋วยเตี๋ยวจาก แป้งถั่วเขียวเพาะงอกทั้ง 6 สูตร มีสีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแผ่นก๋วยเตี๋ยว จากสูตรที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1:3 มีค่า a^* และ b^* สูงกว่าแผ่นก๋วยเตี๋ยวจากสูตรที่ใช้ อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1:4 ทั้งนี้แผ่นก๋วยเตี๋ยวจากสูตรที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อน้ำเป็น 1:3 และมี สัดส่วนแป้งถั่วเขียวเพาะงอกร้อยละ 100 มีค่า L^* สูงที่สุด เมื่อเทียบกับแผ่นก๋วยเตี๋ยวจากสูตรอื่นๆ อย่างไรก็ตาม จากผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคพบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับต่อ ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ทั้งด้านสี กลิ่น ความเหนียว ความนุ่ม และความชอบ โดยรวม^[25]

2.9.6 จุฑาทิพย์ สิ้นสวัสดิ์ และคณะ (2555) งานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ ฟิล์มบริโภคได้ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 5 %w/w ผสมสารพอลิแซ็กคาไรด์ 5 ชนิดคือ คาราจีแนน ไคโตแซน เพคติน อาการ์ และเมธิลเซลลูโลส ความเข้มข้น 0.25 %w/w และเติม พลาสติไซเซอร์ 2 ชนิด คือ ซอร์บิทอล และกลีเซอรอล ความเข้มข้น 30 % และทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพ ได้แก่ อัตราการซึมผ่าน ของไอน้ำ (water vapor transmission rate, WVTR) การละลาย (solubility) ความทนต่อแรงยืด (tensile strength, TS) และการยืดตัว (elongation, E) พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ที่เติมซอร์บิทอลและกลีเซอรอล มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ เท่ากับ 1.31×10^{-4} และ 1.09×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g/cm²/h ตามลำดับ และฟิล์มแข็งสำหรับหลังที่ผสมสารพอลิแซ็กคาไรด์มีค่าอัตราซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนที่ไม่แตกต่างกัน สำหรับความทนต่อแรงยึด และการยึดตัวของฟิล์มแข็งสำหรับหลังผสม อากาโรที่มีซอร์บิทอลเป็นพาสติไซเซอร์มีความทนต่อแรงยึด และการยึดตัวสูงกว่าฟิล์ม แข็งสำหรับหลังชนิดอื่นๆ^[26]

2.9.7 Cheappimolchai, W. และคณะ (2002) ศึกษาฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากโปรตีน ถั่วเขียวและโปรตีนถั่วเหลือง เนื่องจากสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวที่ใช้กลีเซอรอลเป็น พลาสติไซเซอร์ที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้มีค่า tensile strength ต่ำ และมีการซึมผ่านของไอน้ำสูงทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสมบัติของ ฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวและโปรตีนถั่วเหลือง โดยศึกษาสองประเด็น คือนำไปผสมรวมกับแป้ง (แป้งมันสำปะหลัง, แป้งข้าวโพด, แป้งข้าวสาลี และแป้งมันฝรั่ง) และศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ที่ แตกต่างกันได้แก่ glycerol, sorbital, ethylene glycol (EG), diethylene glycol (DEC) และ triethylene glycol (TEG) พบว่า ฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวและถั่วเหลืองที่ผสมกับแป้งมีค่า tensile strength เพิ่มขึ้น ค่า tensile strength ของฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวเพิ่มขึ้นจาก 0.244 ไปอยู่ในช่วง 2.55-3.32 MPa และค่า tensile strength ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นจาก 0.921 ไปอยู่ในช่วง 4.91-6.53 MPa และพบว่าค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำลง ส่วนค่า elongation ไม่ได้เพิ่มขึ้นใน การศึกษาครั้งนี้ และพบว่าเมื่อใช้ sorbital เป็นพลาสติไซเซอร์ค่า tensile strength เพิ่มขึ้น ค่าการ ซึมผ่านของไอน้ำลดลง สำหรับฟิล์มที่ใช้ EG, DEC และ TEG เป็นพลาสติไซเซอร์พบว่ามีค่า tensile strength เพิ่มขึ้นด้วย แต่ยังมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูง^[27]

2.9.8 Saari, V. Kasparkova และคณะ (2012) ทำการศึกษาและตรวจคุณสมบัติเฉพาะ ของการเชื่อมโยงไฮโดรเจลโซเดียมอัลจินเตและเจลาตินโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์และกลูตาโรลดีไฮด์ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงใช้เครื่อง Scanning electron microscopy, Fourier transform infrared (FTIR) และ dynamic mechanical analysis (DMA) ทดสอบสมบัติเฉพาะทางกายภาพ และศึกษาสมบัติการบวมน้ำ (swelling) ผลของ FTIR แสดงสเปกตรัมของ Ca²⁺ เชื่อมโยงไฮโดรเจล โซเดียมอัลจินเตและเจลาตินจะเห็นว่ามีการเกิดพันธะของหมู่คาร์บอกซิลเลื่อนตำแหน่งไปที่เลขคลื่นที่สูงขึ้น ซึ่งให้เห็นว่ามีการเชื่อมต่อกันระหว่างแคลเซียมไอออนและโซเดียมอัลจินเตจริง สำหรับเจลาตินใน โครงสร้างไฮโดรเจลเชื่อมโยงกับกลูตาโรลดีไฮด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของรูปร่าง สเปกตรัม amide I และ amide II จึงสามารถยืนยันได้ว่ากลูตาโรลดีไฮด์สามารถสร้างพันธะเชื่อมโยง กับเจลาตินได้สำเร็จ หลังจากนั้นศึกษา DMA เพื่อพิสูจน์สมบัติวิสโคอิลาสติกและพัฒนาเสถียรภาพ ทางความร้อนเตรียมตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า Ca²⁺ เชื่อมโยงโซเดียมอัลจินเตและเจลาติน โดยใช้ในอัตราส่วน 50:50 พบว่ามีการบวมน้ำและสมบัติวิสโคอิลาสติกที่ดีที่สุด^[28]

2.9.9 Marion Bruchet, Artem Melman (2015) ไฮโดรเจลอัลจินเตที่เชื่อมโยงด้วย แคลเซียมใช้กันแพร่หลายทั้งด้านการขนส่งยา และการใช้งานด้านชีวการแพทย์ต่างๆ พัฒนา กระบวนการเตรียมไฮโดรเจลอัลจินเตที่เชื่อมโยงด้วย Ca²⁺ โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกในเหล็ก (III)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไฮโดรเจลอัลจินตกับเกลือแคลเซียมและโซเดียม การลดประจุของเหล็ก (III) เป็นเหล็ก (II) จะถูกแทนที่ด้วย Ca^{2+} ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยไอออน อีกวิธีหนึ่งคือการแลกเปลี่ยนประจุบวกสามารถทำได้โดยปฏิกิริยาทางแสงของแคลเซียมคลอไรด์ วิธีการนี้จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจลอัลจินตที่เชื่อมด้วยแคลเซียม เหมือนกับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของเหล็ก(III)^[29]

2.9.10 Masoud Rezvanian และคณะ (2016) ศึกษาฟิล์มไฮโดรเจลที่มีศักยภาพดีสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ในส่วนของผ้าปิดแผล ซึ่งได้พัฒนาโดยการใส่สารก่อพันธะเชื่อมโยงในฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่างอัลจินตและเพคติน เพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของผ้าปิดแผล การดูดซึมของเหลวจากแผลและพฤติกรรมการปลดปล่อยตัวยา โดยการแช่ฟิล์มในแคลเซียมคลอไรด์ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (0.5-0.3 %w/v) ภายในเวลา 2-20 นาที พบว่าผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และเวลาในการเชื่อมโยงมีผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงของฟิล์ม สภาวะที่เหมาะสมคือแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 % และ 1 % ภายในเวลา 2 นาที หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ดีที่สุดที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบลักษณะเฉพาะทางกายภาพ ทางกล สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน พบว่าการทำการเชื่อมขวางแก่ฟิล์มสามารถพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล และการดูดซึมของเหลวจากแผลของฟิล์มผ้าปิดแผลได้ดีขึ้น และพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้สามารถรักษาความสมบูรณ์ทางกายภาพระหว่างการใช้งานได้ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ได้จากฟิล์มซึ่งใช้สารเชื่อมโยงที่มีความเข้มข้นต่ำสุดคือ 0.5 %w/v การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนยืนยันได้ว่าการเชื่อมโยงของฟิล์มสามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มได้ ในการทดสอบการปลดปล่อยยาพบว่าฟิล์มมีการปลดปล่อยยาอย่างช้า^[30]

2.9.11 กัลยรัตน์ วงศ์เจริญ และคณะ (2016) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวเหนียวกับ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจินตที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยการหล่อแบบ นำมาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจินต ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อฟิล์มผสม และศึกษาปริมาณของ 2-%w/v แคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงของฟิล์มผสม สมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ การบวม น้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไฮโดรเจล

ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวเหนียวกับ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจินตที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเติม 3 %v/v กลีเซอรอล และ 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ลงไป จะทำให้ฟิล์มขึ้นรูปได้เรียบสวย ไม่หดตัว ได้รูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อแช่น้ำถึง 24 ชั่วโมง ฟิล์มก็ยังคงรูปร่างเดิมได้ และมีค่าการบวมน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการเติม 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ปริมาณอื่นๆ ซึ่งทำให้ฟิล์มมีอายุการใช้งานได้นาน การเพิ่มอัตราส่วนของโซเดียมอัลจินตทำให้ฟิล์มมีสมบัติการบวมน้ำและการละลายน้ำสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจะทำให้ฟิล์มยืดหยุ่นดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่ม 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะแข็ง ยืดหยุ่นลดลงและหดตัวมากขึ้น^[12]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- แป้งถั่วเขียว ของบริษัท สิทธิพันธ์
- สารเคมีและสมบัติ

| | | | | |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| สารเคมี | Sodium alginate | Glycerol | Calcium chloride | Citric acid |
| บริษัท | Carlo Erba | Carlo Erba | Ajax Finechem | - |
| สูตรโมเลกุล | $(C_6H_7O_6Na)_n$ | $C_3H_5(OH)_3$ | $CaCl_2$ | $C_6H_8O_7$ |
| มวลโมเลกุล | $198.11 \text{ g mol}^{-1}$ | 92.09 g mol^{-1} | $110.99 \text{ g mol}^{-1}$ | $192.124 \text{ g mol}^{-1}$ |
| ความหนาแน่น | $0.5-0.6 \text{ Kg/m}^3$ | 1.261 g/cm^3 | 1.54 g/cm^3 | 1.66 g/cm^3 |
| จุดหลอมเหลว | $> 300 \text{ }^\circ\text{C}$ | $17.8 \text{ }^\circ\text{C}$ | $782 \text{ }^\circ\text{C}$ | $153 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| CAS number | 9005-38-3 | 56-81-5 | 10043-52-4 | 77-92-9 |
| Code number | 366552 | - | - | - |

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์ 100 ml. 3 ใบ
2. ปีกเกอร์ 250 ml. 3 ใบ
3. ปีกเกอร์ 1000 ml. 2 ใบ
4. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล รุ่น ML204/01 ของบริษัท Mettler Toledo
5. เทอร์โมมิเตอร์ 2 อัน
6. แท่งแก้วคน 2 อัน
7. กระจกตวง 100 ml. 1 อัน
8. กระจกตวง 250 ml. 1 อัน
9. เครื่องปั่นความเร็วปรับความเร็วได้ ของบริษัท Fisher Scientific
10. ถาดพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.5 เซนติเมตร
11. ซ้อนตักสาร 3 คัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กรรไกร
13. แผ่นตะแกรงเหล็กความละเอียด 200 mesh
14. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) ของบริษัท Perkin Elmer instruments
15. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น LRM 110 ของบริษัทอินโทรเอ็นเตอร์ไพร์ส จำกัด
16. เครื่องเทอร์โมกราวิเมทรี (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของบริษัท Perkin Elmer instruments

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 3.3.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 3 %v/v กลีเซอรอล และ 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

| สูตร | 5% แป้งถั่วเขียว (mL) | สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (mL) | กลีเซอรอล (mL) |
|---------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|
| St | 100 | 0 | 3 |
| StCa0.1 | 100 | 0.1 | 3 |
| StCa0.5 | 100 | 0.5 | 3 |
| StCa1.0 | 100 | 1.0 | 3 |

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 3 %v/v กลีเซอรอล และ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริก

| สูตร | 5% แป้งถั่วเขียว (mL) | สารละลายกรดซิตริก (mL) | กลีเซอรอล (mL) |
|---------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| StCi0.1 | 100 | 0.1 | 3 |
| StCi0.5 | 100 | 0.5 | 3 |
| StCi1.0 | 100 | 1.0 | 3 |

ตอนที่ 3.3.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของ 5 %w/v แป้งถั่วเขียว 5 %w/v โซเดียมอัลจิเนต 3 %v/v กลีเซอรอล 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริก

| สูตร | 5% แป้งถั่วเขียว (ml.) | 5% โซเดียมอัลจิเนต (ml.) | กลีเซอรอล (ml.) | สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (ml.) | สารละลายกรดซิตริก (ml.) |
|------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|
| StAg | 80 | 20 | 3 | 0 | 0 |
| StAgCa0.1 | 80 | 20 | 3 | 0.1 | 0 |
| StAgCi0.1 | 80 | 20 | 3 | 0 | 0.1 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 80 | 20 | 3 | 0.1 | 0.1 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 80 | 20 | 3 | 0.1 | 0.3 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 80 | 20 | 3 | 0.1 | 0.5 |
| StAgCa0.1Ci0.1.0 | 80 | 20 | 3 | 0.1 | 1.0 |

3.3.3 การเตรียมสารละลาย

1. เตรียมสารละลายแป้งถั่วเขียว 5 %w/v

ตวงน้ำกลั่น 100 ml. ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิประมาณ 70-80 °C ซึ่งแป้งถั่วเขียว 5 g. จากนั้นเติมแป้งถั่วเขียวลงไปพร้อมกับการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบประมาณ 1500 rpm และยังคงให้ความร้อนต่อเนื่อง ปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาทีจะได้สารละลายแป้งถั่วเขียว 5 %w/v

2. เตรียมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) 5 %w/v

ตวงน้ำกลั่น 100 ml. ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิประมาณ 60 °C ซึ่งโซเดียมอัลจิเนต 5 g. จากนั้นเติมโซเดียมอัลจิเนตพร้อมกับการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบประมาณ 1500 rpm และยังคงให้ความร้อนต่อเนื่อง ปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที ได้สารละลายโซเดียมอัลจิเนต 5 %w/v

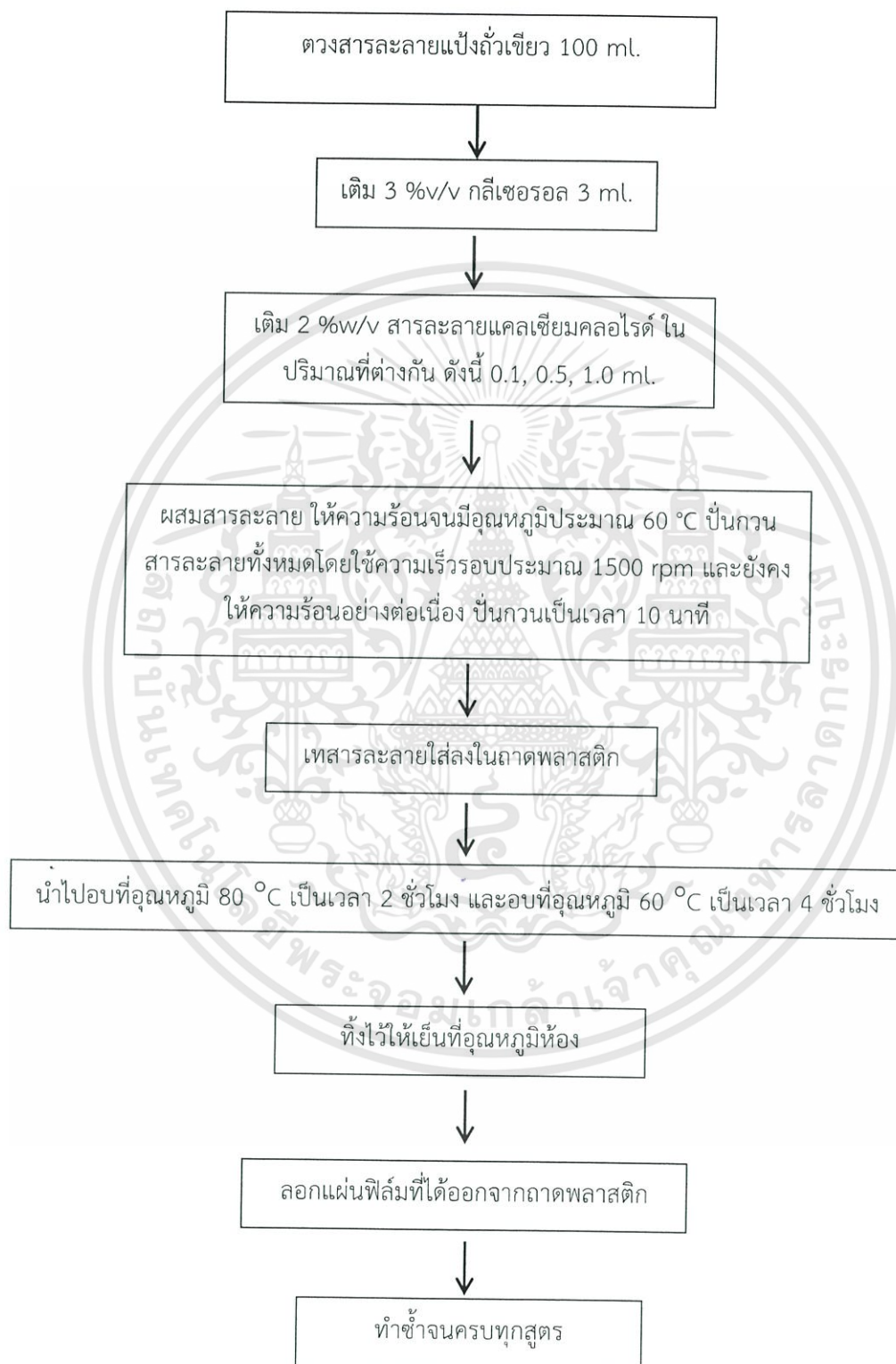
3. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2 %w/v

ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์ 2 g. เติมน้ำกลั่น 100 ml. คนจนแคลเซียมคลอไรด์ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

4. การเตรียมสารละลายกรดซิตริก 2%w/v

ซึ่งกรดซิตริก 2 g. เติมน้ำกลั่น 100 ml. คนจนกรดซิตริกละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

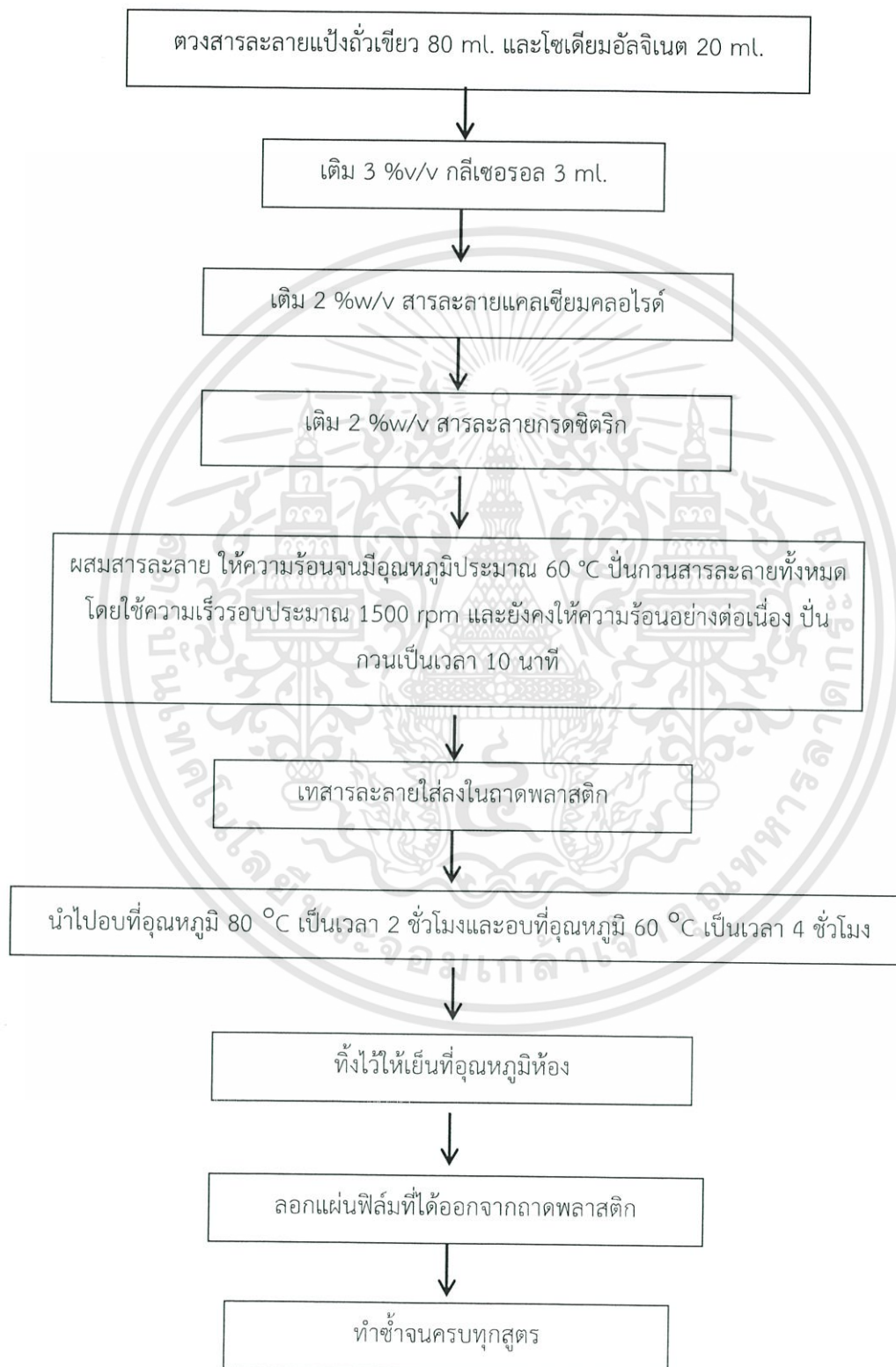
3.3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มแบ่งแก้วเขียวโดยเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือสารละลายกรดซิตริก ที่ปริมาณต่างกัน



หมายเหตุ : เปลี่ยนจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารละลายกรดซิตริก และทำซ้ำแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 วิธีการเตรียมฟิล์มจากสารละลายผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนตโดยเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายกรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน



3.4 วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์ม

3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม

สังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่า เช่น สีของแผ่นฟิล์ม ความแข็งของแผ่นฟิล์ม ความเหนียวของแผ่นฟิล์ม

3.4.2 ทดสอบหมู่ฟังก์ชัน

ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) ตรวจวัดความยาวคลื่น ในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยใช้อุปกรณ์เสริม ATR เครื่องหมุน จากนั้นใส่ฟิล์มเข้าไปแล้วหมุนให้หัวเข็มสัมผัสกับแผ่นฟิล์ม วัดตัวอย่างซ้ำจนครบทุกสูตร

3.4.3 การทดสอบบวมตัวน้ำ (Swelling property)

ตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1 cm. ยาว 2 cm. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงานที่ตัดได้ จากนั้นใส่ชิ้นงานในตะแกรงเหล็กที่มีความละเอียด 200 mesh แล้วชั่งน้ำหนักรวม นำชิ้นงานพร้อมตะแกรงเหล็กไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยทุกๆ 1 ชั่วโมงให้นำออกมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินและชั่งน้ำหนัก ทำเช่นนี้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ชิ้นงานทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง นำออกมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินและชั่งน้ำหนัก

การคำนวณค่าการบวมตัวน้ำ

$$\% \text{Swelling} = \left[\frac{W_t - W_0}{W_0} \right] \times 100$$

โดยที่ W_0 = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

W_t = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่เวลาใดๆ (นำขึ้นมาชั่งทุก 1 ชั่วโมง)

การคำนวณค่าการบวมตัวน้ำที่ 24 ชั่วโมง

$$\% \text{Equilibrium water content} = \left[\frac{W_t - W_0}{W_0} \right] \times 100$$

โดยที่ W_0 = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

W_t = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง

3.4.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D882

ตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 2.5 cm. ยาว 10 cm. ทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D882 แล้วนำตัวอย่างจำนวน 1 ตัวอย่างมายึดติดกับที่จับ (Grip) ทั้งสองข้างโดยใช้ Gauge length 4 cm. speed ในการดึง 50 mm/min และวัดค่า Tensile strength, Elongation at break และ Young's modulus

3.4.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบอุณหภูมิกการสลายตัวโดยอาศัยหลักวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) นำฟิล์มมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆใส่ลงใน Pt pan ประมาณ 10-30 mg. แล้วตั้งสภาวะของเครื่อง initial temperature 60 °C ปรับค่า heating rate 20 °C /min ช่วง อุณหภูมิ 60-900 °C ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนและวัดอุณหภูมิกการสลายตัวจนครบทุกสูตร



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีผลต่อฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวเขียว และ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจิเนต โดยสมบัติที่ศึกษาและนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ตรวจสอบหุ้่มฟุ้งกัซัน การบวมน้ำ ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวเขียว
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

4.1 ลักษณะทางกายภาพ

นำแผ่นฟิล์มทุกสูตรมาบันทึกลักษณะทางกายภาพ เช่น สี ความหนา และการคงรูปของแผ่นฟิล์มเพื่อให้่ายต่อความเข้าใจ จึงกำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

| | |
|----------------|---|
| St | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว และกลีเซอรอล 3 ml. |
| StCa0.1 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. |
| StCa0.5 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 ml. |
| StCa1.0 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1.0 ml. |
| StCi0.1 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StCi0.5 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.5 ml. |
| StCi1.0 | ฟิล์มแป้งข้าวเขียว กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. |
| StAg | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 และกลีเซอรอล 3 ml. |
| StAgCa0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml.และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. |
| StAgCi0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80 : 20 กลีเซอรอล 3 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StAgCa0.1Ci0.1 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. |
| StAgCa0.1Ci0.3 | ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเขียวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20 กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.3 ml. |

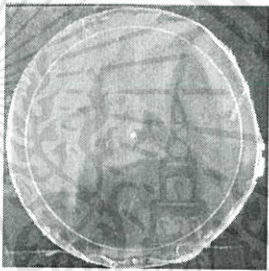
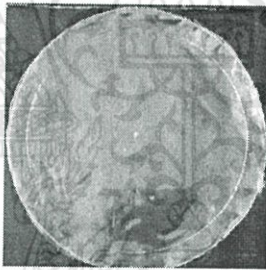
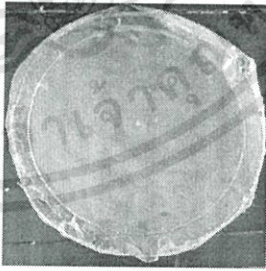
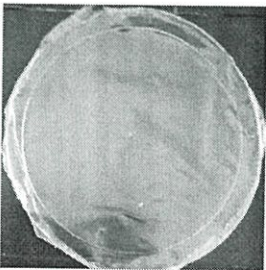
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- StAgCa0.1Ci0.5 ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20
กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml.
และสารละลายกรดซิตริก 0.5 ml.
- StAgCa0.1Ci1.0 ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวและโซเดียมอัลจิเนต อัตราส่วน 80:20
กลีเซอรอล 3 ml. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml.
และสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml.

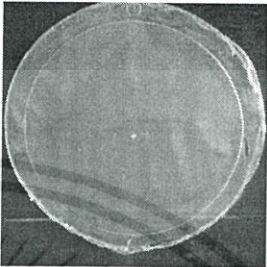
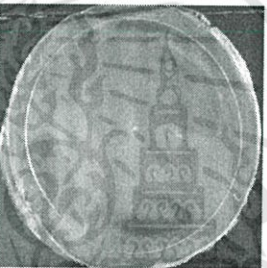
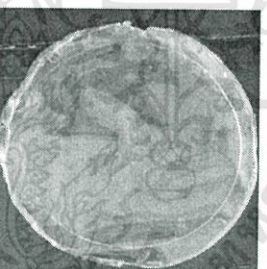


ตอนที่ 4.1.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแบ่งถั่วเขียว

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม 5 %w/v แบ่งถั่วเขียว 100 ml. กลีเซอรอล 3 ml. 2 %w/v แคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v กรดซิตริกที่ปริมาณต่างกัน

| สูตร | 2 %w/v แคลเซียม คลอไรด์ (ml.) | 2 %w/v กรด ซิตริก (ml.) | ความหนา เฉลี่ย (mm.) $\bar{x} \pm SD$ | รูป | รูปร่างและ ลักษณะของ ฟิล์ม |
|---------|--|----------------------------------|---|--|--|
| St | - | - | 0.096 |  | ฟิล์มใส นิ่ม สามารถขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StCa0.1 | 0.1 | - | 0.108 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งมากกว่า สูตร St ขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StCa0.5 | 0.5 | - | 0.116 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งมากกว่า สูตร StCa0.1 สามารถขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StCa1.0 | 1.0 | - | 0.098 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งที่สุดในฟิล์ม ที่เติมแคลเซียม คลอไรด์ ขึ้นรูป เป็นแผ่นได้ |

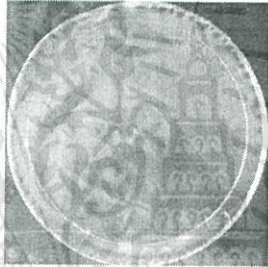
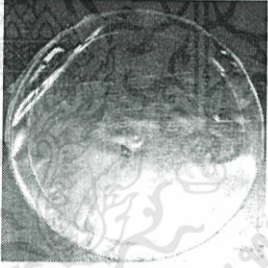
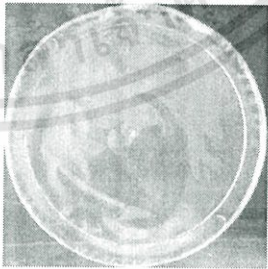

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

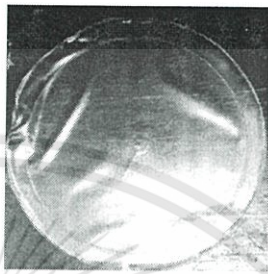
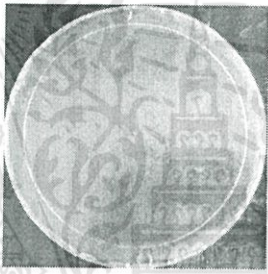
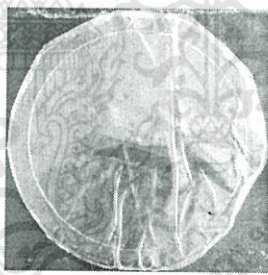
| สูตร | 2 %w/v แคลเซียม คลอไรด์ (mL.) | 2 %w/v กรด ซิตริก (mL.) | ความหนา เฉลี่ย (mm.) $\bar{x} \pm SD$ | รูป | รูปร่างและ ลักษณะของ ฟิล์ม |
|---------|--|----------------------------------|---|--|--|
| StCi0.1 | - | 0.1 | 0.128 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งมากกว่า สูตร St สามารถขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StCi0.5 | - | 0.5 | 0.086 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งมากกว่า สูตร StCi0.1 สามารถขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ หัดตัว |
| StCi1.0 | - | 1.0 | 0.100 |  | ฟิล์มใส มีความ แข็งน้อยกว่า สูตร StCi0.5 หัดตัว |

จากตารางที่ 4.1 ศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแบงก์ข้าว พบว่าฟิล์มแบงก์ข้าวทุกสูตรมีลักษณะใส และสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกมีผลต่อฟิล์มแบงก์ข้าวเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าฟิล์มมีความแข็งมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายกรดซิตริก พบว่าฟิล์มมีความแข็งมากขึ้น มีการหดตัวเมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

ตอนที่ 4.1.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับโซเดียมอัลจิเนต

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v แป้งข้าวเจ้า 80 ml. 5 %w/v โซเดียมอัลจิเนต 20 ml. กลีเซอรอล 3 ml. 2 %w/v แคลเซียมคลอไรด์ และ 2 %w/v กรดซิตริกที่ปริมาณแตกต่างกัน

| สูตร | 2 %w/v แคลเซียมคลอไรด์ (ml.) | 2 %w/v กรดซิตริก (ml.) | ความหนาเฉลี่ย (mm.) $\bar{x} \pm SD$ | รูป | รูปร่างและลักษณะของฟิล์ม |
|-----------------|------------------------------|------------------------|---|--|---|
| StAg | - | - | 0.095 |  | ฟิล์มมีสีเหลืองเล็กน้อย เหนียว หดตัว สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StAgCa0.1 | 0.1 | - | 0.088 |  | ฟิล์มมีสีเหลืองเล็กน้อย เหนียว หดตัวน้อยกว่าสูตร StAg สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StAgCi0.1 | - | 0.1 | 0.108 |  | ฟิล์มมีสีเหลืองเล็กน้อย เหนียวกว่าสูตร StAg หดตัว สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StAg Ca0.1Ci0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.112 |  | ฟิล์มมีสีเหลืองเล็กน้อย เหนียว สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ |

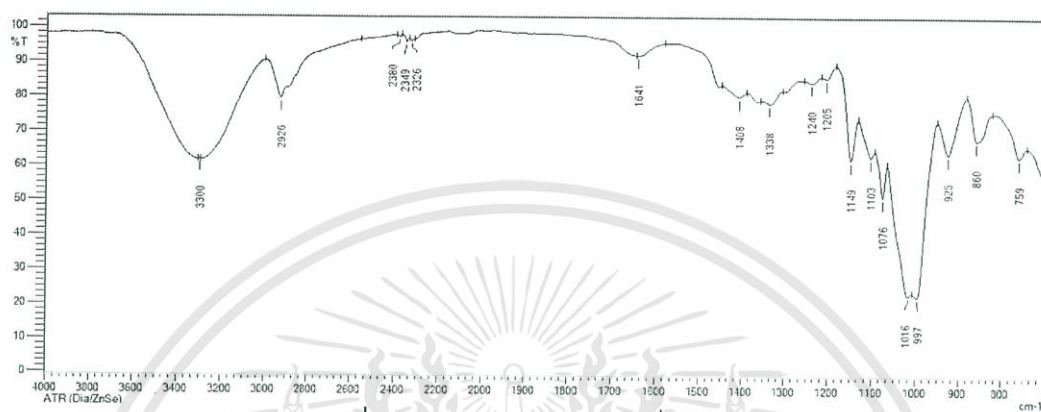
| สูตร | 2 %w/v แคลเซียม คลอไรด์ (ml.) | 2 %w/v กรด ซิตริก (ml.) | ความหนา เฉลี่ย (mm.) | รูป | รูปร่างและ ลักษณะของ ฟิล์ม |
|--------------------|--|----------------------------------|----------------------------|---|---|
| StAg Ca0.1Ci0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.112 |  | ฟิล์มมีสีเหลือง เล็กน้อย แข็ง ที่สุดและเหนียว น้อยที่สุดใน ฟิล์มผสม ขึ้นรูป เป็นแผ่นฟิล์มได้ |
| StAg Ca0.1Ci0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.114 |  | ฟิล์มมีสีเหลือง เล็กน้อย เหนียว ไม่หดตัว |
| StAg Ca0.1Ci1.0 | 0.1 | 1.0 | 0.124 |  | ฟิล์มมีสีเหลือง เล็กน้อย เหนียว หดตัวมากที่สุดใน ฟิล์มผสม |

จากตารางที่ 4.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต พบว่าฟิล์มผสมทุกสูตรมีสีเหลืองเล็กน้อย เนื่องจากการผสมโซเดียมอัลจิเนตลงไปในฟิล์มแป้งถั่วเขียว และสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกมีผลต่อฟิล์มผสม โดยสารละลายกรดซิตริกทำให้ฟิล์มผสมมีความเหนียวมากขึ้น และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ฟิล์มผสมหดตัวน้อยลง เมื่อเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดลงในฟิล์มผสม โดยให้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ปริมาณคงที่ 0.1 ml. และเพิ่มสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. ตามลำดับ พบว่าทุกสูตรมีความเหนียวใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตร StAgCa0.1Ci0.3 มีความเหนียวน้อยที่สุดและมีความแข็งมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy หรือ FT-IR

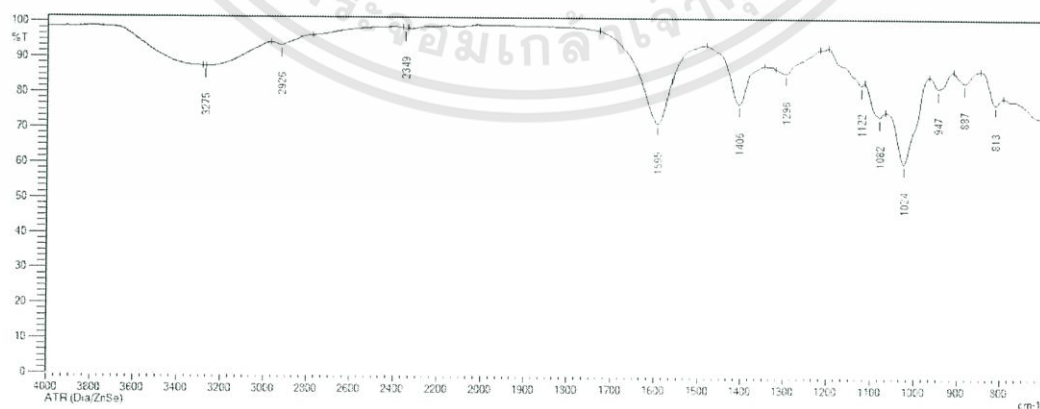
4.2.1 แป้งถั่วเขียว



รูปที่ 4.1 IR สเปกตรัมของแป้งถั่วเขียว

จากรูปที่ 4.1 IR สเปกตรัมของแป้งถั่วเขียวพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ พบเลขคลื่นประมาณ 3309 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching เนื่องจาก hydroxyl group ในโมเลกุลของแป้ง เลขคลื่นประมาณ $2889\text{-}2929\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C-H stretching ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทั่วไปของกลูโคสที่มีโครงสร้างปิ่น ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n เลขคลื่นประมาณ 1641 cm^{-1} แสดงถึงน้ำที่ถูกดูดซับในชั้น amorphous ของแป้งถั่วเขียว^[31] เลขคลื่นประมาณ 1076 cm^{-1} และ 997 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching ในวง anhydroglucose

4.2.2 โขเดียมอัลจิเนต



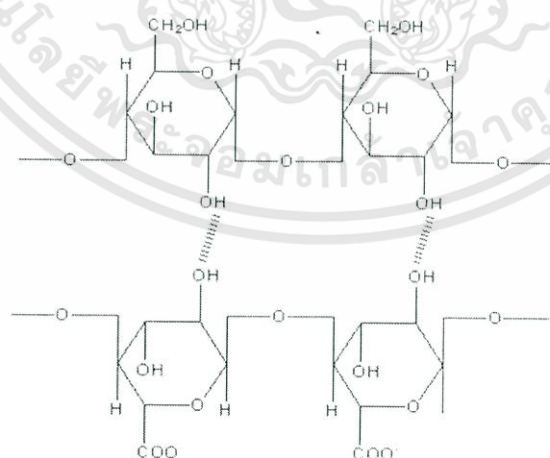
รูปที่ 4.2 IR สเปกตรัมของโซเดียมอัลจิเนต

จากรูปที่ 4.2 IR สเปกตรัมของไซเตียมอัลจินเตพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $800-4000\text{ cm}^{-1}$ พบเลขคลื่นประมาณ 3275 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching เลขคลื่นประมาณ 2926 cm^{-1} แสดงถึง C-H stretching เลขคลื่นประมาณ 1595 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C=O stretching ของ -COOH เลขคลื่นประมาณ 1406 cm^{-1} และ 1296 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching ของหมู่ -COOH เลขคลื่นประมาณ 1082 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching ของ C-OH

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่ามี IR สเปกตรัมที่คล้ายกันเพราะทั้งแป้งข้าวและไซเตียมอัลจินเตเป็นสารประเภทพอลิแซคคาไรด์เหมือนกัน แต่ไซเตียมอัลจินเตมีหมู่ COO^- อยู่ในวง anhydroglucose

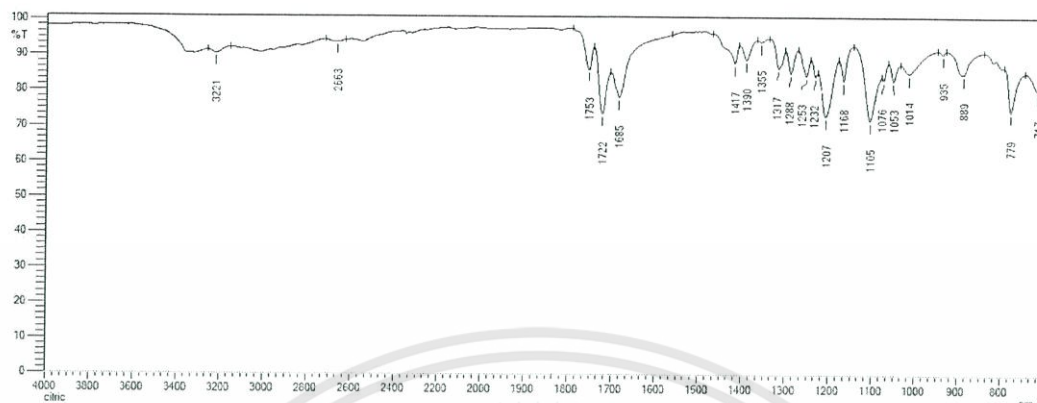


รูปที่ 4.3 โครงสร้างของแป้งข้าว



รูปที่ 4.4 แสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งข้าวกับไซเตียมอัลจินเต

4.2.3 กรดซิติริก

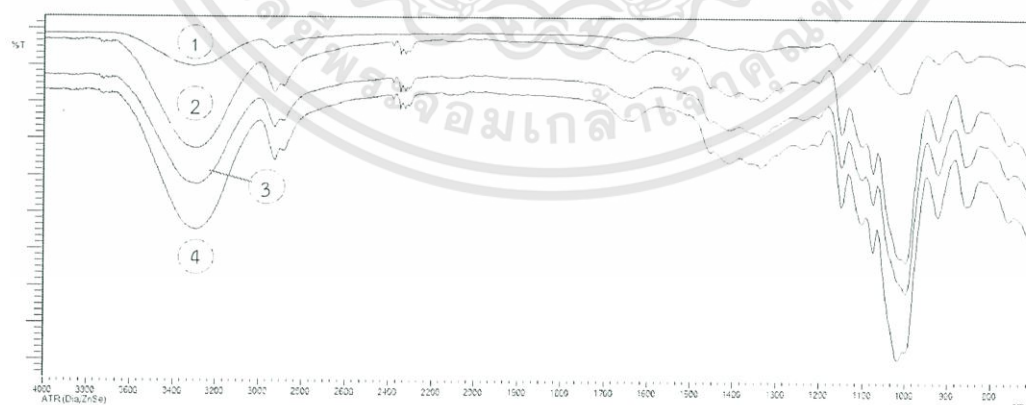


รูปที่ 4.5 IR สเปกตรัมของกรดซิติริก

จากรูปที่ 4.5 IR สเปกตรัมของกรดซิติริกพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ พบเลขคลื่นประมาณ 3221 cm^{-1} แสดงถึง -OH stretching ของหมู่ -COOH เลขคลื่นประมาณ $1685\text{-}1753\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C=O stretching ของหมู่ -COOH เลขคลื่นประมาณ 1253 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching ของหมู่ -COOH เลขคลื่นประมาณ 3300 cm^{-1} แสดงถึง -OH stretching เลขคลื่นประมาณ 1105 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching ของ C-OH

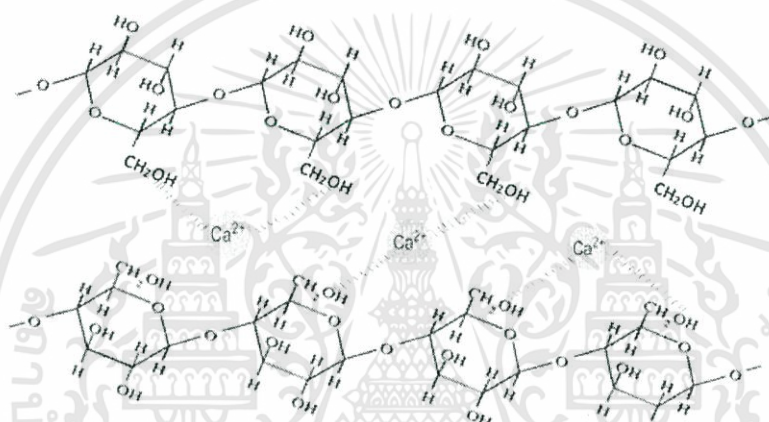
ตอนที่ 4.2.4 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิติริกที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว

ผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



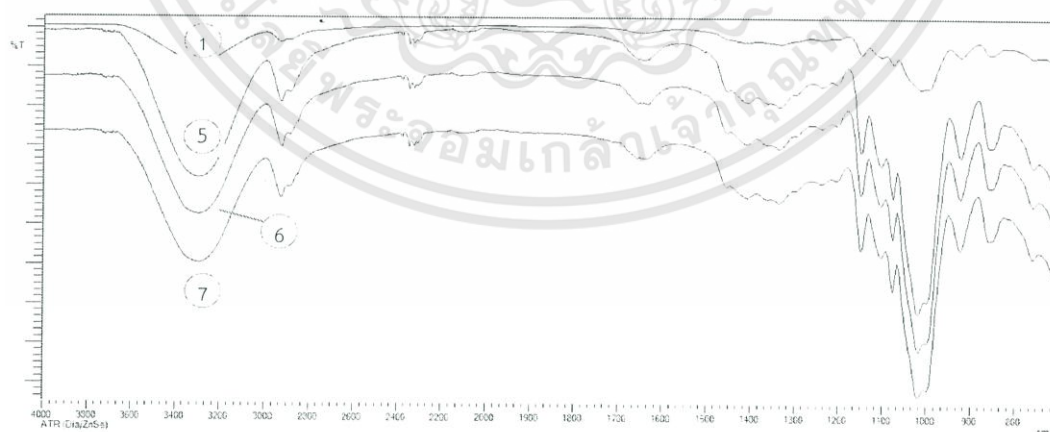
รูปที่ 4.6 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งถั่วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1) 0 ml. 2) 0.1 ml. 3) 0.5 ml. 4) 1.0 ml.

จากรูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าสูตรที่ 1, 2, 3 และ 4 ปรากฏเลขคลื่นประมาณ $3298-3309\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง O-H stretching ของแป้งข้าว เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะเห็นว่าพิกมีลักษณะยาวและแคบขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดอัตรกิริยาทางเคมีระหว่างแคลเซียมคลอไรด์กับโมเลกุลของแป้งข้าว โดยแคลเซียมไอออนเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแป้ง และเกิดพันธะไอออนิกกับโมเลกุลของแป้ง เลขคลื่นประมาณ $2889-2929\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C-H stretching ของแป้งข้าว เลขคลื่นประมาณ 1641 cm^{-1} แสดงถึงน้ำที่ถูกดูดซับในฟิล์มแป้งข้าว พบชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มแคลเซียมคลอไรด์ อาจเนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์เกิดพันธะไอออนิกกับโมเลกุลของน้ำ^[32]



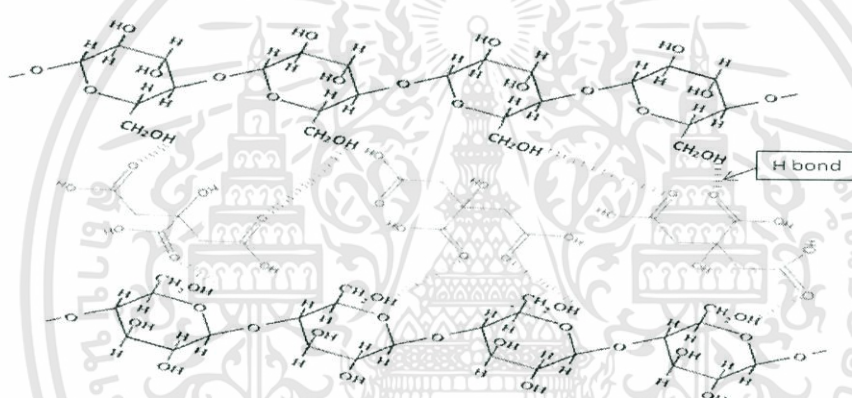
รูปที่ 4.7 แสดงการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างแป้งข้าวกับแคลเซียมคลอไรด์

ผลของสารละลายกรดซิตริก



รูปที่ 4.8 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวที่เติมสารละลายกรดซิตริก 1) 0 ml. 5) 0.1 ml. 6) 0.5 ml. 7) 1.0 ml.

จากรูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสเปกตรัมของฟิล์มแป้งข้าวที่เติมสารละลายกรดซิดริกในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าสูตรที่ 1, 5, 6 และ 7 ปรากฏเลขคลื่นประมาณ $3298-3309\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง O-H stretching ของแป้งข้าว เลขคลื่นประมาณ $2885-2929\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C-H stretching ของแป้งข้าว เมื่อเพิ่มสารละลายกรดซิดริกจะเห็นว่าพีกมีลักษณะยาวและแคบขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างกรดซิดริกกับโมเลกุลของแป้งข้าว โดยกรดซิดริกเข้าไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง เลขคลื่นประมาณ 1024 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching ของวง anhydroglucose เมื่อเพิ่มกรดซิดริกมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพีก คือจากกว้างไปเป็นแคบและยาวขึ้น แสดงว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งข้าวกับกลีเซอรอลลดลง กรดซิดริกเกิดอันตรกิริยากับหมู่ C-O ของแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ของแป้งในสภาวะ amorphous ลดลง^[34]



รูปที่ 4.9 แสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งข้าวกับกรดซิดริก

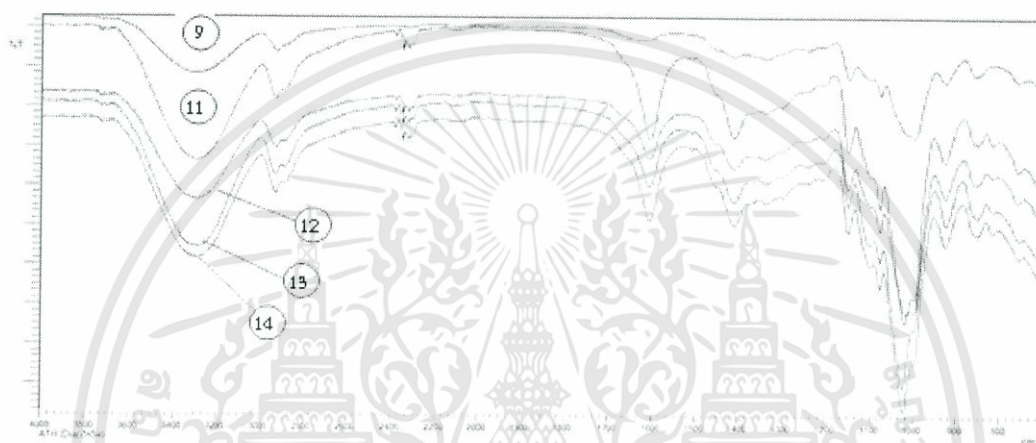
ตอนที่ 4.2.5 ศึกษาผลสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิดริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวกับไซเตียมอัลจินต



รูปที่ 4.10 IR สเปกตรัมของฟิล์มผสมที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิดริก 8) ไม่เติมทั้ง 2 สาร 9) CaCl_2 0.1 ml. 10) Citric acid 0.1 ml.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับโซเดียมอัลจิเนต พบว่า เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือส่งผลต่อพีคของ -OH stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $3298-3309\text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะแคบและยาวขึ้น อาจเป็นเพราะแคลเซียมไอออนเข้าไปเกิดพันธะไฮดรอกซิดกับโมเลกุลของแป้ง และกรดซิตริกเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกับอัลจิเนตลดลง แต่ตำแหน่งเลขคลื่นอื่นไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 IR สเปกตรัมของฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 9) 0 ml. 11) 0.1 ml. 12) 0.3 ml. 13) 0.5 ml. 14) 1.0 ml.

จากรูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ IR สเปกตรัมของฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับโซเดียมอัลจิเนตที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริกในปริมาณที่ต่างกันไป พบว่าสูตรที่ 9, 11, 12, 13 และ 14 ปรากฏเลขคลื่นประมาณ $3284-3298\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง -OH stretching เลขคลื่นประมาณ $2922-2927\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C-H stretching เมื่อเพิ่มสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสม จะเห็นว่าส่งผลต่อพีคที่เลขคลื่นประมาณ $3284-3298\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง -OH stretching อาจเนื่องจากกรดซิตริกเข้าไปลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกับโซเดียมอัลจิเนต พีคจึงกลับมา มีลักษณะของแป้ง และลักษณะพีคของโซเดียมอัลจิเนตที่เลขคลื่นประมาณ 1400 cm^{-1} แสดงถึง C-O stretching และที่เลขคลื่นประมาณ 1600 cm^{-1} แสดงถึง C=O stretching ชัดเจนขึ้น ส่วนพีคแสดงเอกลักษณ์ของหมู่ -COO ที่เลขคลื่นประมาณ 1700 cm^{-1} ในกรดซิตริกหายไป

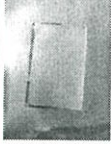




















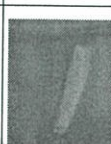
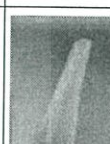



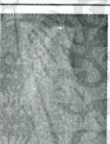



















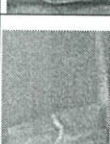
4.3 ผลการทดสอบการบวมน้ำ

นำฟิล์มมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 1x2 เซนติเมตร นำไปแช่น้ำหนักและแช่ลงในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มหลังจากแช่น้ำที่ชั่วโมงต่างๆ

| สูตร | ก่อนแช่น้ำ | ชั่วโมงที่ 1 | ชั่วโมงที่ 2 | ชั่วโมงที่ 3 | ชั่วโมงที่ 4 | ชั่วโมงที่ 5 | ชั่วโมงที่ 6 | ชั่วโมงที่ 24 |
|---------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| St | | | | | | | | |
| StCa0.1 | | | | | | | | |
| StCa0.5 | | | | | | | | |
| StCa1.0 | | | | | | | | |
| StCi0.1 | | | | | | | | |
| StCi0.5 | | | | | | | | |
| StCi1.0 | | | | | | | | |
| StAg | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| สูตร | ก่อนแช่น้ำ | ชั่วโมงที่ 1 | ชั่วโมงที่ 2 | ชั่วโมงที่ 3 | ชั่วโมงที่ 4 | ชั่วโมงที่ 5 | ชั่วโมงที่ 6 | ชั่วโมงที่ 24 |
|----------------|---|---|---|---|---|--|---|---|
| StAgCa0.1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| StAgCi0.1 |  |  |  |  |  |  |  | - |
| StAgCa0.1Ci0.1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| StAgCa0.1Ca0.3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| StAgCa0.1Ca0.5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| StAgCa0.1Ca1.0 |  |  |  |  |  |  |  |  |

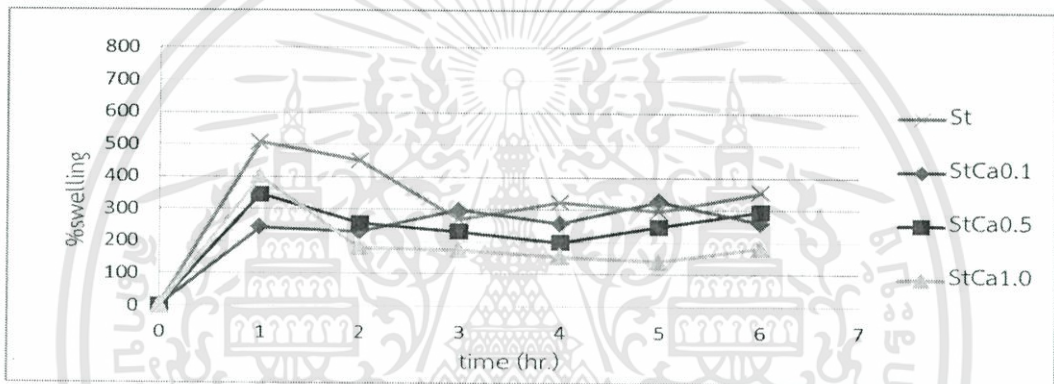
จากรูปในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มแปงแก้วเขียวเพียงอย่างเดียวในสูตรที่ St คงยังสภาพเป็นแผ่นฟิล์ม แม้แช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากแปงแก้วเขียวมีปริมาณอะไมโลสอยู่จำนวนมาก ทำให้มีส่วนที่เป็นผลึกอยู่มาก การละลายจึงน้อย ฟิล์มแปงแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml. ยังคงสภาพเป็นแผ่นฟิล์มได้เมื่อแช่น้ำผ่านไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงว่าทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกอาจเกิดพันธะเชื่อมโยงกับโมเลกุลของแปงแก้วเขียวทำให้ฟิล์มแปงแก้วเขียวสามารถทนน้ำได้มากขึ้น

ฟิล์มผสมระหว่างแปงแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตในสูตร StAg ฟิล์มไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ฟิล์มยุบและละลายในชั่วโมงที่ 6 แสดงว่าส่วนที่เป็นโซเดียมอัลจิเนตสามารถดูดน้ำได้ดีและรวดเร็ว เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในสูตร StAgCa0.1 จะเห็นว่าฟิล์มในชั่วโมงที่ 1-3 สามารถคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ และฟิล์มยุบในเวลาต่อมา เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริกในสูตร

StAgCi0.1 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มย่นและม้วนงอ เมื่อเติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกลงในฟิล์มผสม จะเห็นว่าฟิล์มผสมไม่ละในชั่วโมงที่ 6 และคงเป็นแผ่นฟิล์มได้ในชั่วโมงแรก แสดงว่าสารละลายทั้งสองที่เติมลงไปเกิดอัตรกิริยากับโมเลกุลของแป้ง ฟิล์มผสมในสูตรที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ปริมาณ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. จะเห็นว่าฟิล์มสามารถคงรูปได้มากกว่าสูตร StAg

ตอนที่ 4.3.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียว

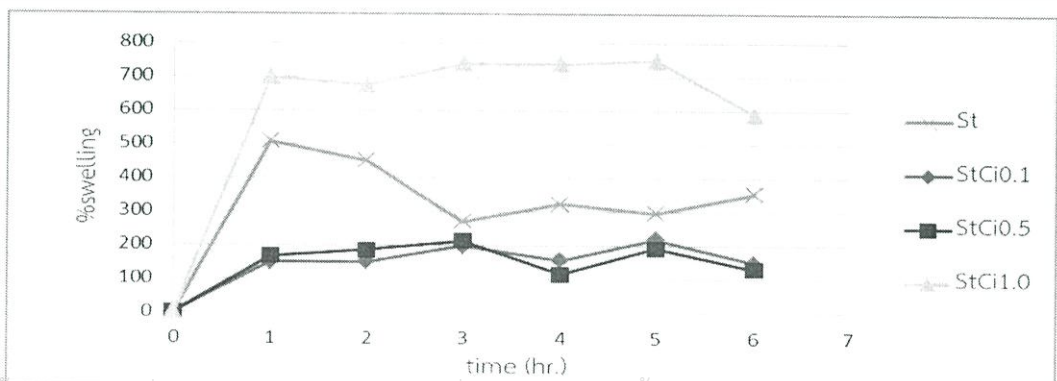
การบวมน้ำ (%Swelling) เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวบวมน้ำได้สูงสุด 500 % ในชั่วโมงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะฟิล์มแป้งถั่วเขียวเกิดการละลาย เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณต่างๆ ลงในฟิล์มแป้งถั่วเขียว พบว่าการบวมน้ำลดลงและเกือบคงที่ตลอด 6 ชั่วโมงที่ทดลอง แสดงว่าแคลเซียมคลอไรด์เกิดอัตรกิริยากับโมเลกุลของแป้ง โดยลดหมู่ฮอของแป้งลง และช่วยทำให้ฟิล์มแป้งถั่วเขียวสามารถทนน้ำได้นานขึ้น เมื่อเพิ่มสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าการบวมน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวมีแนวโน้มลดลง

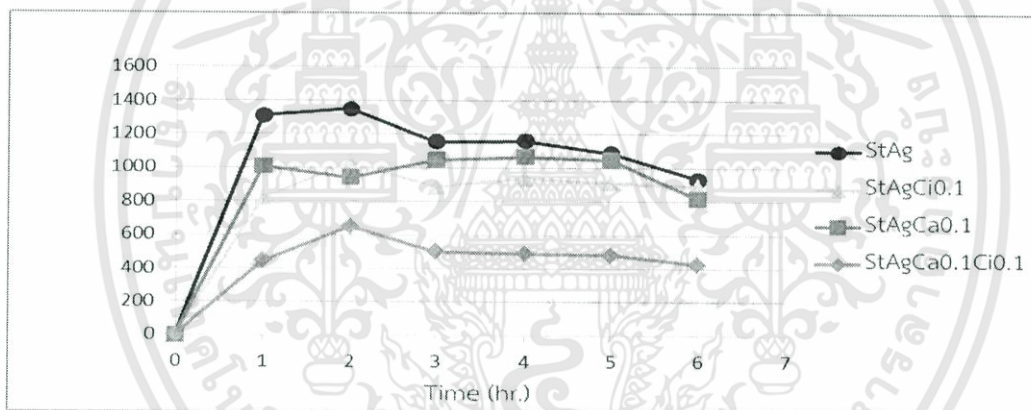
การบวมน้ำ (%Swelling) เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก



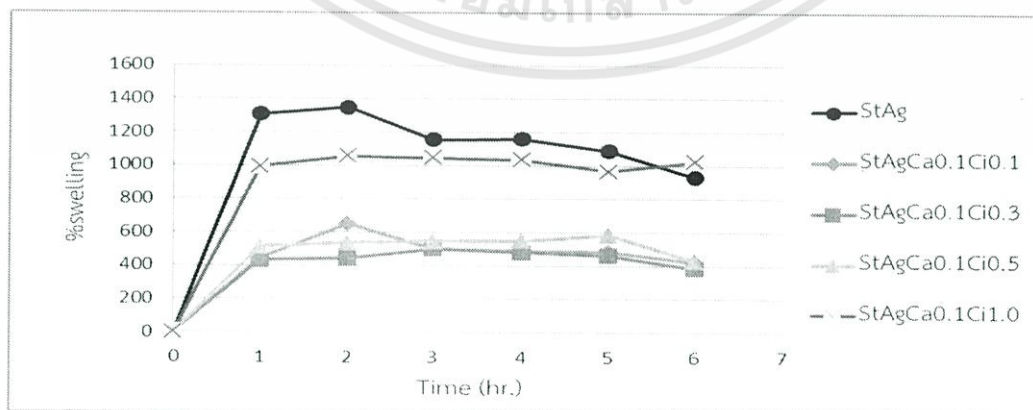
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก

จากรูปที่ 4.13 फिल्मแบ่งแก้วเขียวบวมน้ำได้สูงสุด 500 % ในช่วงโมงแรกและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 0.1 และ 0.5 ml. พบว่าการบวมน้ำลดลง ในช่วงโมงแรก บวมน้ำได้ประมาณ 147 % และ 167 % ตามลำดับ และเกือบคงที่ตลอด 6 ชั่วโมงที่ทดลอง แสดงว่า กรดซิตริกเกิดอัตริกิริยากับโมเลกุลของแบ่ง โดยลดหมู่ชอบน้ำของแบ่งลงเช่นเดียวกับที่พบเมื่อเติม สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แต่เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริกปริมาณ 1.0 ml. พบว่าฟิล์ม แบ่งแก้วเขียวบวมน้ำได้สูงสุด 700 % และเกือบคงที่ตลอด 6 ชั่วโมงที่ทดลอง การบวมน้ำของฟิล์มแบ่ง แก้วเขียวสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากกรดซิตริกมีหมู่ชอบน้ำ -COOH ถึง 3 หมู่ และหมู่ -OH 1 หมู่ กรด ซิตริกที่เติมมากเกินไปจึงดูดน้ำ หรือกรดซิตริกที่มากเกินไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแบ่ง ทำให้ เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปได้ แบ่งจึงอมน้ำได้ดีขึ้น^[31]

ตอนที่ 4.3.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์ม ผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับอัลจิเนตที่เติมสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับอัลจิเนตที่เติมสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริกที่ปริมาณ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

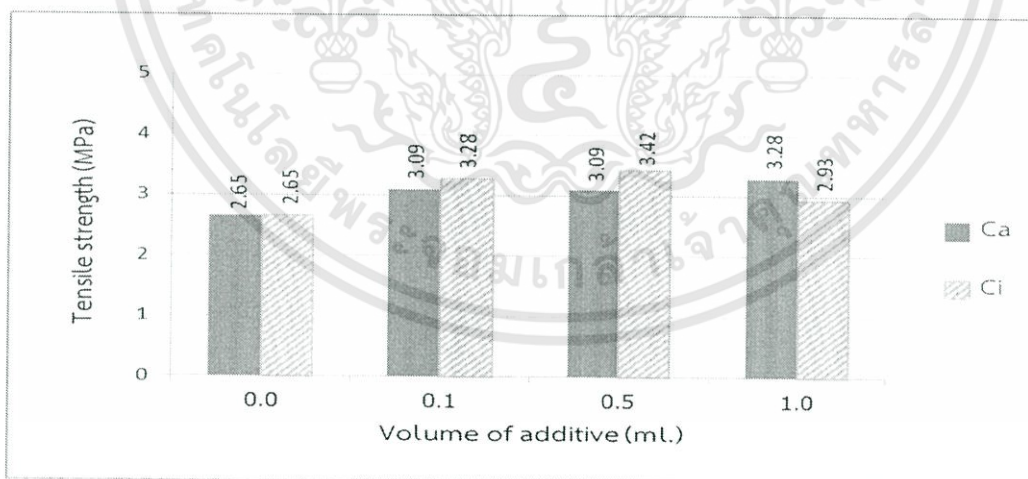
จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อผสมโซเดียมอัลจิเนตลงในแป้งข้าวโพด พบว่าการบวมตัวของฟิล์มแป้งข้าวโพดสูงขึ้น เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีหมู่ $-COOH$ จึงบวมน้ำได้ดีและเร็วกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพด ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวโพดกับโซเดียมอัลจิเนต บวมน้ำได้ถึง 1300 % ใน 1 ชั่วโมงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก การบวมตัวของฟิล์มผสมลดลง ฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวโพดกับอัลจิเนตที่มีทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.3 และ 0.5 ml. พบว่าฟิล์มผสมมีการบวมน้ำลดลง เพราะทั้งแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกมีผลต่อการลดหมู่ชอบน้ำของแป้ง แต่เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. ฟิล์มผสมบวมน้ำเพิ่มขึ้นแต่ยังคงต่ำกว่า StAg เพราะกรดซิตริกที่มากเกินไปดูดน้ำด้วย

4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยตัดฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2.5×10 cm. ใช้ speed ในการดึง 50 mm/min guage length 4 cm. ได้ค่า Tensile strength, Elongation at break และ young's modulus

ตอนที่ 4.4.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวโพด

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

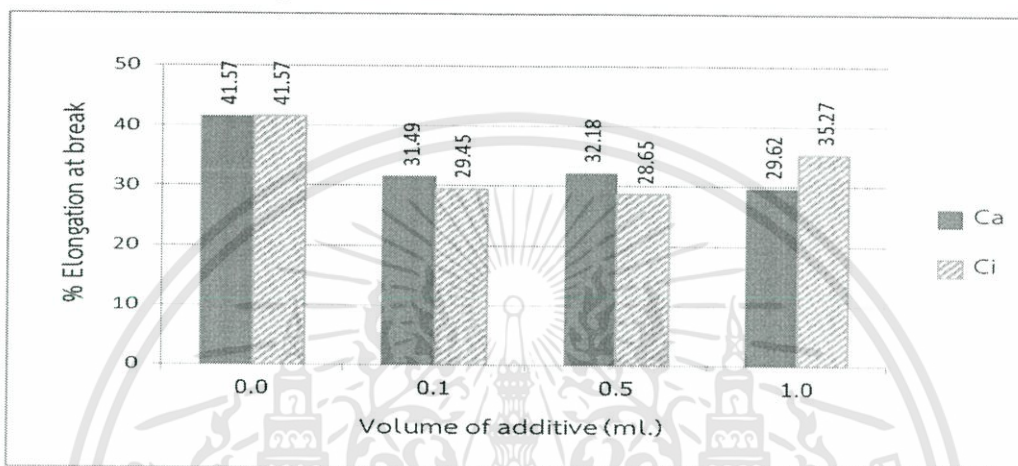


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มแป้งข้าวโพดที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.5 และ 1.0 ml.

จากรูปที่ 4.16 การเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มแป้งข้าวโพด ทำให้ความแข็งแรงดึงของฟิล์มมีแนวโน้มไม่ต่างกันมากนัก อยู่ในช่วง 2.5 - 3.5 MPa เมื่อเติม

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มแบงก์แก้วเขียวสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 0.1 และ 0.5 ml. ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มแบงก์แก้วเขียวสูงขึ้น และพบว่าแต่เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. ค่าความแข็งแรงดึงต่ำลง แต่ยังมีค่าสูงกว่าฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง

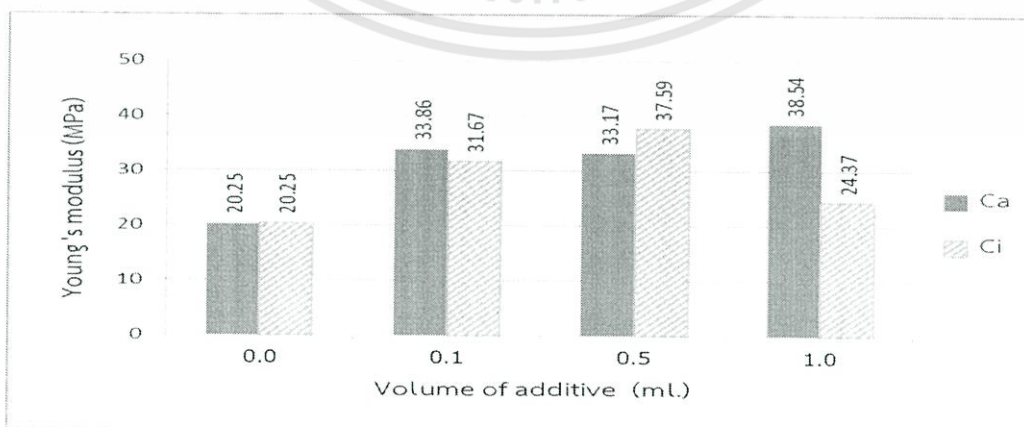
ร้อยละการดึงยืด (%Elongation at break)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าร้อยละการดึงยืดของฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.5 และ 1.0 ml.

จากรูปที่ 4.17 พบว่าสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก ทำให้ค่าร้อยละการดึงยืดของฟิล์มแบงก์แก้วเขียวต่ำลง ฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สามารถยืดได้มากกว่าฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่เติมสารละลายกรดซิตริกเล็กน้อย และพบว่าฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. มีค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่ง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำลง

ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มแบงก์แก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.5 และ 1.0 ml.

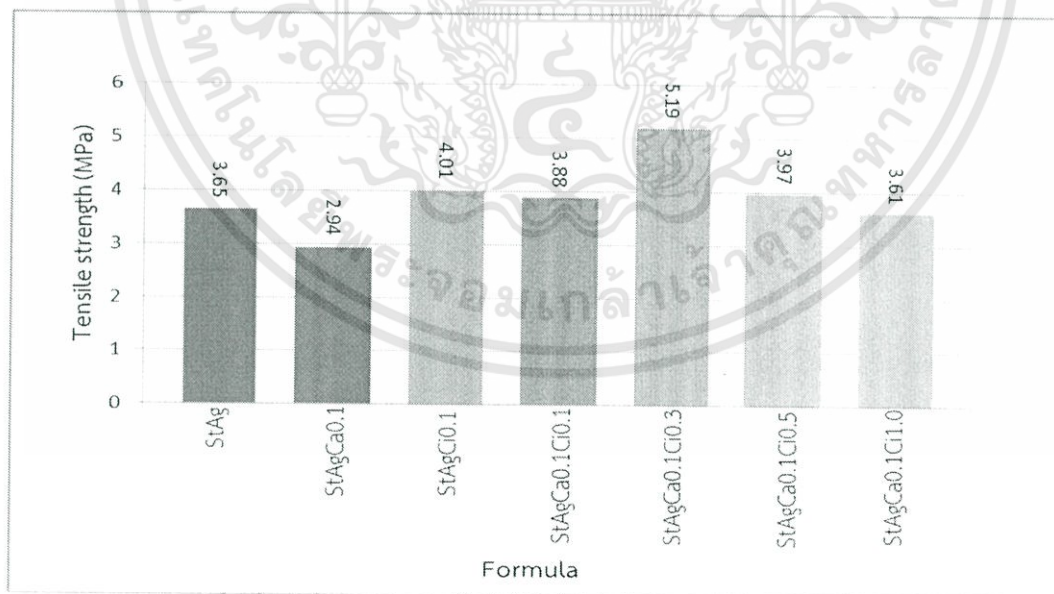
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 พบว่าฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml. มีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก 0.1 และ 0.5 ml. แต่เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. ค่ามอดูลัสของยังต่ำลงแต่ยังสูงกว่าฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่ง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml ส่งผลให้ฟิล์มแบ่งแก้วเขียวมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืดต่ำลง และค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น เนื่องจากแคลเซียมไอออนเกิดพันธะไอออนิกกับโครงสร้างของแบ่ง ทำให้ฟิล์มที่ได้แข็งแรงมากขึ้น และเมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 0.1 และ 0.5 ml. พบว่าฟิล์มแบ่งแก้วเขียวมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืดต่ำลง และค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้นเช่นเดียวกับฟิล์มแบ่งแก้วเขียวที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากกรดซิตริกเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโครงสร้างของแบ่ง ทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้น แต่เมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 1.0 ml. พบว่าค่าความแข็งแรงดึงต่ำลง ค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้น และค่ามอดูลัสของยังต่ำลง เนื่องจากกรดซิตริกที่มากเกินไปอาจทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มแบ่ง^[34] ทำให้ฟิล์มมีความนิ่มและยืดได้มาก

ตอนที่ 4.4.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

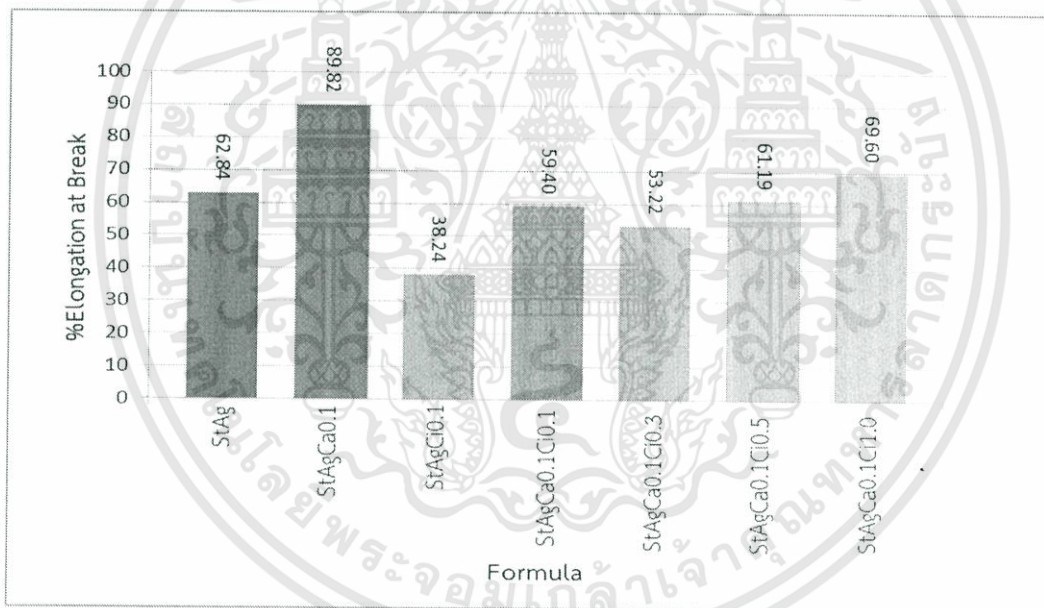


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มผสมระหว่างแบ่งแก้วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก

จากรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบสูตร StAgCa0.1 กับ StAgCl0.1 พบว่าฟิล์มผสมเมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มผสมต่ำลงจาก 3.65 MPa เป็น 2.94 MPa อาจเนื่องจากแคลเซียมไอออนเข้าไปเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของอัลจินตทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงลดลง และเมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก ฟิล์มผสมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นจาก 3.65 MPa เป็น 4.01 MPa อาจเป็นเพราะกรดซิตริกเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งและโซเดียมอัลจินต

ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก 0.3 ml. ฟิล์มผสมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด อาจเนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่กรดซิตริกทำปฏิกิริยาพอดีกับแป้ง และเมื่อเพิ่มสารละลายกรดซิตริก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงต่ำลง อาจเนื่องจากปริมาณกรดซิตริกที่มากเกินไป ทำให้สารละลายกรดซิตริกทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มผสม^[34]

ร้อยละการดึงยืด (%Elongation at break)

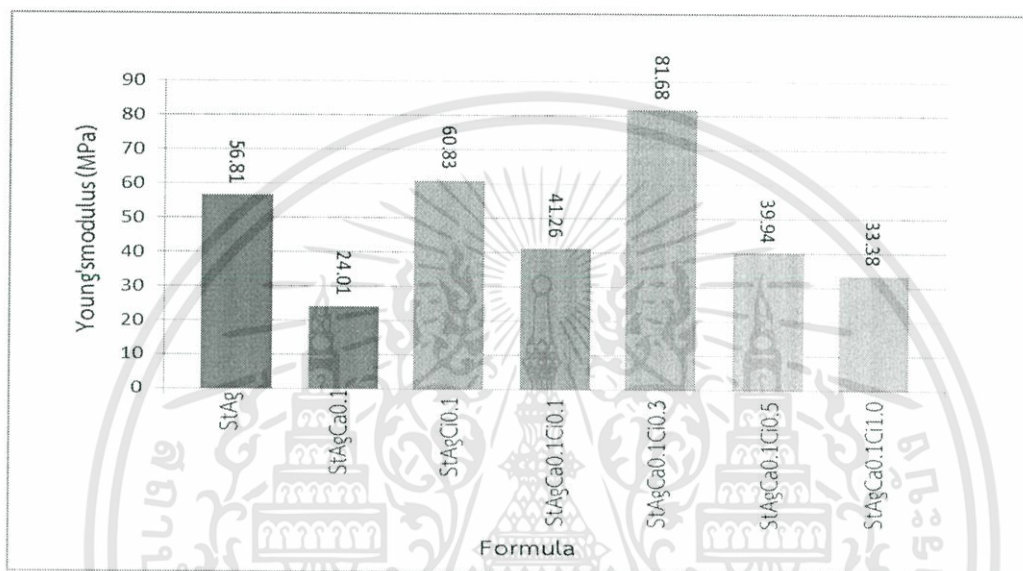


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าร้อยละการดึงยืดของฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจินตที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก

จากรูปที่ 4.20 ฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจินต เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าฟิล์มผสมมีค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้นจาก 62 % เป็น 89 % อาจเนื่องจากแคลเซียมไอออนเข้าไปเกิดอันตรกิริยากับโครงสร้างของอัลจินต ทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้าง ฟิล์มจึงดึงยืดได้มากขึ้น และเมื่อเติมสารละลายกรดซิตริก พบว่าฟิล์มผสมมีค่าร้อยละการดึงยืดต่ำลง ฟิล์มผสมแข็งแรงขึ้น ดึงยืดได้เพียง 38 % อาจเพราะกรดซิตริกซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง ทำให้ฟิล์มดึงยืดได้น้อย ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1

ml. และสารละลายกรดซิดริก 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมสารละลายกรดซิดริก 0.3 ml. फिल्मผสมมีค่าร้อยละการดึงยืดต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มสารละลายกรดซิดริก फिल्मผสมมีค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้น อาจเพราะกรดซิดริกที่มากเกินไปทำให้ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ फिल्मจึงยืดได้มาก^[34]

มอดูลัสของยัง (Young's Modulus)



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนตที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิดริก

จากรูปที่ 4.21 फिल्मผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต เมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่า फिल्मผสมมีค่ามอดูลัสของยังต่ำลงมาจาก 56 MPa-เหลือ 24 MPa แสดงว่า फिल्मผสมที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. มีสมบัติการดึงยืดที่ดี เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย ในขณะที่เมื่อเติมสารละลายกรดซิดริก พบว่า फिल्मผสมมีค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้นจาก 56 MPa เป็น 60 MPa แสดงว่า फिल्मเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากกว่า फिल्मผสมที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่ง

ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิดริก 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมสารละลายกรดซิดริก 0.3 ml. फिल्मผสมมีค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด คือ 81 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่สูงและค่าร้อยละการดึงยืดที่ต่ำ

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ फिल्मผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต พบว่าเมื่อเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว ทำให้ फिल्मผสมมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำลง ค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้น และค่ามอดูลัสของยังต่ำลง อาจเป็นเพราะแคลเซียมไอออนสามารถเข้าไปเชื่อมโยงในโครงสร้างของอัลจิเนต ทำให้โครงสร้างภายในมีปริมาตรอิสระมากขึ้น ดึงยืดได้มากขึ้น

ในทางตรงข้ามเมื่อเติมสารละลายกรดซิดริกเพียงอย่างเดียว ทำให้ฟิล์มผสมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืดต่ำลง และค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น

ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิดริก พบว่าฟิล์มผสมมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดต่ำลง ยกเว้นสูตร StAgCa0.1Ci0.3 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด ค่าร้อยละการดึงยืดต่ำที่สุด และค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด อาจเพราะเป็นอัตราส่วนที่กรดซิดริกทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์กับแป้ง ดังนั้นปริมาณและชนิดของสารเติมแต่งมีผลต่อสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างแป้งกล้วยกับโซเดียมอัลจิเนตที่อัตราส่วน 80:20

4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

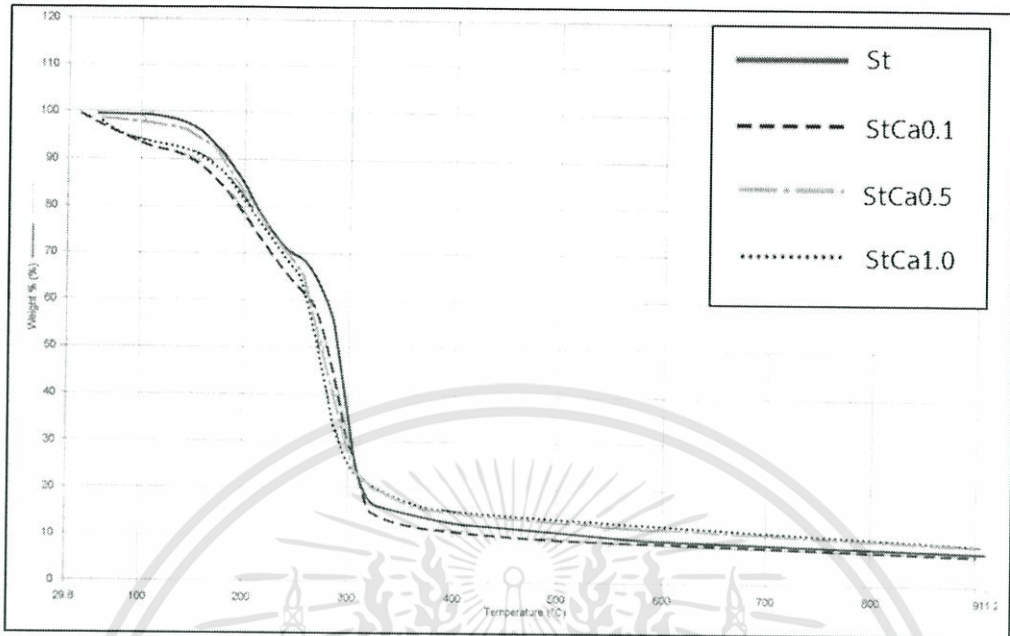
ตอนที่ 4.5.1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิดริกที่มีต่อฟิล์มแป้งกล้วย

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแป้งกล้วยสูตรต่างๆ

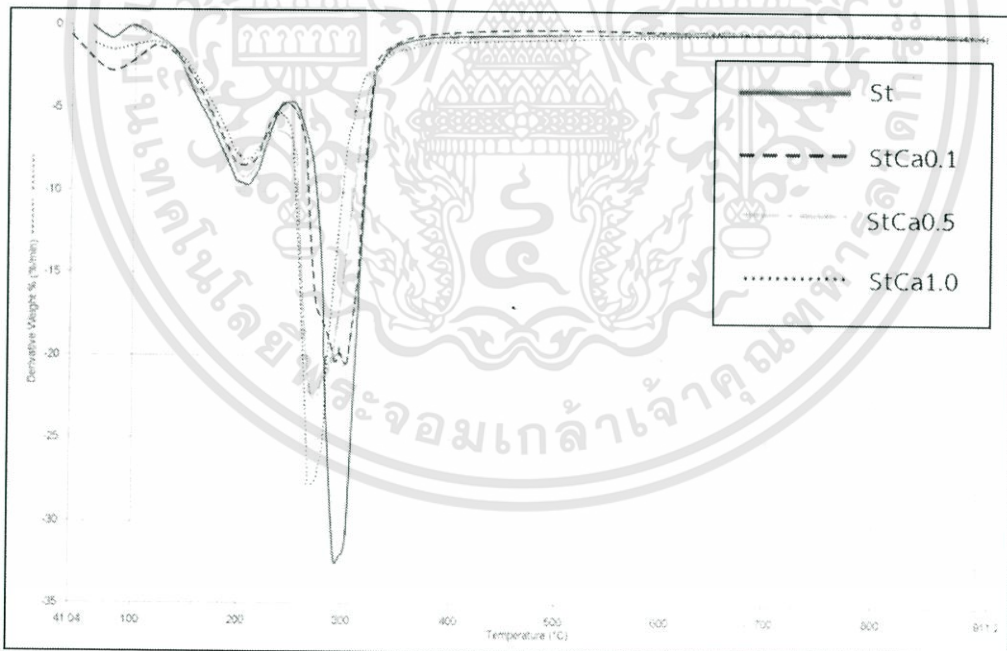
| สูตร | อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้ง (°C) | Mass loss Δy (%) |
|---------|----------------------------------|--------------------------|
| St | 280.87 | 53.33 |
| StCa0.1 | 271.30 | 50.66 |
| StCa0.5 | 260.64 | 50.45 |
| StCa1.0 | 258.99 | 49.43 |
| StCi0.1 | 285.46 | 42.35 |
| StCi0.5 | 285.87 | 43.99 |
| StCi1.0 | 283.26 | 43.15 |

จากตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 พบว่าฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1, 0.5 และ 1.0 ml มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งลดลงจาก 280 °C เป็น 271 °C, 260 °C และ 258 °C ตามลำดับ อาจเนื่องจากแคลเซียมไอออนเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ C-OH ในโครงสร้างของแป้ง ดังรูปที่ 4.7 ทำให้ความสามารถในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของแป้งลดลง พันธะไฮโดรเจนแบบ intermolecular และ intramolecular ในโมเลกุลของแป้งลดลง^[32] และพบว่ามีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (%mass loss) น้อยกว่าฟิล์มแป้งกล้วยที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่งเล็กน้อย

ฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายกรดซิดริก 0.1, 0.5 และ 1 ml. พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่เพิ่มขึ้นจาก 280 °C เป็น 285 °C, 285 °C และ 283 °C ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของแป้งลดลงจาก 53 % เป็น 42 %, 43 % และ 43 % ตามลำดับ อาจเป็นเพราะกรดซิดริกเข้าไปจับกับโครงสร้างของแป้ง เกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



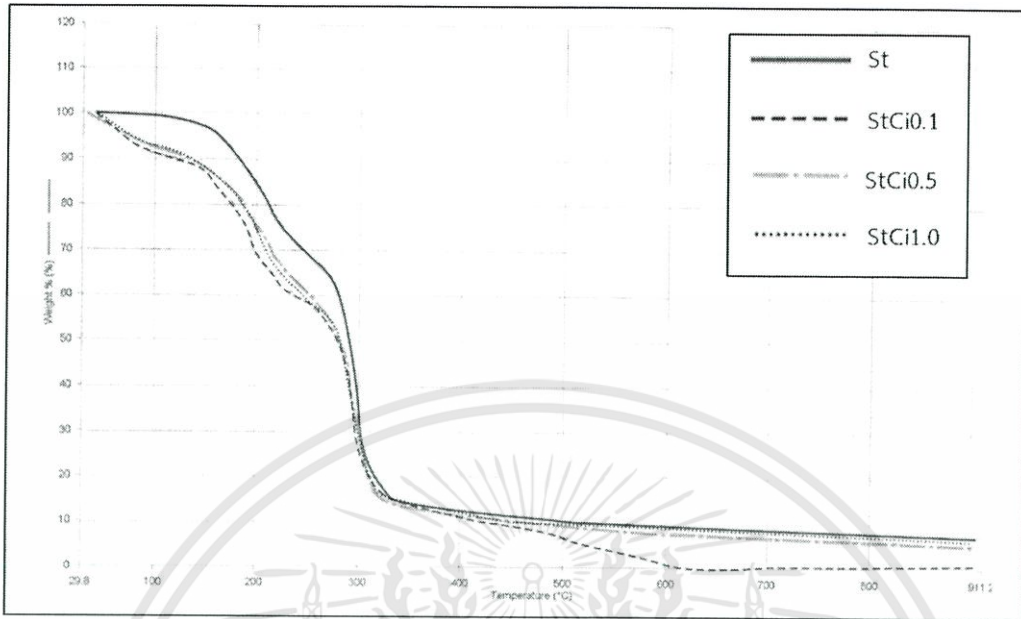
(ก)



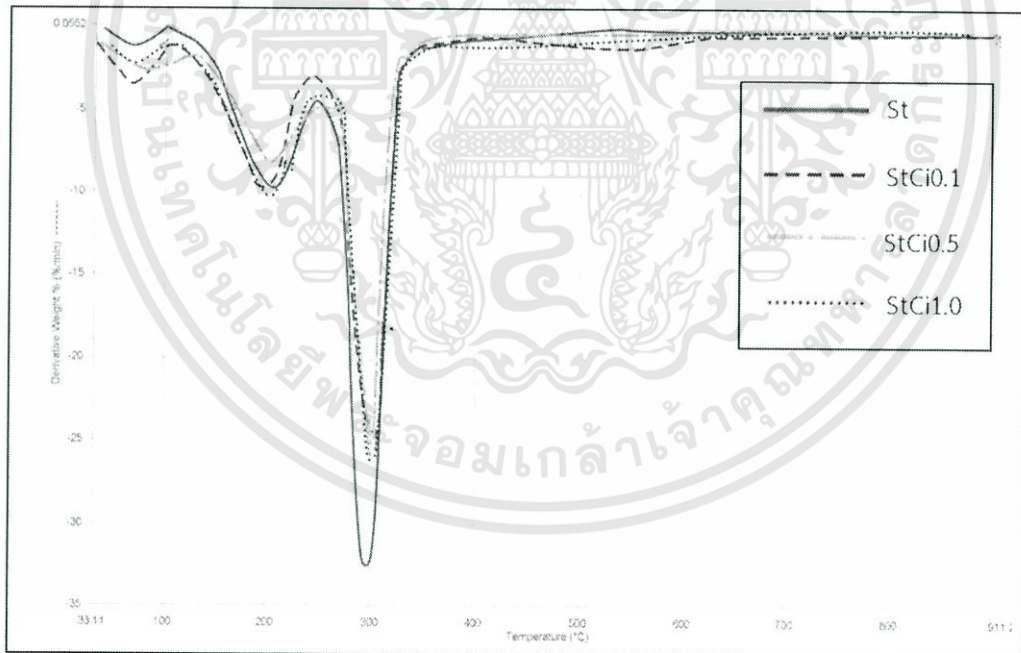
(ข)

รูปที่ 4.22 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าว
ที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวที่เติมสารละลายกรดซิตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

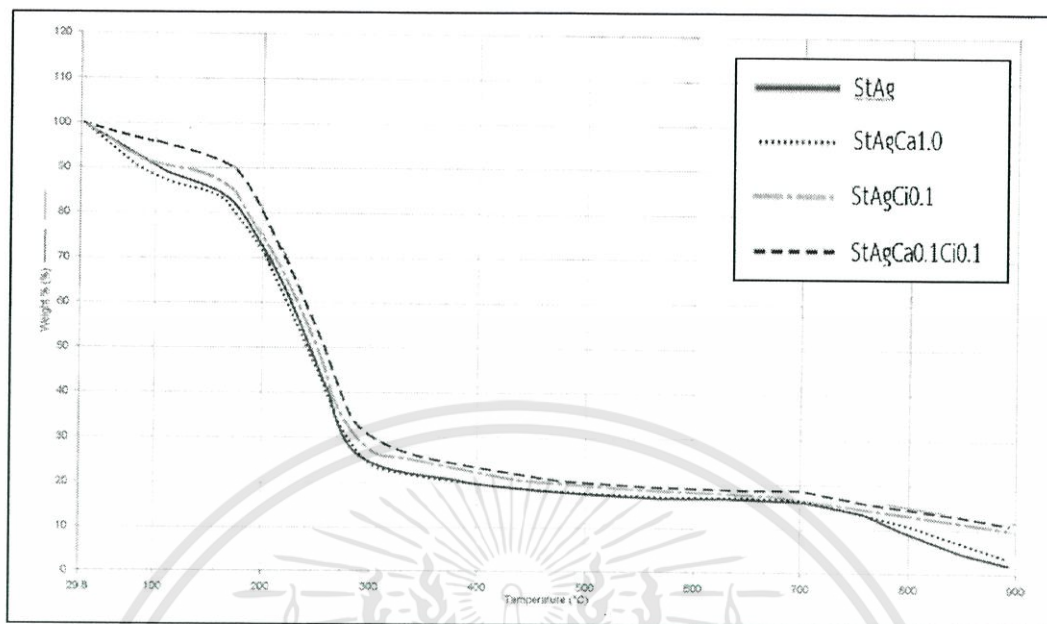
ตอนที่ 4.5.2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมระหว่างแป้งถั่วเขียวกับโซเดียมอัลจิเนต สูตรต่างๆ

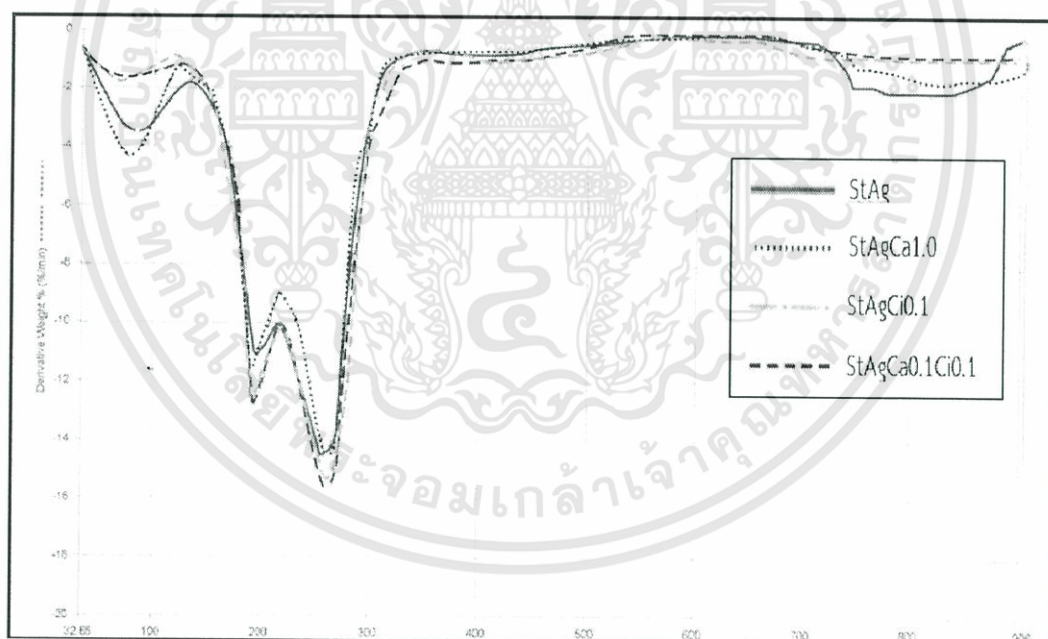
| สูตร | อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้ง (°C) | Mass loss Δy ของแป้ง (%) | อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของโซเดียมอัลจิเนต (°C) | Mass loss Δy ของอัลจิเนต (%) |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| St | 280.87 | 53.33 | - | - |
| Ag | - | - | 212.271 | 33.68 |
| StAg | 238.74 | 40.59 | 177.14 | 21.04 |
| StAgCa0.1 | 243.91 | 38.24 | 175.29 | 24.36 |
| StAgCi0.1 | 243.20 | 40.60 | 176.85 | 23.42 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 245.32 | 42.70 | 177.49 | 22.17 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 246.62 | 47.76 | 178.37 | 18.85 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 250.42 | 45.85 | 177.69 | 23.15 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 244.79 | 47.83 | 179.31 | 19.53 |

จากตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 พบว่าฟิล์มผสมสูตร StAg มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้ง 238 °C และอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของอัลจิเนต 177 °C ฟิล์มผสมที่เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือสารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. พบว่าฟิล์มมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งเพิ่มขึ้นเป็น 243 °C อาจเพราะแคลเซียมคลอไรด์หรือกรดซิตริกเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของแป้ง ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในสูตร StAgCa0.1Ci0.1 พบว่าฟิล์มมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งเพิ่มขึ้นเป็น 245 °C อาจเนื่องจากกรดซิตริกเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง จึงสลายตัวช้าลง ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวของโซเดียมอัลจิเนตมีค่าไม่ต่างจากเดิมมากนัก อาจเป็นเพราะโซเดียมอัลจิเนตที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มมีปริมาณน้อย

ฟิล์มผสมที่เติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และสารละลายกรดซิตริก 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 ml. ตามลำดับ พบว่าฟิล์มมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปแตกต่างกันมากนัก แสดงว่าการเพิ่มปริมาณกรดซิตริกไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มผสม

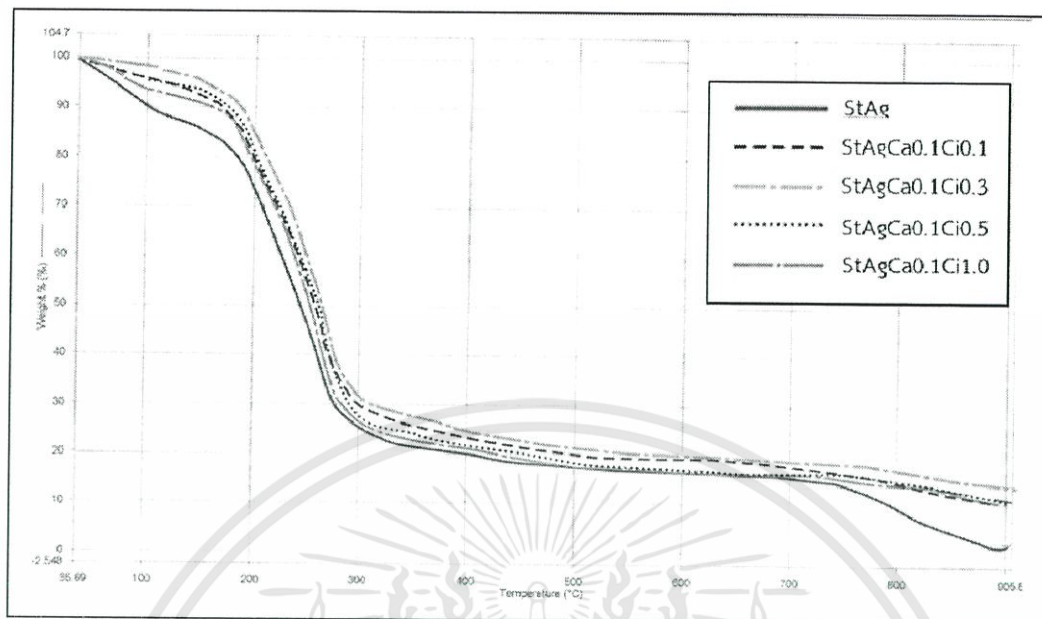


(ก)

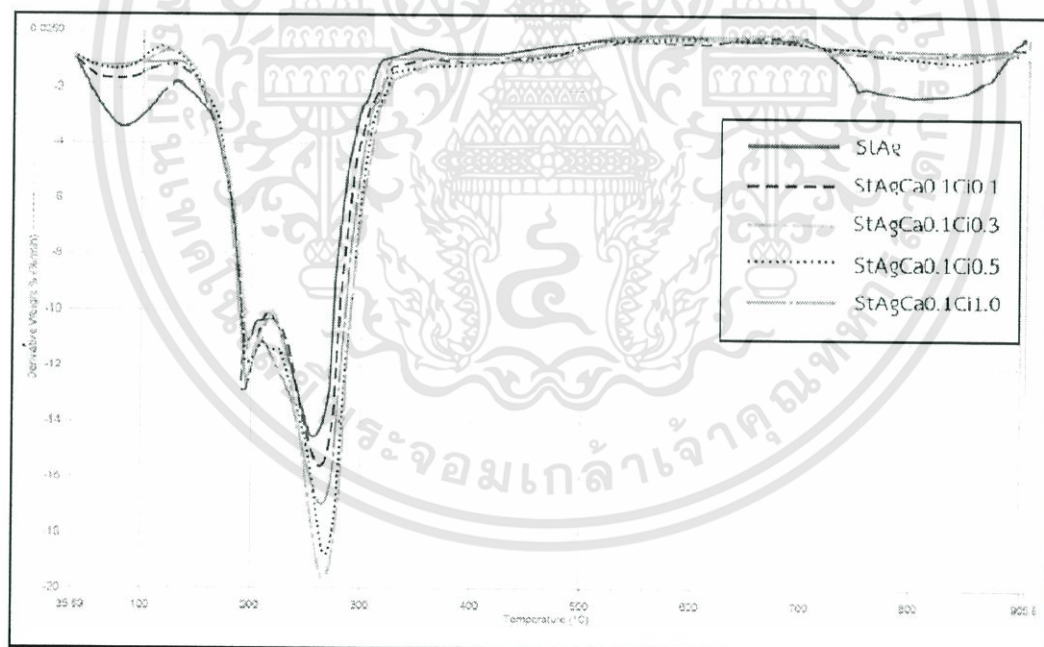


(ข)

รูปที่ 4.24 TG (ก) และ DTG (ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมระหว่าง แป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจินเตที่เติมสารเติมแต่งชนิดเดียวและสองชนิด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.25 TG(ก) และ DTG(ข) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมระหว่างแป้ง ถั่วเขียวและโซเดียมอัลจิเนตที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริกที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวเหนียวกับ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจิเนต โดยใช้ 3 %v/v กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และใช้ 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับ 2 %w/v สารละลายกรดซิตริกเป็นสารเติมแต่ง ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบ (Casting) การศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียว ตอนที่ 2 ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ทดสอบสมบัติการบวมน้ำ (%Swelling) ทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การศึกษาค่าของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกที่มีต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียว พบว่าสารละลายทั้ง 2 ชนิด มีผลต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียว โดยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวบวมน้ำได้น้อยลง สามารถทนน้ำได้นานขึ้น มีความแข็งและเหนียวมากขึ้น เช่นเดียวกับสารละลายกรดซิตริก

การศึกษาค่าของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกในฟิล์มผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมอัลจิเนตที่ผสมลงในฟิล์มแป้งข้าวเหนียว ทำให้การบวมน้ำสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดสูงขึ้น การเติมทั้งสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริกลงในฟิล์มผสม พบว่าฟิล์มแข็งแรง มีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น บวมน้ำได้ลดลง สามารถทนน้ำได้นานขึ้น และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

สรุปงานวิจัยฟิล์มผสมระหว่าง 5 %w/v สารละลายแป้งข้าวเหนียวกับ 5 %w/v สารละลายโซเดียมอัลจิเนต ที่อัตราส่วน 80:20 เติม 3 %v/v กลีเซอรอล 3 ml. เติม 2 %w/v สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 ml. และเติม 2 %w/v สารละลายกรดซิตริก 0.1 ml. (สูตร StAgCa0.1Ci0.1) เป็นอัตราส่วนเหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟิล์มมีสมบัติต่างๆดีขึ้น สามารถเป็นฟิล์มที่ใช้ห่อผลไม้ได้ เนื่องจากมีความแข็งแรง ยืดหยุ่นได้ และสามารถทนน้ำได้นาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหากรรมวิธีในการทำฟิล์มผสมให้มีความหนาสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้ค่าในการทดสอบสมบัติเชิงกลที่แน่นอน
2. ในระหว่างที่ทำการปั่นกวนสารละลายผสม ควรปิดด้วยแผ่นฟรอยด์เพราะจะทำให้อุณหภูมิขณะปั่นกวนคงที่ และป้องกันการกระเด็นออกของสารละลายผสม
3. ปรับเปลี่ยนปริมาณสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายกรดซิตริก เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน
4. ในการชั่งน้ำหนักสารใดๆ ควรใช้เครื่องชั่งตัวเดียวกันทั้งหมด เพื่อความแม่นยำที่แน่นอน



เอกสารอ้างอิง

- [1] Griffin, G. J. L. 1977. "Biodegradable synthetic resin sheet material containing starch and a fatty material." U.S. Patent : 4016117. USA .
- [2] Zhai, M. L. Zhao, L. Yoshii, F. and Kume, T. 2004. " Study on antibacterial starch/chitosan blend film formed under the action of irradiation." Carbohydrate Polymer. 57 : 83-88 .
- [3] Bao, J. S. Xing, J. Phillips, D. L. and Corke H. 2003. " Physical properties of octenyl succinic anhydride modified rice wheat and potato starches." Journal of Agricultural and Food Chemistry. 51 : 2283-2287 .
- [4] Choi, E-J. Kim, C-H. and Park, J-K. 1999. "Synthesis and characterization of starch-g-polycaprolactone copolymer." Macromolecules. 32 : 7402-7408 .
- [5] Ozdemir, M. and Floros, J. D. 2004. "Active food packaging technologies." Critical Review in Food Science and Nutrition. 44 : 185-193.
- [6] Zhao R. X., Torley P., Halley P. J. 2008. " Emerging biodegradable materials: Starch- and protein-based bio-nanocomposite." Journal of Material Science. 43 : 3058-3017.
- [7] Dilara, P. A. and Briassoulis, D. 2000. "Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering material." Journal of Agricultural Engineering Research. 76 : 309-321.
- [8] Reis, A. V. Guilherme, M. R. Moia, T. A. Mattoso, L. H. C. Muniz, E. C. and Tambourgi, E. B. 2008. "Synthesis and characterization of a starch-modified hydrogel as potential carrier for drug delivery system." Journal of Polymer Science Part A : Polymer Chemistry. 46 : 2567-2574.
- [9] วารุณี ตานันต์ และสายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก : การสังเคราะห์ การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้." วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัย อุบลราชธานี, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม 2557). หน้า 63-81.
- [10] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2558. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วเขียว. [Online]. Available : http://www.archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2554/enfo20354po_ch2.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ธ.ค. 2559.

- [12] กัลยรัตน์ วงศ์เจริญ, ชิวรัตน์ อุตเจริญ และชิวภัทร ปาโมกษ์. 2559. “การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ของไฮโดรเจลผสมระหว่าง อัลจิเนตและแป้งถั่วเขียว.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิตภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] Zhijun Wu and Chunhiao Li. 2017. “Preparation and Application of starch/polyvinyl Alcohol/Citric Acid Ternary Blend Antimicrobial Functional Food Packaging Films.” Department of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, China.
- [14] ดุษฎี อุตภาพ. 2560. **เคมีและสมบัติของแป้ง.** [Online]. Available : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ธ.ค. 2559.
- [15] อาทิตย์ ทิราวงศ์. **การใช้แคลเซียมคลอไรด์ในการปรับความนุ่มของพอลิเมอร์.** [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ธ.ค. 2559.
- [16] ยิ่งศักดิ์ ไกรพิณีจ, ดุษฎี อุตภาพ , วิไล รังสาดทอง , ชิขานาฏ วิทยาประภากร และจรัรัตน์ พุดตานเล็ก. 2558. **การศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งพุทธรักษา.** [Online]. Available : <http://kucon.lib.ku.ac.th/cjibin/kucon>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 ธ.ค. 2559.
- [17] สมภพ อินทสุวรรณ และพเยาว์ อินทสุวรรณ. “การสกัดแอลจิเนตจากสาหร่ายสีน้ำตาลบางสกุลในจังหวัดภาคใต้.” ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [18] ธนสรณ์ สารพิถีพิเศษ, สถาพร วันประสาธ และสรารุช ยุติกา. 2553. “การเตรียมฟิล์มวัสดุดูดซับน้ำยิ่งยวดจากสารละลายผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับโซเดียมอัลจิเนตโดยใช้ N,N-Methylene Bisacrylamide เป็นสารก่อกันระเชื่อมโยง.” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิตภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] รังสิมา ชลคุป, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2543. “พลาสติกไซเซอร์ในแป้งมันสำปะหลังผสมโพลีคาร์โปแลคโตน.” วิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 (สาขา อุตสาหกรรมเกษตร) : 529-536.
- [20] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนปนนท์ 2560. **กรดซิตริก.** [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1339/citric-acid>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ธ.ค. 2559.
- [21] Narendra Reddy and Yiqi Yang. 2010. “Citric acid cross-linking of starch films.” Journal Of Food Chemistry. 2010(118) : 702-711.

- [22] กิตติพงษ์ พัฒนา และภาชิต อนุตระกูลชัย. 2552. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งถั่วเขียวดัดแปรไฮดรอกซีพروفิล-คาร์บอกซีเมทิล.” วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์เภสัชกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [23] ชัยวุฒิ วัตจิง และคณะ. 2556. “ผลของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงสร้างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [24] พิสิษฐพันธ์ กาญจนตะชะ และคณะ. 2554. “ผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติเชิงกลและการต้านการซึมผ่านน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์.” วิทยานิพนธ์คณะเภสัชศาสตร์ หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ความงามและสุขภาพ, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [25] กฤติกา บุรณโชคไพศาล. 2556. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเส้นจากแป้งถั่วเขียวเพาะงอก.” วิทยานิพนธ์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- [26] จุฑาทิพย์ ลินสวัสดิ์ และคณะ. 2555. “การศึกษาคุณสมบัติทางกล และกายภาพของฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมสารพอลิแซคคาไรด์.” วิทยานิพนธ์คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [27] Cheappimolchai, W. Ishikawa, Y. Intabon, K. and Maekawa, T. 2002. “Production of biodegradable films from mungbean and soy protein film properties.” Department of Tsukuba University. Ibaraki, Japan.
- [28] Saari, V. Kasparkova, T. Sedlacek, P. Saha. 2015. “On the development and characterization of crosslinked sodium alginate/gelatin hydrogels.” Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials. 2013(18) : 152-166.
- [29] Marion Bruchet and Artem Melman. 2015. “Fabrication of patterned calcium cross-linked alginate hydrogel films and coatings through reductive cation exchange.” Department of Chemistry and Biomolecular Science, Clarkson University, USA.
- [30] Masoud Rezvani, Naveed Ahmad, Mohd Cairul Iqbal Mohd Amin, Shioh-Fern Ng. 2017. “Optimization, characterization, and in vitro assessment of alginate- pectinonic cross-linked hydrogel film for wound dressing.” Journal of Biologocal Macromolecules. 2017(97) : 131-40.
- [31] Yo Jiugao, Wang Ning, Ma Xiaofei. 2005. “The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by Glycerol.” School of science, Tianjin University, China.
- [32] Xiancai Jiang. et. al. 2012. “The plasticizing mechanism and effect of calcium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chloride on starch/poly(vinyl alcohol) films.” Department of polymer materials Engineering, Chengdu, China.

[33] Jiang, X. et. Al. 2012. “Modification of poly(vinyl alcohol) films by the addition of magnesium chloride hexahydrate.” Department of polymer engineering and science, 52(2012) : 1565-1570.

[34] Hye-Ryoung park. et. al. 2005. “Properties of starch/PVA Blend films containing citric acid as additive.” Faculty of Applied Chemical Engineering Chonnam University, Buk-gu, South Korea.

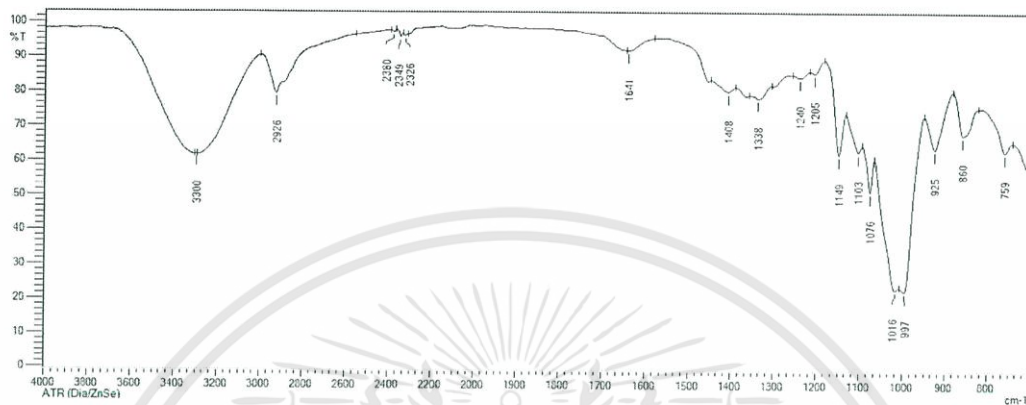




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

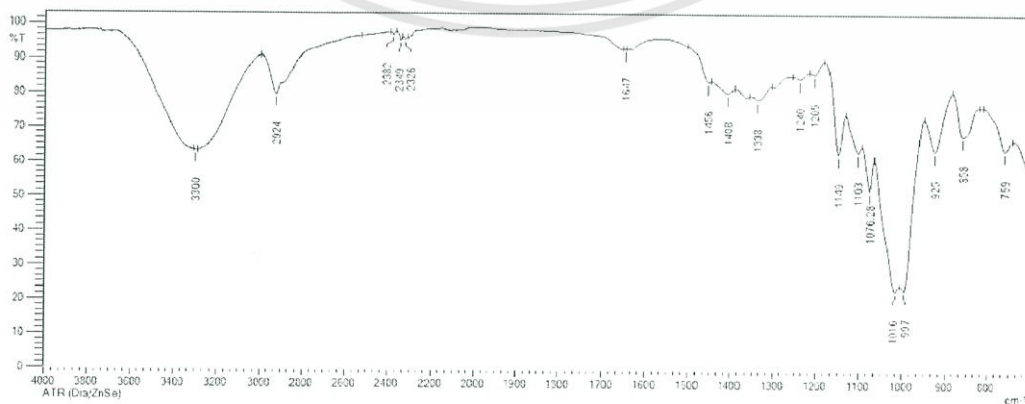
กราฟ IR สเปกตรัม



รูปที่ ก.1 สเปกตรัมของสูตร St

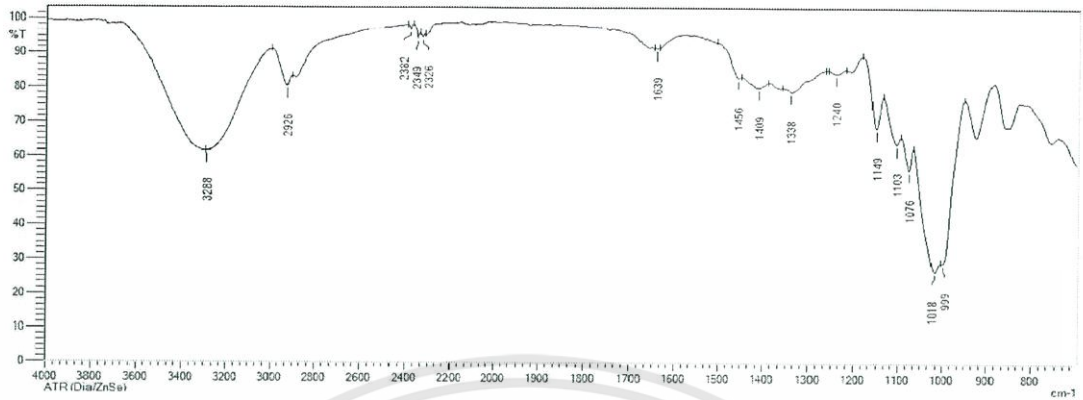


รูปที่ ก.2 สเปกตรัมของสูตร StCa0.1

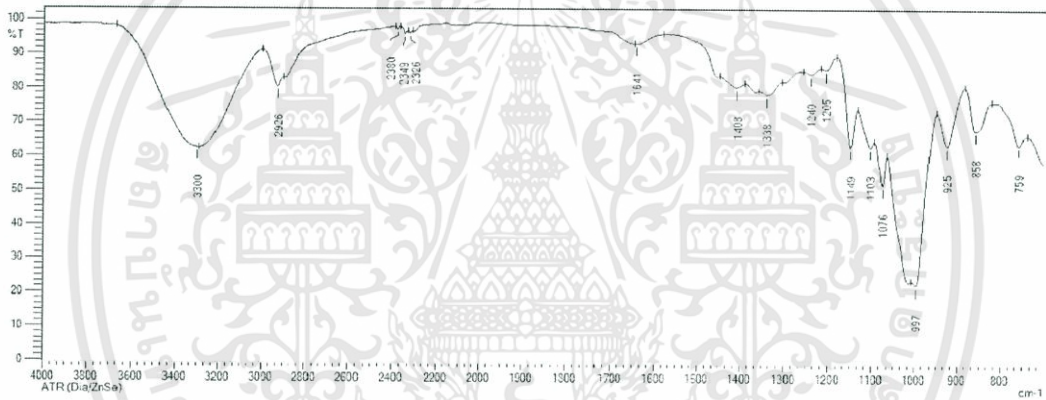


รูปที่ ก.3 สเปกตรัมของสูตร StCa0.5

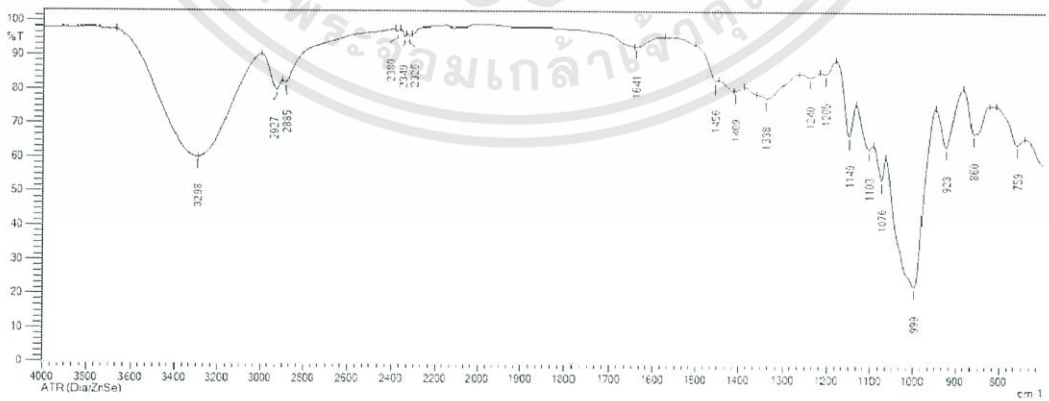
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 สเปกตรัมของสูตร StCa1.0

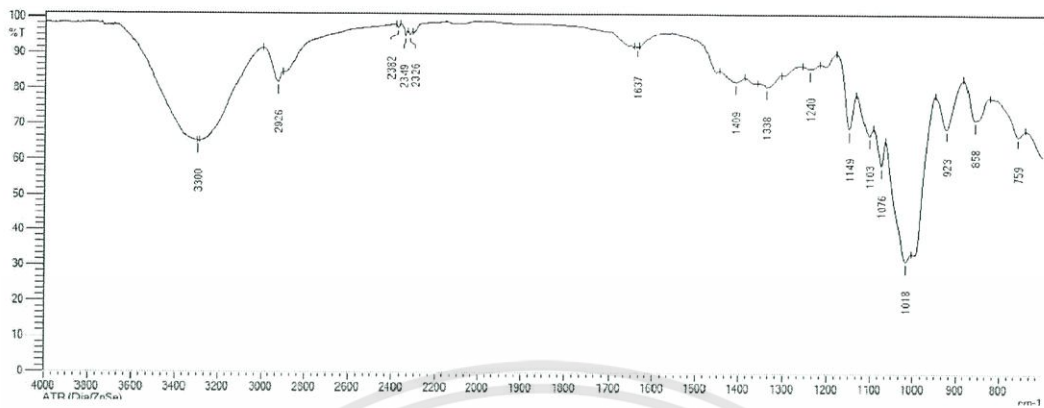


รูปที่ ก.5 สเปกตรัมของสูตร StCi0.1

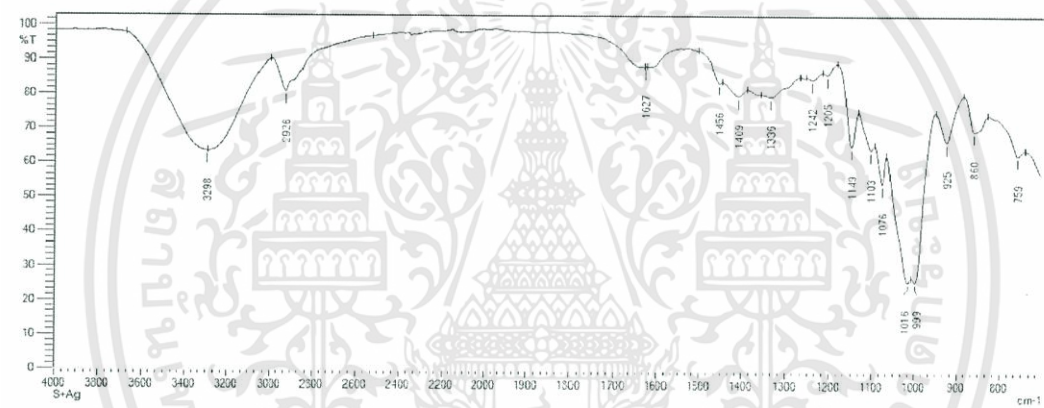


รูปที่ ก.6 สเปกตรัมของสูตร StCi0.5

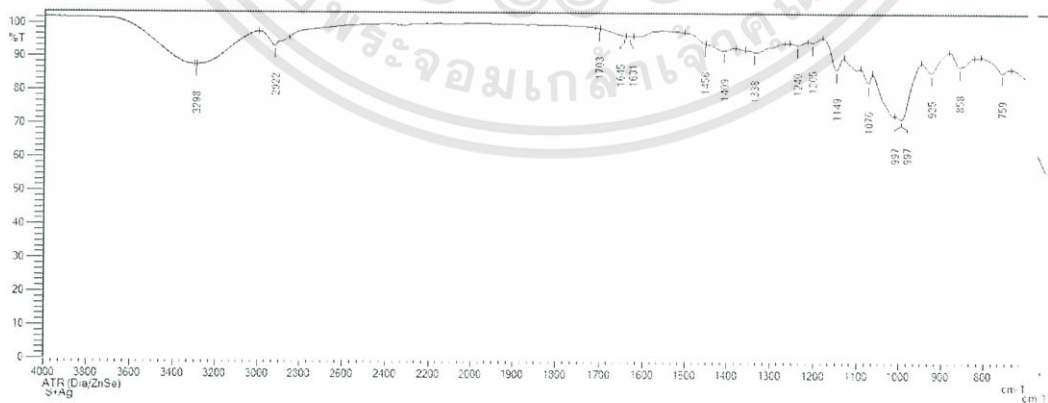
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 สเปกตรัมของสูตร StCi1.0

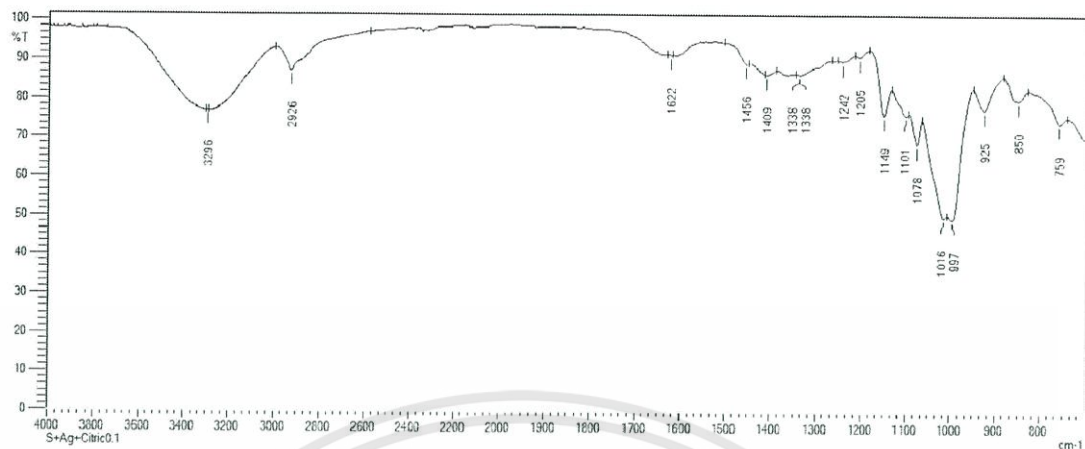
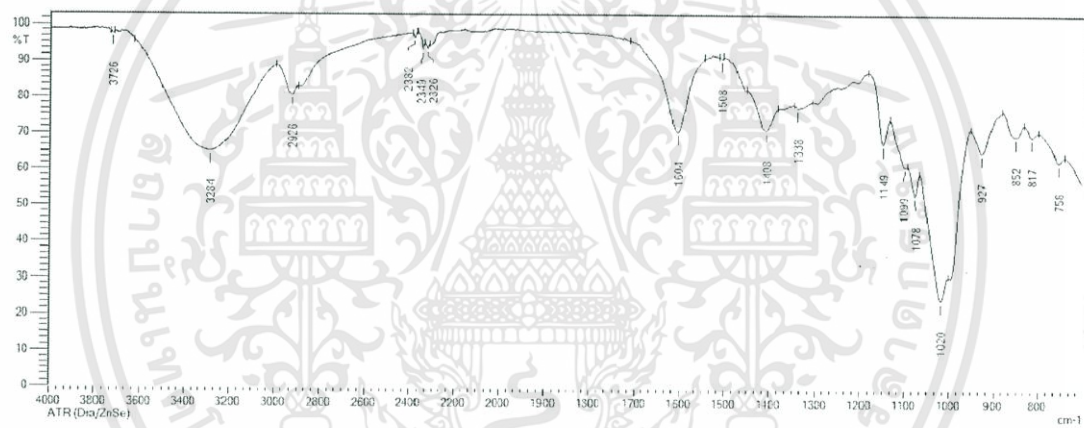
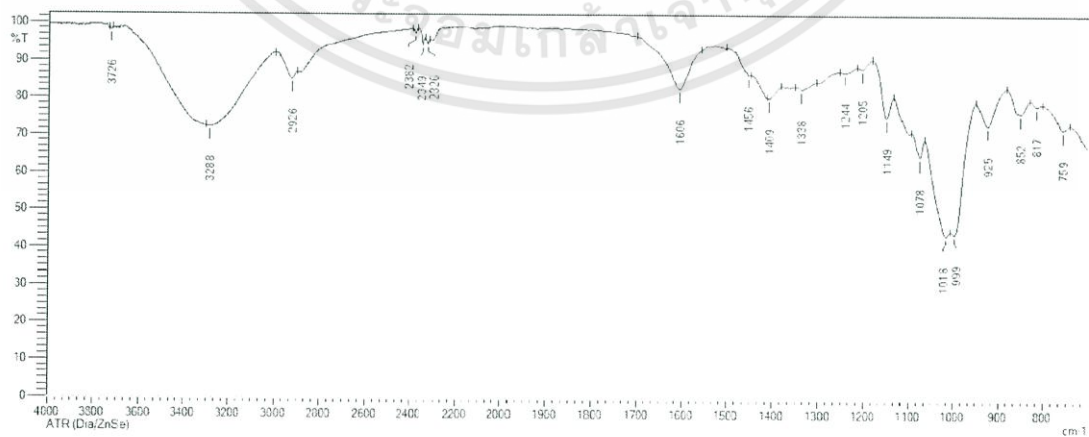


รูปที่ ก.8 สเปกตรัมของสูตร StAg

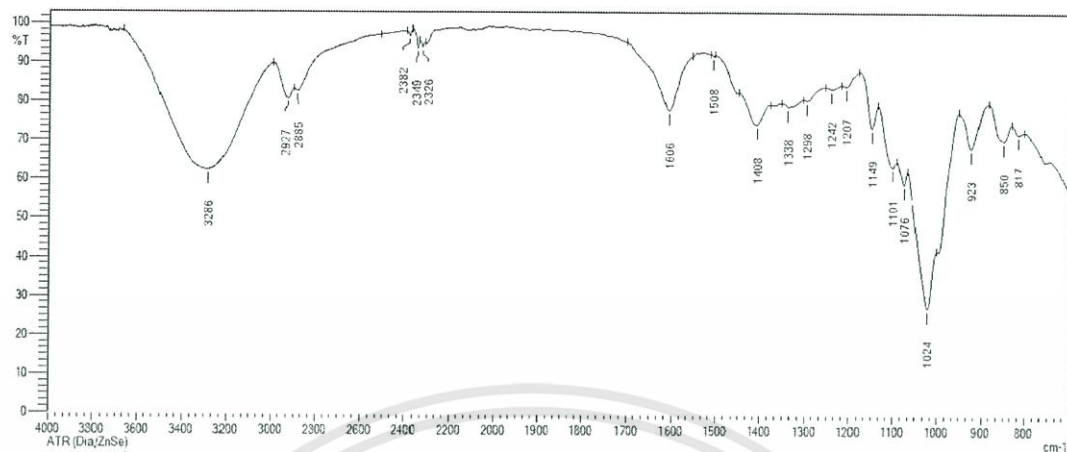


รูปที่ ก.9 สเปกตรัมของสูตร StAgCa0.1

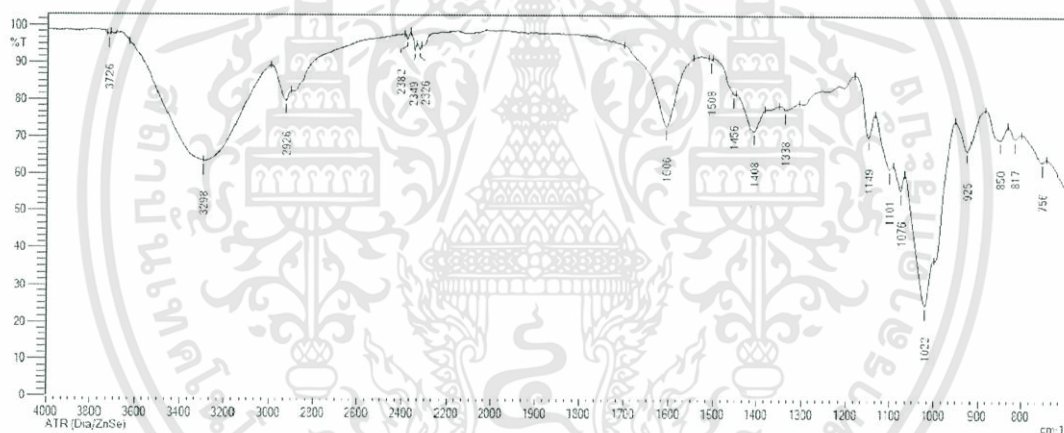
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.10 สเปกตรัมของสูตร $\text{StAgCl}_{0.1}$ รูปที่ ก.11 สเปกตรัมของสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Cl}_{0.1}$ รูปที่ ก.12 สเปกตรัมของสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Cl}_{0.3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.13 สเปกตรัมของสูตร StAgCa_{0.1}Ci_{0.5}



รูปที่ ก.14 สเปกตรัมของสูตร StAgCa_{0.1}Ci_{1.0}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

สมบัติการบวมตัวของฟิล์ม

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าน้ำหนักของฟิล์มหลังทดสอบการบวมน้ำ

| สูตร | อัตราส่วนแป้งหัว เปียก : | ปริมาณกลี เซอร์อล (ml.) | ปริมาณ แคลเซียมคลอ ไรด์ (ml.) | ปริมาณ กรดซิตริก (ml.) | น้ำหนัก ก่อนแช่ น้ำ (W ₀) | น้ำหนักหลังแช่ที่เวลาใดๆ (W _t) | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|--|--|
| | | | | | | 1 ชม. | 2 ชม. | 3 ชม. | 4 ชม. | 5 ชม. | 6 ชม. | 24 ชม. | | | | |
| | | | | | | โซเดียมอัลจิเนต | | | | | | | | | | |
| St | 100:0 | 3 | 0 | 0 | 0.0392 | 0.2381 | 0.2155 | 0.1447 | 0.1656 | 0.1550 | 0.1776 | 0.11531 | | | | |
| StCa0.1 | 100:0 | 3 | 0.1 | 0 | 0.0320 | 0.1093 | 0.1053 | 0.1273 | 0.1139 | 0.1363 | 0.1149 | 0.1092 | | | | |
| StAgCa0.5 | 100:0 | 3 | 0.5 | 0 | 0.0308 | 0.1556 | 0.1244 | 0.1156 | 0.1040 | 0.1214 | 0.1382 | 0.1353 | | | | |
| StAgCa1.0 | 100:0 | 3 | 1.0 | 0 | 0.0141 | 0.2123 | 0.1190 | 0.1165 | 0.1073 | 0.1018 | 0.1192 | 0.1233 | | | | |
| StAgCi0.1 | 100:0 | 3 | 0 | 0.1 | 0.0319 | 0.0793 | 0.0798 | 0.0948 | 0.0816 | 0.1019 | 0.0796 | 0.0822 | | | | |
| StAgCi0.5 | 100:0 | 3 | 0 | 0.5 | 0.0349 | 0.0823 | 0.0879 | 0.0964 | 0.0660 | 0.0899 | 0.0706 | 0.0722 | | | | |
| StAgCi1.0 | 100:0 | 3 | 0 | 1.0 | 0.0423 | 0.1125 | 0.1092 | 0.1182 | 0.1181 | 0.1195 | 0.0971 | 0.0947 | | | | |
| StAg | 80:20 | 3 | 0 | 0 | 0.0273 | 0.3846 | 0.3955 | 0.3428 | 0.3438 | 0.3244 | 0.2818 | - | | | | |
| StAgCa0.1 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0 | 0.0221 | 0.2451 | 0.2301 | 0.2537 | 0.2537 | 0.2538 | 0.2026 | 0.2086 | | | | |
| StAgCi0.1 | 80:20 | 3 | 0 | 0.1 | 0.0338 | 0.3110 | 0.3833 | 0.3833 | 0.3504 | 0.3422 | 0.3338 | - | | | | |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.1 | 0.0351 | 0.1910 | 0.2629 | 0.2103 | 0.2071 | 0.2040 | 0.1842 | 0.1818 | | | | |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.3 | 0.0365 | 0.1938 | 0.1980 | 0.2189 | 0.2119 | 0.2054 | 0.1774 | 0.1965 | | | | |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.5 | 0.0325 | 0.1997 | 0.2069 | 0.2099 | 0.2107 | 0.2221 | 0.1723 | 0.1840 | | | | |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 80:20 | 3 | 0.1 | 1.0 | 0.0205 | 0.2245 | 0.2370 | 0.2349 | 0.2325 | 0.2189 | 0.2302 | 0.2537 | | | | |

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการทดสอบการบวมตัวของฟิล์ม

| สูตร | อัตราส่วน แป้งถั่วเขียว : โพลีเอทิลีนแอด จิเนต | ปริมาณ กลี- เซอรอล (mL.) | ปริมาณ แคลเซียม คลอไรด์ (mL.) | ปริมาณ กรด ซิตริก (mL.) | น้ำหนัก ก่อนแช่ น้ำ (W ₀) | % Swelling (%w/w) | | | | | | |
|----------------|---|-----------------------------------|--|----------------------------------|---|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | | | 1 ชม. | 2 ชม. | 3 ชม. | 4 ชม. | 5 ชม. | 6 ชม. | 24 ชม. |
| St | 100:0 | 3 | 0 | 0 | 0.0392 | 507.3980 | 449.7449 | 269.1327 | 322.4490 | 295.4082 | 353.0612 | 290.5612 |
| StCa0.1 | 100:0 | 3 | 0.1 | 0 | 0.0320 | 242.6332 | 230.0940 | 299.0596 | 257.0533 | 327.2727 | 260.1881 | 242.3198 |
| StAgCa0.5 | 100:0 | 3 | 0.5 | 0 | 0.0308 | 345.8453 | 256.4470 | 231.2321 | 197.9943 | 247.8510 | 295.9885 | 287.6791 |
| StAgCa1.0 | 100:0 | 3 | 1.0 | 0 | 0.0141 | 401.8913 | 181.3239 | 175.4137 | 153.6643 | 140.6619 | 181.7967 | 191.4894 |
| StAgCi0.1 | 100:0 | 3 | 0 | 0.1 | 0.0319 | 147.8125 | 149.3750 | 196.2500 | 155.0000 | 218.4375 | 148.7500 | 156.8750 |
| StAgCi0.5 | 100:0 | 3 | 0 | 0.5 | 0.0349 | 167.2078 | 185.3896 | 212.9801 | 114.2857 | 191.8831 | 129.2208 | 134.4156 |
| StAgCi1.0 | 100:0 | 3 | 0 | 1.0 | 0.0423 | 697.8723 | 674.4681 | 738.2979 | 737.5887 | 747.5177 | 588.6525 | 571.6312 |
| StAg | 80:20 | 3 | 0 | 0 | 0.0273 | 1308.7912 | 1348.7179 | 1155.6777 | 1159.3407 | 1088.2784 | 932.2344 | - |
| StAgCa0.1 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0 | 0.0221 | 1009.0498 | 941.1765 | 1047.9638 | 1064.2534 | 1048.4163 | 816.7421 | 843.8914 |
| StAgCi0.1 | 80:20 | 3 | 0 | 0.1 | 0.0338 | 820.1183 | 1034.0237 | 887.5740 | 936.6864 | 912.4260 | 887.5740 | - |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.1 | 0.0351 | 444.1595 | 649.0029 | 499.1453 | 490.0285 | 481.1966 | 424.7863 | 417.9487 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.3 | 0.0365 | 430.9589 | 442.4658 | 499.7260 | 480.5480 | 462.7397 | 386.0274 | 438.3562 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 80:20 | 3 | 0.1 | 0.5 | 0.0325 | 514.4615 | 536.6154 | 545.8462 | 548.3077 | 583.3846 | 430.1539 | 466.1539 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 80:20 | 3 | 0.1 | 1.0 | 0.0205 | 995.1220 | 1056.0976 | 1045.8537 | 1034.1463 | 967.8049 | 1022.9268 | 1137.5610 |

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความหนาของฟิล์ม

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | $\bar{x} \pm SD$ |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| St | 0.090 | 0.090 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.096 ± 0.0055 |
| StCa0.1 | 0.100 | 0.100 | 0.110 | 0.120 | 0.110 | 0.108 ± 0.0084 |
| StCa0.5 | 0.120 | 0.120 | 0.110 | 0.110 | 0.120 | 0.116 ± 0.0055 |
| StCa1.0 | 0.100 | 0.100 | 0.110 | 0.100 | 0.080 | 0.098 ± 0.0110 |
| StCi0.1 | 0.130 | 0.130 | 0.120 | 0.140 | 0.120 | 0.128 ± 0.0084 |
| StCi0.5 | 0.090 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.100 | 0.086 ± 0.0089 |
| StCi1.0 | 0.100 | 0.110 | 0.090 | 0.110 | 0.090 | 0.100 ± 0.0100 |
| StAg | 0.950 | 0.950 | 0.100 | 0.950 | 0.090 | 0.098 ± 0.0110 |
| StAgCa0.1 | 0.100 | 0.080 | 0.080 | 0.100 | 0.080 | 0.088 ± 0.0110 |
| StAgCi0.1 | 0.090 | 0.090 | 0.120 | 0.130 | 0.110 | 0.108 ± 0.0179 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 0.110 | 0.120 | 0.130 | 0.090 | 0.110 | 0.112 ± 0.0148 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.110 | 0.090 | 0.112 ± 0.0130 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 0.110 | 0.110 | 0.120 | 0.120 | 0.110 | 0.114 ± 0.0055 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 0.110 | 0.130 | 0.120 | 0.130 | 0.130 | 0.124 ± 0.0089 |

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์ม

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | $\bar{x} \pm SD$ |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| St | 2.5308 | 2.7241 | 2.8291 | 2.7283 | 2.4561 | 2.6537 ± 0.1544 |
| StCa0.1 | 3.1429 | 3.1928 | 2.944 | 2.5775 | 3.5715 | 3.0857 ± 0.3636 |
| StCa0.5 | 3.2842 | 2.9829 | 2.8884 | 3.0761 | 3.2197 | 3.0902 ± 0.1634 |
| StCa1.0 | 3.6251 | 2.6746 | 2.7077 | 3.2491 | 4.1349 | 3.2782 ± 0.6214 |
| StCi0.1 | 3.4128 | 3.0541 | 3.0563 | 3.4999 | 3.3521 | 3.2750 ± 0.1544 |
| StCi0.5 | 3.0036 | 3.4237 | 3.2007 | 3.7538 | 3.731 | 3.4225 ± 0.3277 |
| StCi1.0 | 2.5306 | 3.2108 | 3.5697 | 2.6316 | 2.7179 | 2.9321 ± 0.4420 |
| StAg | 3.8676 | 3.9676 | 3.1987 | 3.2286 | 3.9723 | 3.6469 ± 0.3979 |
| StAgCa0.1 | 2.564 | 2.535 | 3.1717 | 3.4832 | - | 2.9384 ± 0.4669 |
| StAgCi0.1 | 5.3306 | 4.0129 | 5.4669 | 5.433 | 4.0138 | 4.8514 ± 0.7667 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 4.0573 | 3.7481 | 4.2407 | 4.0518 | 3.3113 | 3.8818 ± 0.3646 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 4.2318 | 5.7814 | 4.9485 | 5.7917 | - | 5.1883 ± 0.7501 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 3.5783 | 3.5386 | 3.5793 | 4.7172 | 4.4139 | 3.6080 ± 0.3372 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 3.3536 | - | 3.3227 | 3.7208 | 4.0351 | 3.8580 ± 0.6625 |

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของฟิล์ม

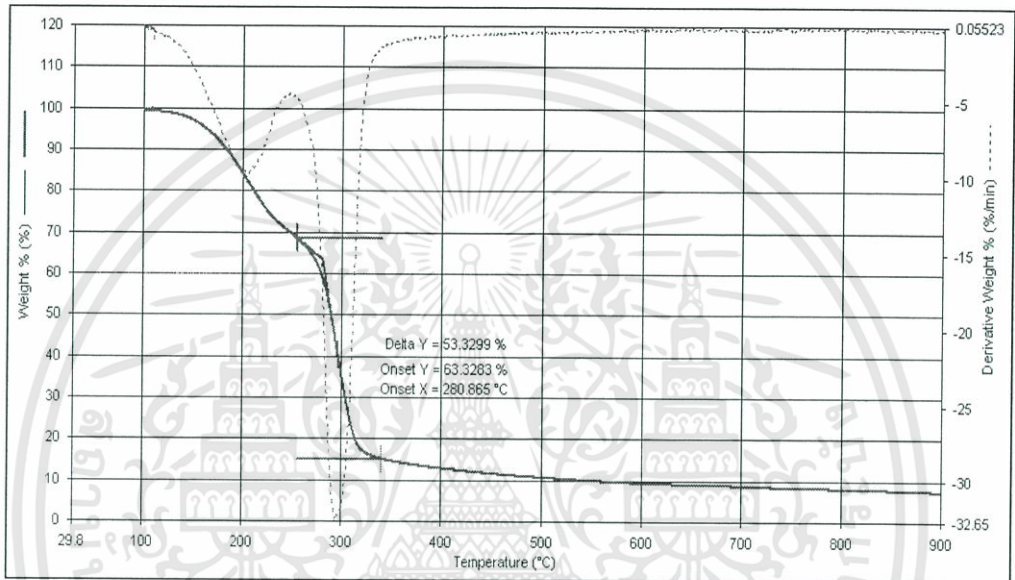
| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | $\bar{x} \pm SD$ |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------|
| St | 46.627 | 38.687 | 35.823 | 42.013 | 44.727 | 41.5754 \pm 4.3896 |
| StCa0.1 | 27.299 | 34.945 | 38.49 | 33.341 | 23.374 | 31.4898 \pm 6.0785 |
| StCa0.5 | 32.906 | 31.849 | 35.628 | 30.459 | 30.096 | 32.1876 \pm 2.2265 |
| StCa1.0 | 29.537 | 37.779 | 27.752 | 29.963 | 23.087 | 29.6236 \pm 5.3118 |
| StCi0.1 | 27.31 | 28.334 | 34.257 | 27.891 | 29.472 | 29.4528 \pm 2.8001 |
| StCi0.5 | 26.446 | 24.463 | 28.239 | 33.192 | 30.958 | 28.6596 \pm 3.4825 |
| StCi1.0 | 41.82 | 35.351 | 36.652 | 32.603 | 29.933 | 35.2718 \pm 4.4837 |
| StAg | 60.329 | 64.68 | 81.337 | 55.109 | 52.737 | 62.8384 \pm 11.3321 |
| StAgCa0.1 | 98.14 | 74.611 | 86.809 | 99.721 | - | 89.8202 \pm 11.6566 |
| StAgCi0.1 | 43.279 | 30.021 | 40.235 | 37.535 | 40.141 | 38.2422 \pm 5.0257 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 60.23 | 53.14 | 65.625 | 51.59 | 66.421 | 59.4012 \pm 6.8723 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 54.638 | 48.875 | 59.139 | 48.895 | 54.576 | 53.2246 \pm 4.3723 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 58.42 | 67.702 | 60.086 | 61.44 | 58.326 | 61.1948 \pm 3.8588 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 68.2 | 72.269 | 79.973 | 65.092 | 62.455 | 69.5978 \pm 6.8566 |

ตารางที่ ค.4 แสดงค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์ม

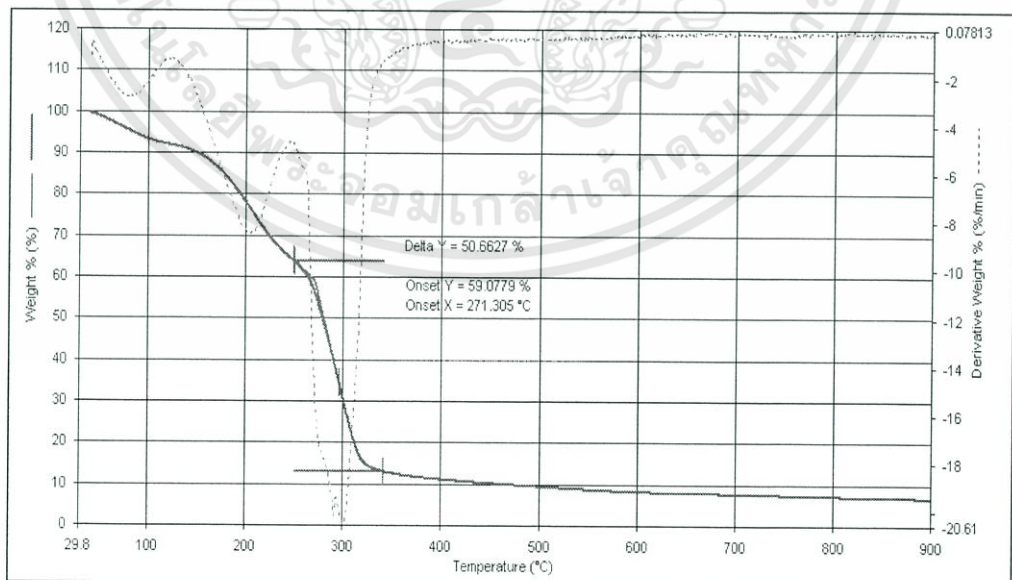
| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | $\bar{x} \pm SD$ |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| St | 19.808 | 21.149 | 19.001 | 22.813 | 18.505 | 20.2552 ± 1.7448 |
| StCa0.1 | 33.354 | 36.777 | 30.253 | 37.755 | 31.203 | 33.8684 ± 3.3168 |
| StCa0.5 | 41.401 | 33.22 | 27.969 | 31.804 | 31.475 | 33.1738 ± 4.9885 |
| StCa1.0 | 42.971 | 32.182 | 35.687 | 43.348 | 30.853 | 38.5470 ± 5.5170 |
| StCi0.1 | 20.744 | 32.915 | 40.414 | 31.817 | 32.473 | 31.6726 ± 7.0365 |
| StCi0.5 | 35.132 | 35.915 | 36.828 | 45.571 | 34.516 | 37.5924 ± 4.5436 |
| StCi1.0 | 25.024 | 25.076 | 24.57 | 27.937 | 19.195 | 24.3604 ± 3.1807 |
| StAg | - | 42.707 | 49.24 | 88.581 | 46.706 | 56.8085 ± 21.3517 |
| StAgCa0.1 | 29.3135 | 24.8606 | 22.288 | 19.588 | - | 24.0125 ± 4.1380 |
| StAgCi0.1 | 69.05 | 50.336 | 68.112 | 60.39 | 56.264 | 60.8304 ± 7.9335 |
| StAgCa0.1Ci0.1 | 41.908 | 35.2272 | 46.9104 | 45.794 | 36.4622 | 41.2603 ± 5.2290 |
| StAgCa0.1Ci0.3 | 99.91 | 53.897 | 94.08 | 92.611 | 67.89 | 81.6776 ± 19.7967 |
| StAgCa0.1Ci0.5 | 49.083 | 36.1309 | 48.7413 | 34.773 | 30.948 | 39.93524 ± 8.4130 |
| StAgCa0.1Ci1.0 | 39.0344 | 35.3149 | 27.9942 | 31.214 | 33.3667 | 33.38484 ± 4.1657 |

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบ TGA

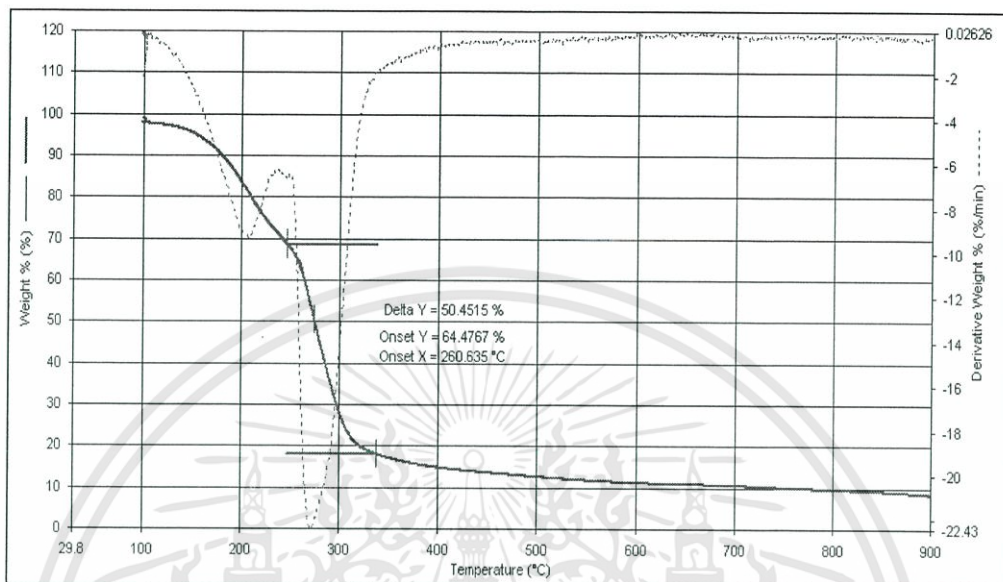


รูปที่ ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร St

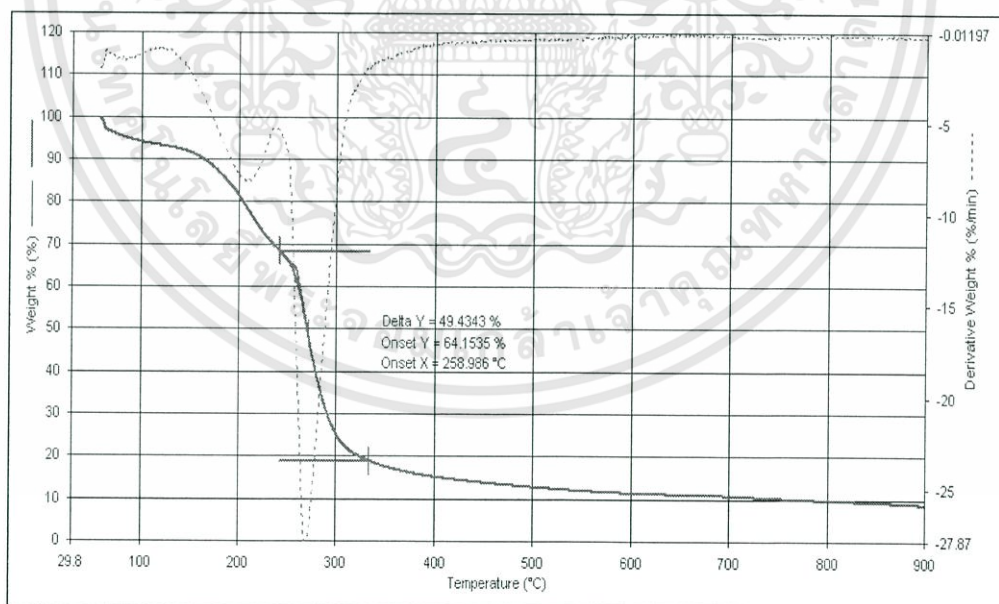


รูปที่ ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCa0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

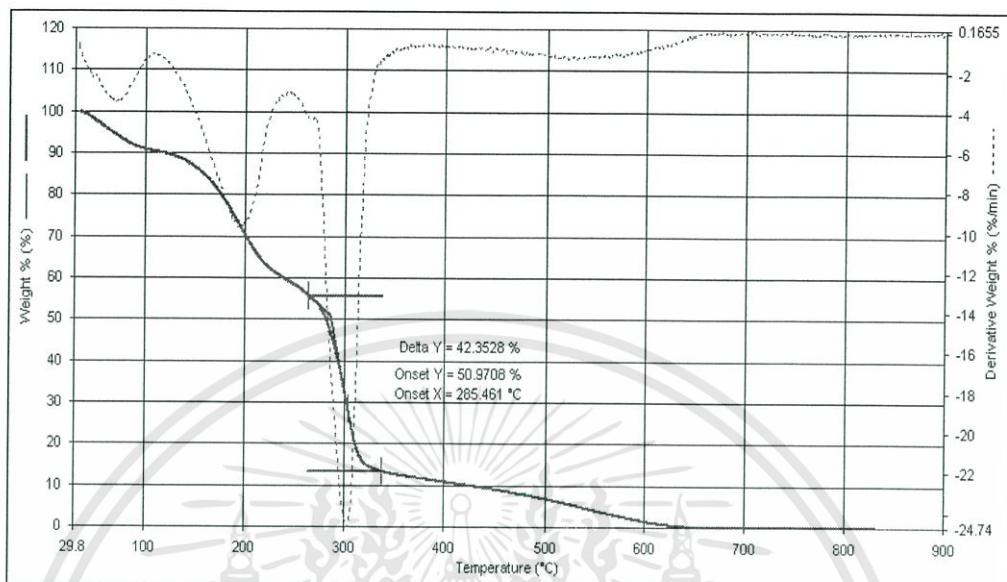


รูปที่ 3 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCa_{0.5}

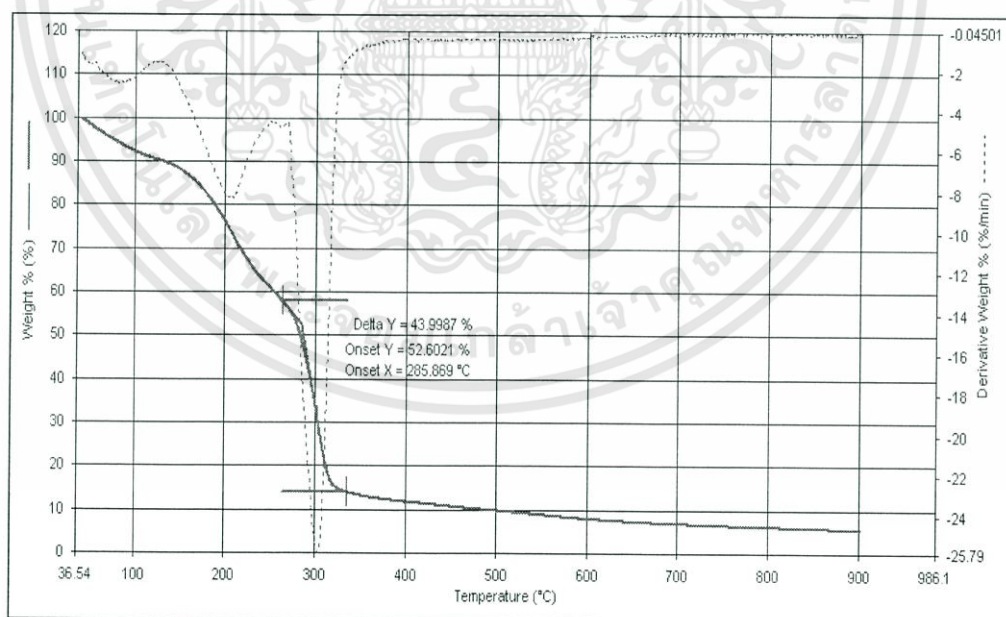


รูปที่ 4 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCa_{1.0}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

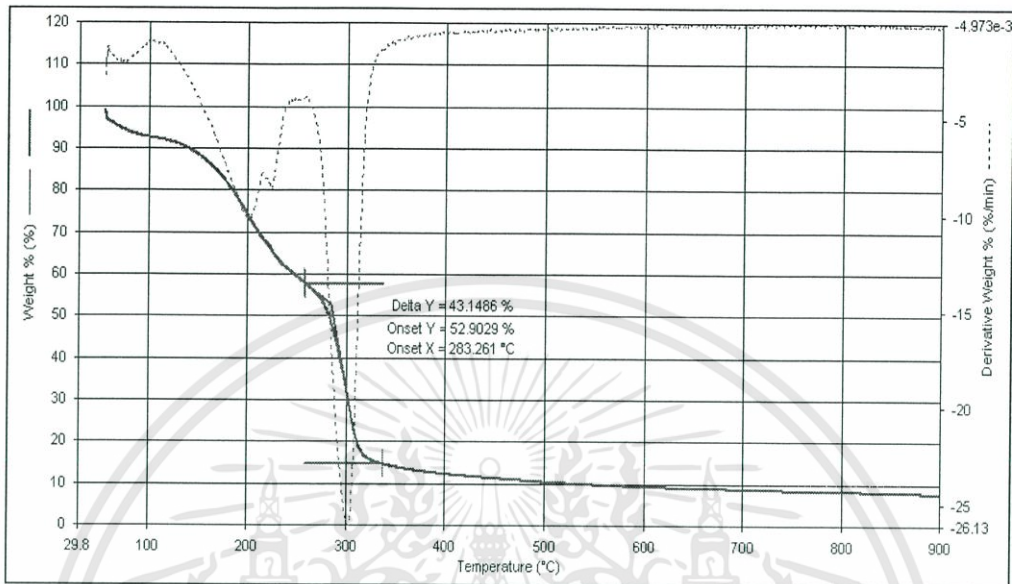


รูปที่ ๕.5 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCl_{0.1}

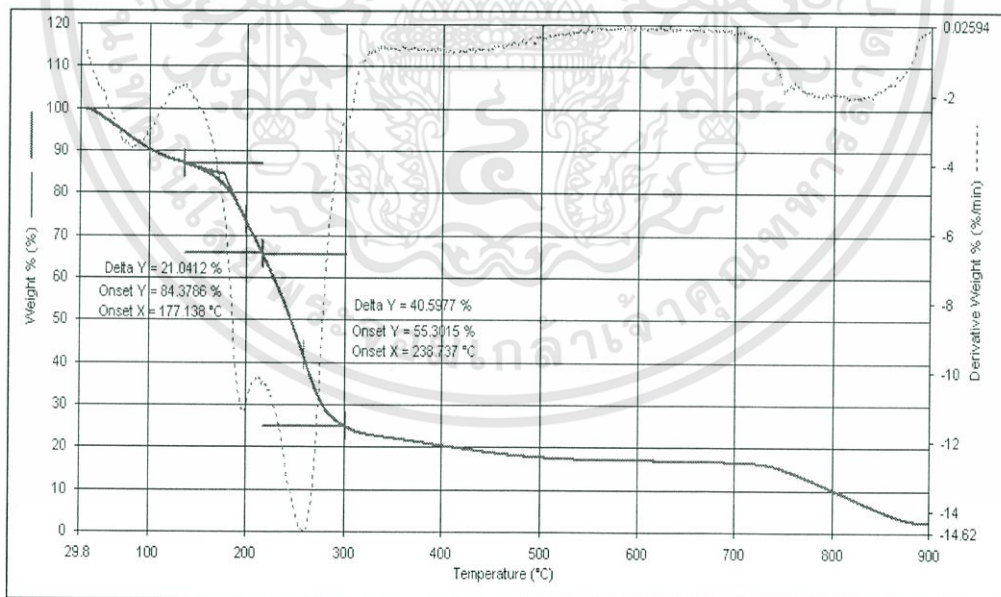


รูปที่ ๕.6 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCl_{0.5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

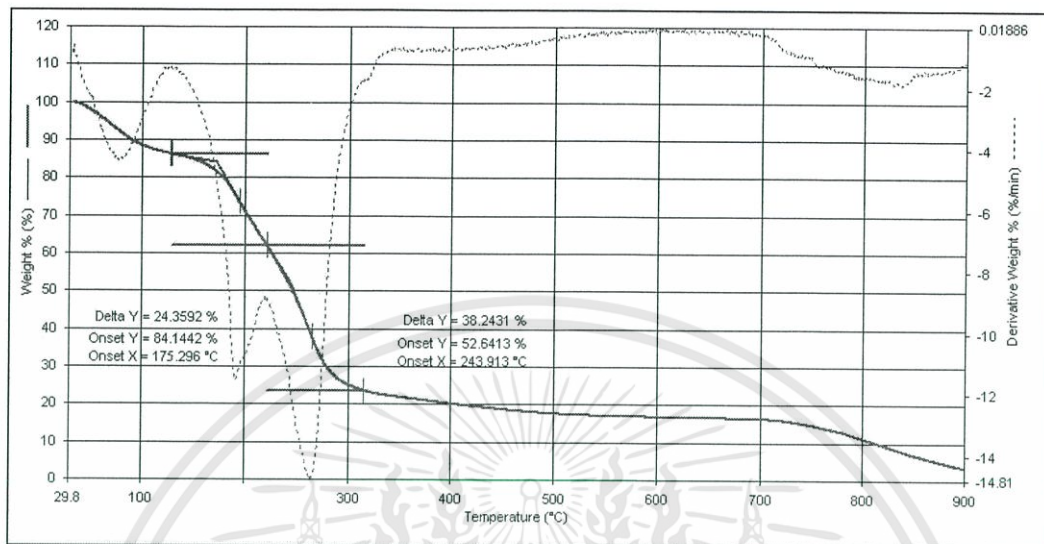


รูปที่ ๗.๗ แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StCi1.0

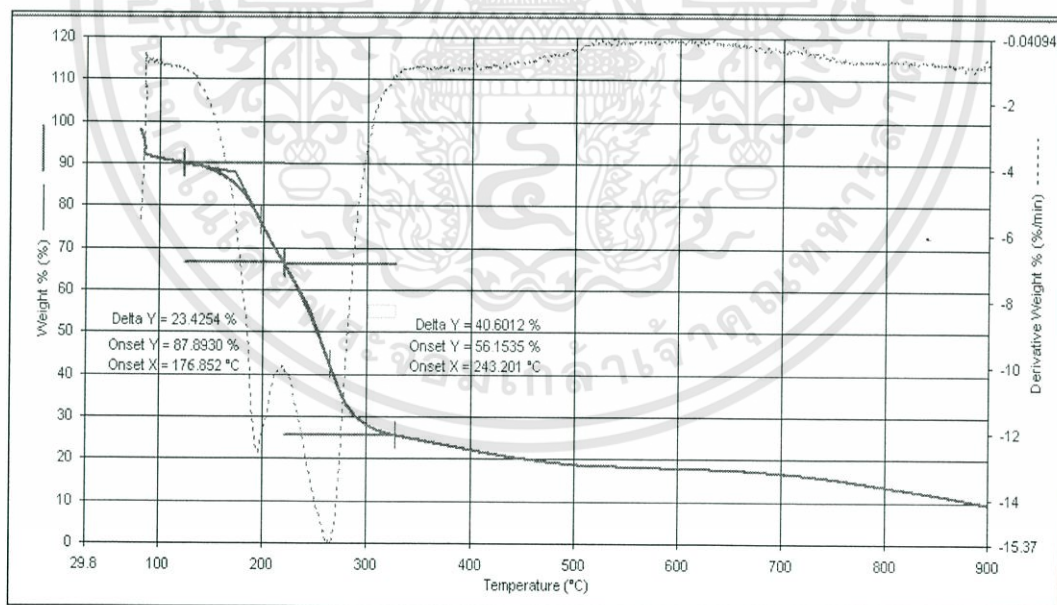


รูปที่ ๗.๘ แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร StAg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

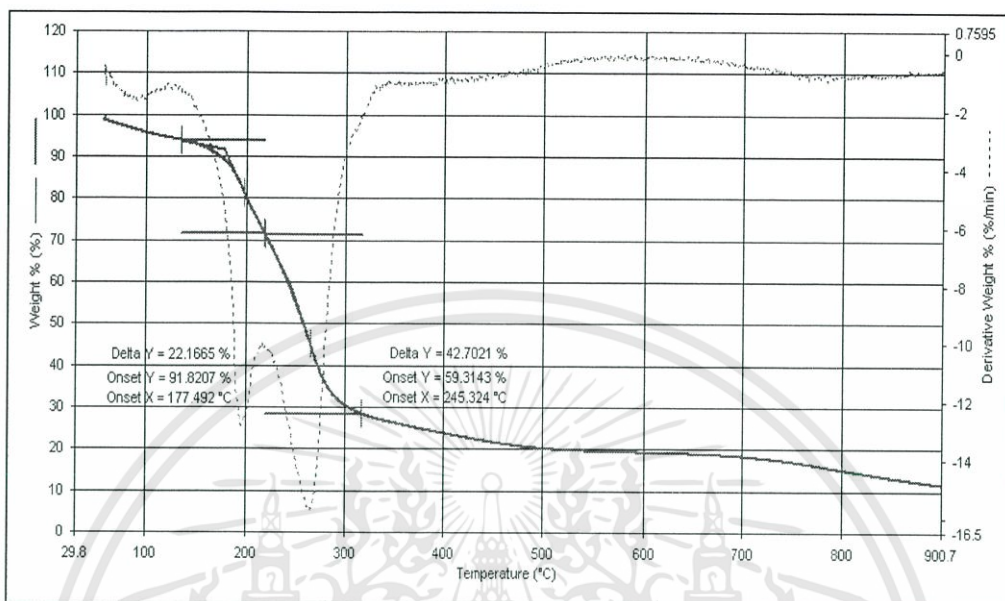


รูปที่ 9.9 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}$

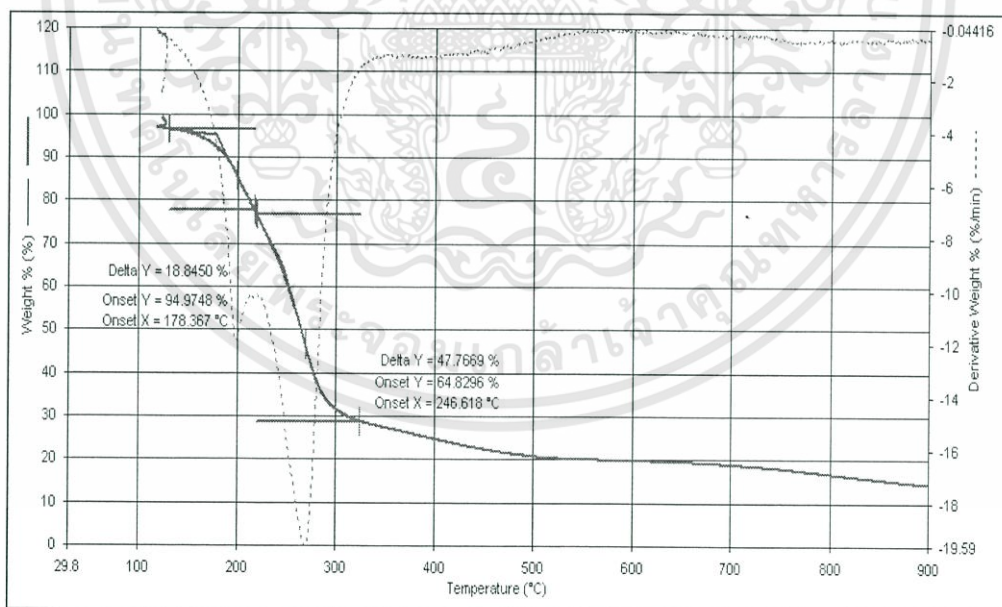


รูปที่ 9.10 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCl}_{0.1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

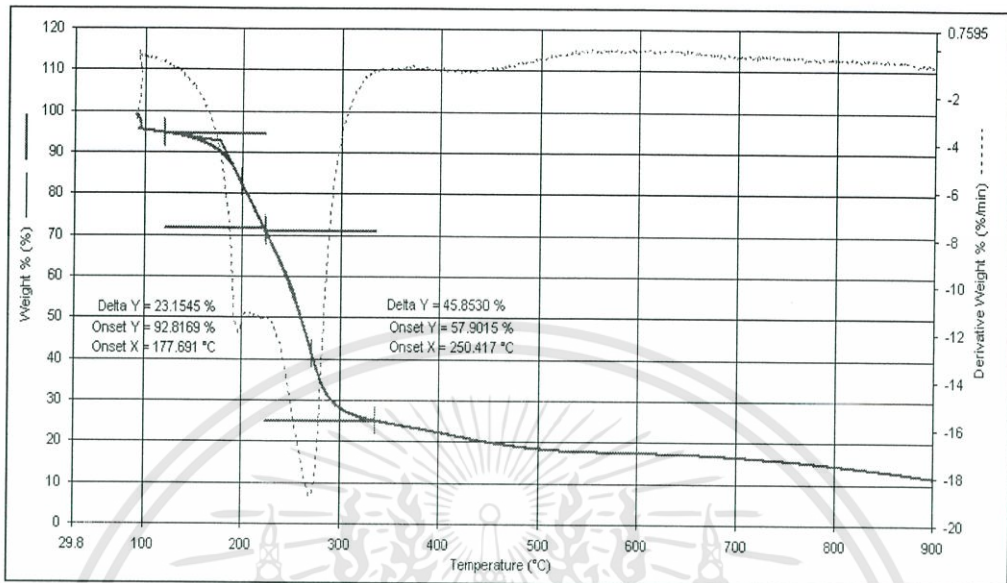


รูปที่ ง.11 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Ci}_{0.1}$

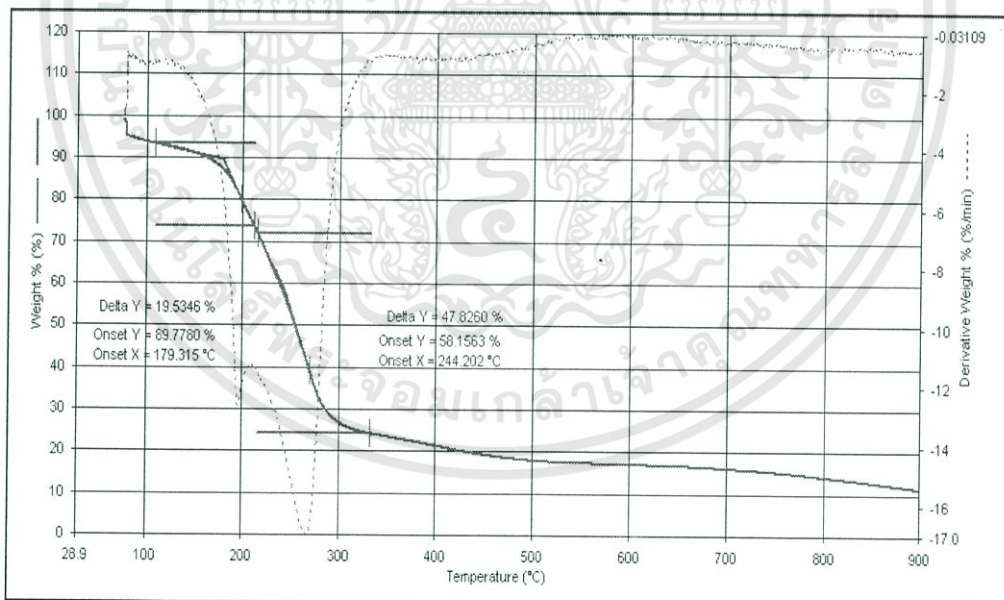


รูปที่ ง.12 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Ci}_{0.3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Ci}_{0.5}$



รูปที่ 14 แสดงสมบัติทางความร้อนสูตร $\text{StAgCa}_{0.1}\text{Ci}_{1.0}$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวกุลนันท์ จำปาทอง
 วัน เดือน ปีเกิด 12 มีนาคม 2538
 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 241 ถนนราษฎร์บำรุง ตำบลเนินพระ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง
 ประวัติการศึกษา
 พศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนระยองวิทยาคม เกรดเฉลี่ย 3.49
 พศ. 2559 ปริญญาตรี วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

ชื่อ นางสาวจันทร์จิรา พวงวา
 วัน เดือน ปีเกิด 5 ธันวาคม 2537
 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 207 หมู่ที่ 4 ตำบลร่มเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง
 ประวัติการศึกษา
 พศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีพัทลุง เกรดเฉลี่ย 3.67
 พศ. 2559 ปริญญาตรี วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.