



การเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซีไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลวสำหรับ  
ใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



ณัฐฐา กล้าณรงค์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร



การเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาไว้ภูภาคของเหลวสำหรับ  
ใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาอุณหภูมิของเหลว  
สำหรับใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ"

ของ ญัฐฐา กล้าณรงค์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

#### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล)

อนุมัติ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                  |                                                                                                                                     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | การเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาไว้ภูมิภาคของเหลวสำหรับใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ |
| ผู้วิจัย         | ณัฐฐา กล้านรงค์                                                                                                                     |
| ประธานที่ปรึกษา  | รองศาสตราจารย์ ดร. สมร หิรัญประดิษฐกุล                                                                                              |
| กรรมการที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์                                                                                        |
| ประเภทสารนิพนธ์  | วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2562                                                                     |
| คำสำคัญ          | แป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์, พลาสมาไว้ภูมิภาคของเหลว, ออกซิเดชัน                                                                       |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาไว้ภูมิภาคของเหลวเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยศึกษาเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชันด้วยพลาสมา 0 ถึง 300 นาที ความถี่ของพลาสมา 20 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนแปดต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยน้ำหนักเท่ากับ 1 ต่อ 0.05 จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชัน โดยทำการวิเคราะห์การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิล ปริมาณของอะไมโลส และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ผลการทดลองพบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันพบการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิล โดยที่ความถี่พลาสมาเดียวกันเมื่อเวลาในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มความถี่ของพลาสมาที่เวลาในการออกซิเดชันเดียวกันพบว่าปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลสามารถบ่งชี้ถึงระดับการออกซิเดชัน โดยกลุ่มไฮดรอกซิลจะถูกออกซิไดซ์ครั้งแรกเป็นกลุ่มคาร์บอนิลและจะถูกออกซิไดซ์อีกครั้งเป็นกลุ่มคาร์บอกซิล เพื่อยืนยันผลการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันที่ตำแหน่ง 1,737 ถึง 1,742 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะคู่ที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C=O) จึงสันนิษฐานพันธะคู่ดังกล่าวที่เป็นส่วนประกอบของกลุ่มคาร์บอนิลหรือกลุ่มคาร์บอกซิล การออกซิเดชันจะส่งผลให้เม็ดแป้งมันสำปะหลังถูกดีโพลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณที่มีส่วนประกอบของอะไมโลสเป็นหลัก โดยอะไมโลสจะเป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างบริเวณอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อทำการตรวจวัด

ปริมาณของอะไมโลสในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังพบว่าที่ความถี่ของพลาสมาเดียวกันเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาที่เวลาในการออกซิเดชันเดียวกันพบว่าปริมาณอะไมโลสมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน การออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวส่งผลให้เกิดการดีพอลิเมอร์เชชันอย่างรุนแรงบนแป้งมันสำปะหลัง จึงส่งผลกระทบต่อทั้งบริเวณผลึกและอสัณฐานของเม็ดแป้ง จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าทั้งบริเวณผลึก (Crystalline) และอสัณฐานของเม็ดแป้งลดลง เมื่อทำการทดสอบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่า การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันในระดับที่สูงขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับการยอมรับว่าเป็นสปีชีส์ที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

จากกระบวนการเตรียมแป้งสำปะหลังออกซิไดซ์ข้างต้น ได้ทำการเลือกแป้งมันสำปะหลังที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันที่ความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาในการออกซิเดชัน 60 180 และ 300 นาที และสุดท้ายทำการศึกษาเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันที่เวลา 300 นาที จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ในด้านความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ ความสามารถในการละลายของฟิล์ม ระดับการบวมน้ำ และคุณสมบัติทางกล คือความทนแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันโดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากโดยปกติไอน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณอสัณฐานแต่การดีพอลิเมอร์เชชันจะส่งผลให้บริเวณอสัณฐานลดลง นอกจากนี้การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในปริมาณมากส่งผลให้ความสามารถในการละลายและการบวมน้ำของฟิล์มแป้งลดลง แป้งจะมีความชอบน้ำน้อยลงเนื่องจากกลุ่มคาร์บอกซิลที่ก่อตัวขึ้นในแป้งออกซิไดซ์จะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับหมู่ไฮดรอกซิลและปรับปรุงปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่มีค่าความสามารถในการยืดหยุ่นที่ลดลง ดังนั้นสภาวะของพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ส่งผลต่อแป้งออกซิไดซ์และคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังในการศึกษานี้จึงน่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

|                       |                                                                                                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>          | PREPARATION OF OXIDIZED CASSAVA STARCH USING<br>SOLUTION PLASMA PROCESS FOR BIODEGRADABLE FILM<br>WRAP APPLICATION |
| <b>Author</b>         | NATTHA KLANARONG                                                                                                   |
| <b>Advisor</b>        | Associate Professor SAMORN HIRUNPRADITKOON, Ph.D.                                                                  |
| <b>Co-Advisor</b>     | Assistant Professor ISARAWUT PRASERTSUNG, D.Eng.                                                                   |
| <b>Academic Paper</b> | Thesis M.Eng. in Chemical Engineering - (Type A 2),<br>Naresuan University, 2019                                   |
| <b>Keywords</b>       | Oxidized cassava starch, Solution plasma process,<br>Oxidation                                                     |

### ABSTRACT

In this work, the solution plasma process (SPP) is used to treat cassava starch for preparing oxidized cassava starch as a biodegradable film wrap application. The plasma treatment was investigated at a range of time between 0-300 min, pulse frequency 20-30 kHz and the effect of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) adding to cassava starch suspension. The physical properties of native starch and oxidized cassava starch were studied in terms of carbonyl and carboxyl contents, amylose content and chemical structure by FT-IR technique. The experimental results showed that carbonyl and carboxyl groups were produced. The formation of carbonyl and carboxyl groups increased with increasing oxidation time at the same pulse frequency. Additionally, the results were also given higher formation of carbonyl and carboxyl groups with the increase in pulse frequency at the same time. The hydroxyl group was first oxidized prior to be the carbonyl group. Finally, the carbonyl group was then oxidized again to the carboxyl group. To confirm the formation of carbonyl and carboxyl groups, the chemical structure was analyzed by using FT-IR. The FT-IR spectra were found important peaks occurring on oxidized cassava starch at 1737-1742  $cm^{-1}$ , which may be identified as carbonyl and carboxyl groups forming. The oxidation occurred can be explained by depolymerization in the amorphous region in starch which consisted mainly of amylose. The results also showed that amylose



content decreased with increasing oxidation time at the same pulse frequency. Increasing the pulse frequency at the same oxidation time was given that the amylose content decreased. Oxidation by SPP resulted in strong polymerization on cassava starch, therefore both some the crystalline and amorphous regions were destroyed. X-Ray Diffractograms of oxidized cassava starch was obvious that the crystalline and amorphous regions were reduced. Therefore, this can be concluded that  $H_2O_2$  is indicated as an important species for advanced oxidation processes in higher levels of oxidation.

From the preparation of oxidized cassava starch, cassava starch at various conditions were taken to form cassava starch film by using glycerol as a plasticizer. Native cassava starch and oxidized cassava starch-containing  $H_2O_2$  films at oxidation time of 60, 180 and 300 min and a pulse frequency of 30 kHz were carried out and compared. Finally, the comparison with the oxidized cassava starch without  $H_2O_2$  at oxidation time 300 min and pulse frequency 30 kHz was compared. Water vapor permeability, solubility, swelling properties and mechanical properties i.e. tensile strength and elongation at break were finally investigated. The results showed that the water vapor permeability of oxidized cassava starch-containing  $H_2O_2$  film was decreased. Normally, the vapors are moved throughout the amorphous regions while the polymerization will decrease the amorphous regions. In addition, the solubility and swelling power in oxidized cassava starch films decrease due to the carboxyl groups formed in the oxidized cassava starch can be produced strong bonds with the hydroxyl group and improved the interaction between molecules within starch resulting in hydrophobicity. Moreover, the mechanical properties of the oxidized cassava starch films increased with tensile strength and decreased with the elongation at break. Therefore, this can be summarized that the SPP in this work affects the oxidized cassava starch and the properties of starch film should be able to apply for the biodegradable film wrap application.



## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา ความรู้ แนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ เทคนิคการนำเสนอโครงงานปากเปล่าตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนเพื่อให้การเขียนโครงงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล และ ผศ.ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนผู้ดูแลห้องปฏิบัติการที่คอยให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเข้าใช้สถานที่และเครื่องมือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาตลอดการดำเนินงานวิทยานิพนธ์จนสำเร็จการศึกษา

ณัฐฐา กล้าณรงค์

## สารบัญ

|                                             | หน้า |
|---------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....ค                       |      |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ                    |      |
| ประกาศคุุณูปการ.....ช                       |      |
| สารบัญ.....ซ                                |      |
| สารบัญตาราง.....ฅ                           |      |
| สารบัญรูป.....ฉ                             |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....1                          |      |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....1      |      |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....3           |      |
| 1.3 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....3         |      |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....4               |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5 |      |
| 2.1 แป้ง (Starch).....5                     |      |
| 2.1.1 องค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง.....6         |      |
| 2.1.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....10           |      |
| 2.1.3 คุณสมบัติของแป้ง.....11               |      |
| 2.1.4 แป้งเปียก (Starch paste).....15       |      |
| 2.1.5 พิล์มแป้ง (Starch film).....17        |      |
| 2.2 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch).....18 |      |

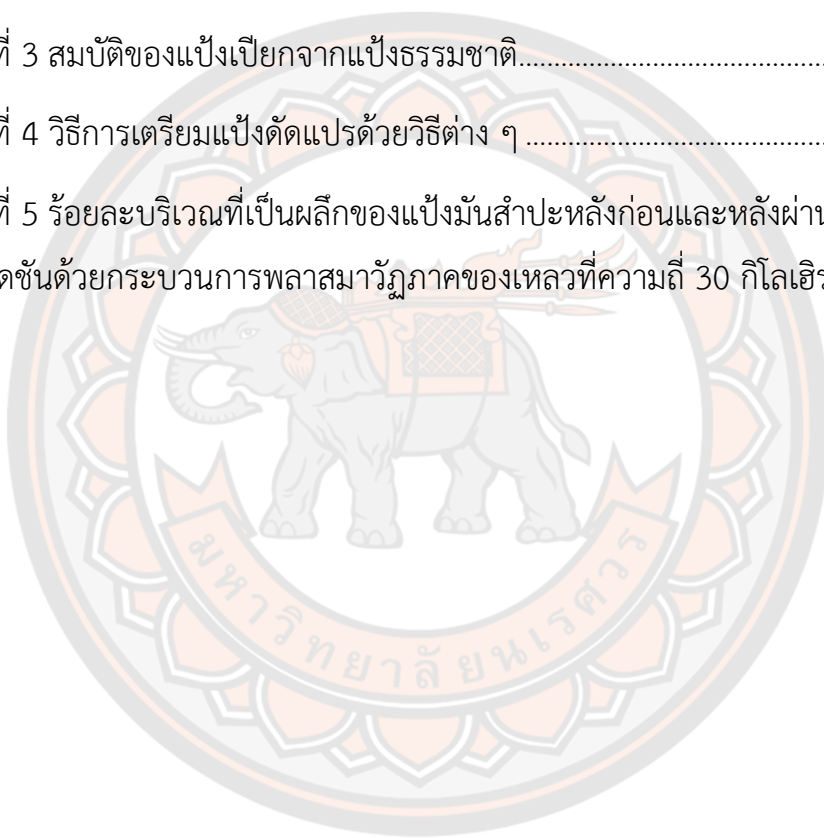
|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch).....                                                                                        | 19 |
| 2.4 แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) .....                                                                                    | 21 |
| 2.5 กระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว .....                                                                                       | 22 |
| 2.5.1 พลาสมา (Plasma) .....                                                                                                  | 22 |
| 2.5.2 พลาสมาวิญญาคของเหลว (Liquid phase plasma) .....                                                                        | 22 |
| 2.5.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิญญาคของเหลว.....                                                                                  | 23 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                                                               | 24 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย .....                                                                                    | 29 |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....                                                                                                   | 29 |
| 3.2 วิธีการทดลอง.....                                                                                                        | 31 |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....                                                                                           | 32 |
| 3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิญญาคของเหลว.....                                                                                 | 32 |
| 3.3.2 การออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว .....                                                     | 32 |
| 3.3.3 ปริมาณการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิญญาคของเหลว .....                    | 32 |
| 3.3.4 การวิเคราะห์ระดับการออกซิเดชันของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว .....             | 33 |
| 3.3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม .....                                                                                                  | 35 |
| 3.3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม.....                                                                                     | 36 |
| บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....                                                                                       | 38 |
| 4.1 ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว ..... | 38 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการ<br>พลาสมาวิทยุภาคของเหลว ..... | 44 |
| 4.3 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared<br>Spectroscopy (FT-IR).....   | 49 |
| 4.4 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง .....                                                   | 50 |
| 4.5 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง.....                                     | 53 |
| 4.6 ความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง .....                                              | 55 |
| 4.7 ระดับการบวมตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง.....                                                     | 57 |
| 4.8 สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง.....                                                        | 59 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....                                                                       | 64 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                                                                            | 64 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                                                                                | 66 |
| ภาคผนวก.....                                                                                       | 67 |
| บรรณานุกรม .....                                                                                   | 69 |
| ประวัติผู้วิจัย .....                                                                              | 73 |

## สารบัญตาราง

หน้า

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 1 สัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินและค่าเฉลี่ยของระดับการเกิด<br>พอลิเมอร์ของกลูโคสของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งชนิดต่าง ๆ .....   | 9  |
| ตารางที่ 2 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด .....                                                                                             | 11 |
| ตารางที่ 3 สมบัติของแป้งเปียกจากแป้งธรรมชาติ.....                                                                                                   | 17 |
| ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ .....                                                                                              | 19 |
| ตารางที่ 5 ร้อยละบริเวณที่เป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการ<br>ออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์..... | 48 |



## สารบัญรูป

|                                                                                                                                             | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 1 โครงสร้างของแป้ง .....                                                                                                             | 5    |
| รูปที่ 2 โครงสร้างของอะไมโลส .....                                                                                                          | 6    |
| รูปที่ 3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส .....                                                                                                       | 7    |
| รูปที่ 4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน .....                                                                                                     | 7    |
| รูปที่ 5 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคติน .....                                                                                | 8    |
| รูปที่ 6 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)..                                                            | 10   |
| รูปที่ 7 ระยะในการเกิดการเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง .....                                                                                     | 13   |
| รูปที่ 8 การเกิดรีโทรกราเดชันและการคืนตัวของแป้ง .....                                                                                      | 15   |
| รูปที่ 9 ส่วนรากของต้นมันสำปะหลัง .....                                                                                                     | 18   |
| รูปที่ 10 ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวิญญากาศของเหลว .....                                                                                  | 23   |
| รูปที่ 11 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวิญญากาศของเหลว .....                                                                               | 24   |
| รูปที่ 12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....                                                                                                    | 31   |
| รูปที่ 13 ปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันใหม่ที่ก่อตัวในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว .....         | 42   |
| รูปที่ 14 ปริมาณการก่อตัวของหมู่อนุมูลไฮดรอกซิลระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิญญากาศของเหลว .....                                    | 43   |
| รูปที่ 15 กลไกการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว ..... | 44   |
| รูปที่ 16 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิญญากาศของเหลว .....                                        | 47   |

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 17 X-ray diffractograms ของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันด้วย<br>กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....                                                                                                | 48 |
| รูปที่ 18 FT-IR Absorption band ของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วย<br>กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสร้างด้วยเทคนิค FT-IR.....                                                                              | 50 |
| รูปที่ 19 พื้นผิวของฟิล์มที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล .....                                                                                                                                                                 | 52 |
| รูปที่ 20 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการ<br>พลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่สภาวะต่าง ๆ.....                                                                                             | 52 |
| รูปที่ 21 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลัง<br>ออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30<br>กิโลเฮิร์ตซ์และเปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ..... | 55 |
| รูปที่ 22 ร้อยละความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลัง<br>ออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30<br>กิโลเฮิร์ตซ์และเปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ .....     | 57 |
| รูปที่ 23 ระดับการบวมน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วย<br>กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์และ<br>เปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ .....                | 59 |
| รูปที่ 24 สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วย<br>กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....                                                                                                            | 63 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันมลพิษทางสิ่งแวดล้อมเป็นหนึ่งในปัญหาหลักของโลก เนื่องจากการใช้งานวัสดุสังเคราะห์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์อยู่ทุกวัน ขยะจากวัสดุเหล่านี้อาจใช้เวลาหลายศตวรรษในการย่อยสลาย พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมถือเป็นวัสดุที่พบมากที่สุดที่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นวัสดุหลักที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์สินค้าต่าง ๆ รวมไปถึงบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งพลาสติกเหล่านี้มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หลักสำหรับสินค้าและอาหาร แต่ในปัจจุบันนักวิจัยมีความสนใจที่จะหาวัสดุที่สามารถทดแทนผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทางปิโตรเลียมโดยใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) คือไบโอพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) วัสดุเหล่านี้จะได้รับการดัดแปรคุณสมบัติบางประการและนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งจะสามารถช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมจากวัสดุห่อหุ้มอาหารที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม (1-3)

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch หรือ *Manihot esculenta*) เป็นพืชหมุนเวียนที่ปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศไทยรวมทั้งมีราคาถูก และพบว่าในปีพุทธศักราช 2560 ถึง 2561 ผลผลิตรวมของมันสำปะหลังในประเทศไทยเฉลี่ยมีมากถึง 28.565 ล้านตัน (4) แป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีระดับสิ่งเจือปนต่ำ (ไขมัน โปรตีน และเถ้า) คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง อาทิ คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical properties) คุณสมบัติด้านความหนืด (Pasting properties) และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) มีประโยชน์ต่อการใช้งานในด้านอุตสาหกรรม (5, 6) อย่างไรก็ตามแป้งมันสำปะหลังมีข้อด้อยซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้งานเมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร อาทิ ความชอบน้ำตามธรรมชาติของแป้งส่งผลให้มีความไวต่อความชื้นสูงด้วยคุณสมบัติทางกลต่ำและมีความแตกร่วน (7) จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรคุณสมบัติบางประการของแป้งเพื่อให้ได้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติการใช้งานเหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์อาหาร

แป้งดัดแปร (Modified starch) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาทดแทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับห่อหุ้มอาหารที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเลียม กระบวนการดัดแปรแป้งสามารถทำได้หลากหลายวิธี อาทิ การใช้สารเคมีชนิดกรด การออกซิเดชันโดยใช้สารเคมี กระบวนการพลาสมาในสถานะแก๊ส กระบวนการทางความร้อนโดยใช้ความร้อนชื้น หรือการใช้หลาย ๆ วิธีร่วมกัน

เช่น การใช้กรดร่วมกับการออกซิเดชัน (3, 8-12) การเตรียมแป้งดัดแปรโดยใช้กรด อาทิ การใช้กรดแลกติก รวมไปถึงกระบวนการออกซิเดชันโดยใช้สารเคมีซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ เป็นสารออกซิไดซ์ เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ แต่ข้อด้อยของกระบวนการนี้จะก่อให้เกิดของเสียและการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งการปนเปื้อนของสารเคมีในบรรจุภัณฑ์อาหารอาจไม่เหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง ในกรณีการใช้กระบวนการทางความร้อนจำเป็นต้องควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเนื่องจากอุณหภูมิในการเจลาติไนเซชันของแป้งอยู่ที่ 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส ดังนั้นระยะเวลาในกระบวนการที่มีความร้อนเกิดขึ้นจึงสั้นและอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแป้งดัดแปรต่ำกว่ากระบวนการอื่น สำหรับกระบวนการพลาสมาในสถานะแก๊สมีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งบางกระบวนการจำเป็นต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) เป็นกระบวนการดัดแปรแป้งโดยการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ของกลูโคสในแป้งให้สั้นลงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้เกิดการดัดแปรทางเคมีของแป้งขึ้นสองชนิด คือ ดีพอลิเมอร์เซชัน (Depolymerization) และการเติมหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล (Carbonyl and carboxyl) บนสายอะไมโลส โดยการออกซิเดชันแป้งช่วยปรับปรุงข้อด้อยบางประการของแป้งเพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร อาทิ ลดการเกิดรีโทรกราเดชันและการเกิดเจลของสารละลายแป้ง ลดความหนืดซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความหนาและความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์อาหาร ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีรสชาติและกลิ่นที่ดีขึ้น รวมถึงลดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย (13)

กระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวเป็นกระบวนการใหม่ที่ถูกค้นพบโดย Takai (14) นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ การบำบัดน้ำเสีย การฆ่าเชื้อ และการย่อยสลายสารอแกนิค กระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตหมู่ว่องไวที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี อาทิ อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical:  $\text{OH}^\bullet$ ) ซึ่งหมู่ว่องไวดังกล่าวสามารถชักนำให้เกิดการออกซิเดชัน (15) ส่งผลให้เกิดกลุ่มฟังก์ชันใหม่ (กลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิล) ในโครงสร้างของเม็ดแป้งส่งผลให้คุณลักษณะของแป้งออกซิไดซ์เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นแล้วกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการดำเนินการจึงไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีในระบบแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันพบว่ามีคุณสมบัติบางประการที่ถูกปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานด้านฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่ง Wurzburg และคณะ (16) พบว่าการออกซิเดชันแป้งจะช่วยลดความหนืด สร้างเสถียรภาพ เพิ่มความใส ปรับปรุงคุณสมบัติการยึดเกาะ ฟิล์มมีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน และมีแนวโน้มที่จะหดและแตกหักน้อยลง นอกจากนี้ Zanudio-Flores และคณะ รวมทั้ง Thunwall และคณะ (17, 18) ยังพบว่าแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันจะส่งผลให้เกิดฟิล์มที่แข็ง และแข็งแรงมี

คุณสมบัติที่น่าสนใจที่จะนำไปใช้งานในการเก็บรักษาอาหาร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวัลกาศของเหลวในการดัดแปรคุณลักษณะบางประการของแป้งมันสำปะหลังโดยการออกซิเดชัน โดยตัวแปรที่สนใจประกอบไปด้วย เวลาในการออกซิเดชันพลาสมา ความถี่ของพลาสมา และผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาจะถูกนำไปวิเคราะห์ระดับการออกซิเดชันจากกลุ่มฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้น และเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ คุณลักษณะ และความเหมาะสมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัลกาศของเหลว เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยตรวจวัดคุณสมบัติของฟิล์มแป้งดัดแปร อาทิ คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ประกอบด้วย ความทนแรงดึง (Tensile strength) และความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (Elongation at break) ความสามารถในการละลายในน้ำของฟิล์ม (Water solubility) ความสามารถในการบวมตัวของฟิล์ม (Degree of swelling) และคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของฟิล์ม (Barrier properties) อันประกอบด้วย ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมแป้งออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวัลกาศของเหลวและผลของสภาวะพลาสมาที่มีต่อแป้งออกซิไดซ์

1.2.2 ศึกษาสภาวะการออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวัลกาศของเหลวที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกซิไดซ์เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.2.3 ศึกษาคุณลักษณะ คุณสมบัติ และความเหมาะสมของแป้งออกซิไดซ์ในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ห่อหุ้มอาหาร

## 1.3 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดพลาสมาวัลกาศของเหลว

1.3.2 เตรียมสารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังและนำไปผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัลกาศของเหลว โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

1.3.2.1 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายด้วยพลาสมา 0 ถึง 300 นาที

1.3.2.2 ความถี่ของพลาสมา 20 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์

1.3.2.3 ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide:  $H_2O_2$ )

1.3.3 วิเคราะห์คุณลักษณะของแป้งออกซิไดซ์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว

1.3.3.1 ปริมาณการก่อตัวของหมู่อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิญญาคของเหลว

1.3.3.2 ระดับการออกซิเดชันโดยวิเคราะห์จากกลุ่มฟังก์ชันที่เกิดขึ้น (คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล)

1.3.3.3 ปริมาณอะไมโลส (Amylose content)

1.3.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

1.3.3.5 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

1.3.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังดัดแปรดังนี้

1.3.4.1 คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties)

1.3.4.1.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

1.3.4.1.2 ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (Elongation at break)

1.3.5.2 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

1.3.5.3 ระดับการบวมตัวของฟิล์ม (Degree of swelling)

1.3.5.4. ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability)

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้วิธีการพลาสมาวิญญาคของเหลวซึ่งเป็นวิธีการใหม่ในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ทดแทนวิธีอื่นที่มีการใช้สารเคมีและความร้อน

1.4.2 ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวสามารถใช้ทดแทนวัสดุพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมและช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

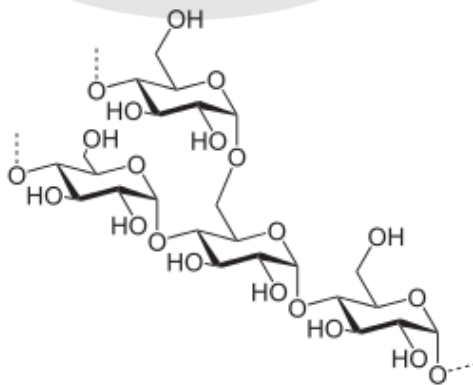
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ที่มีสูตรทางเคมีคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งอาจถือได้ว่าเป็นสายยาวของกลูโคสที่อยู่กันอย่างหนาแน่น โดยที่ในสายยาวของกลูโคสจะประกอบได้ด้วยหน่วยย่อยของกลูโคส และกลูโคสแต่ละหน่วยจะเชื่อมต่อกันผ่านออกซิเจนที่บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 หรือเรียกกันว่าพันธะไกลโคไซด์ (Glycoside bond) พันธะไกลโคไซด์นี้จะมีความเสถียรภายใต้สภาพที่เป็นต่าง และสามารถถูกย่อยได้ด้วยกรด ทางด้านตอนปลายของสายโซ่กลูโคสจะมีหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde group) และเรียกหมู่ตอนปลายนี้ว่าปลายหมู่รีดิวซ์ (Reducing end group) โดยแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งเรียงตัวในแนวรัศมีเดียวกัน แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (13, 19)

แป้งส่วนใหญ่จะมีทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ที่มาจากแหล่งของพืช (Plant source) ที่ต่างกันจะมีสัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่ต่างกันด้วย และในแต่ละสายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีระดับของการเกิดพอลิเมอร์ของกลูโคส (Degree of polymerization; DP) ต่างกัน (ตารางที่ 1) ดังนั้นสมบัติในการทำหน้าที่ต่าง ๆ (Function properties) ของแป้งจึงต่างกันไปในพืชแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบและโครงสร้างขององค์ประกอบดังกล่าว (19)



รูปที่ 1 โครงสร้างของแป้ง

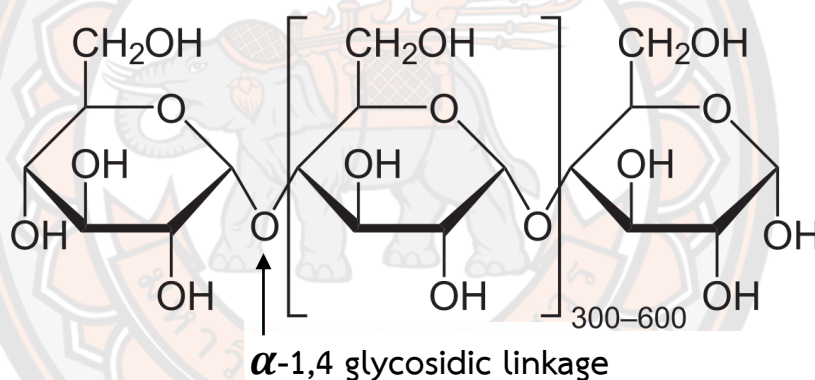
ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starch>



## 2.1.1 องค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง

### 2.1.1.1 อะไมโลส

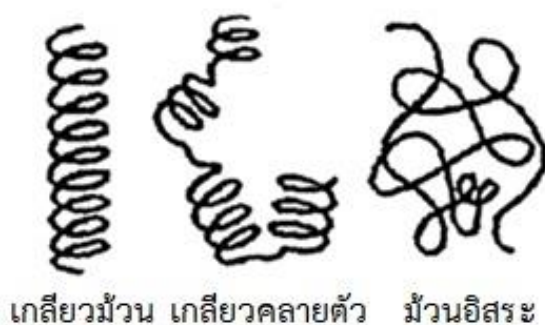
อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสประมาณถึง 6,000 หน่วย (13) แต่ละหน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage (รูปที่ 2) อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (20) น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันออกไป และมีค่าระดับชั้นของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันไป สำหรับตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยอะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous regions) และส่วนผลึก (Crystalline regions) อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินอยู่ใจกลางของเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบของเม็ดแป้ง (21)



รูปที่ 2 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Amylose>

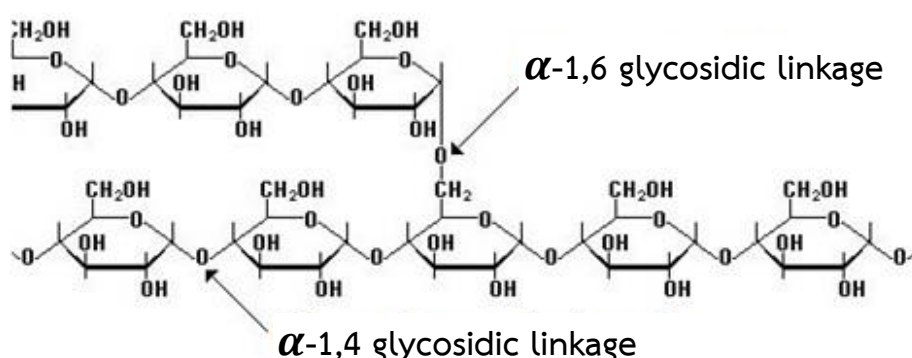
อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน ฟีนอล สารลดแรงตึงผิวหลายชนิด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ เนื่องจากอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารละลายอินทรีย์เหล่านี้ แต่เมื่ออยู่ในสารละลายโครงสร้างของอะไมโลสจะมีหลายรูปแบบ คือ มีลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random coil) ดังแสดงในรูปที่ 3 การที่อะไมโลสจะอยู่ในรูปแบบเหล่านี้ได้จะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิ และขนาดโมเลกุลของอะไมโลส (22)



รูปที่ 3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส (22)

#### 2.1.1.2 อะไมโลเพคติน

โดยทั่วไปแล้วแป้งจะประกอบด้วยอะไมโลเพคตินประมาณร้อยละ 70 ถึง 100 โดยอะไมโลเพคตินเป็นโครงสร้างกิ่งแขนง (Branch chain) ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสที่มีระดับของการเกิดพอลิเมอร์อยู่ที่ 10 ถึง 60 หน่วยกลูโคส ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายโซ่สั้นที่มีระดับของการเกิดพอลิเมอร์อยู่ที่ประมาณ 22 หน่วยกลูโคส ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 glycosidic linkage (รูปที่ 4) โดยมีหน่วยย่อยกลูโคสที่เป็นพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 อยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณกลูโคสทั้งหมด ในอะไมโลเพคติน ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน (13, 19, 21)

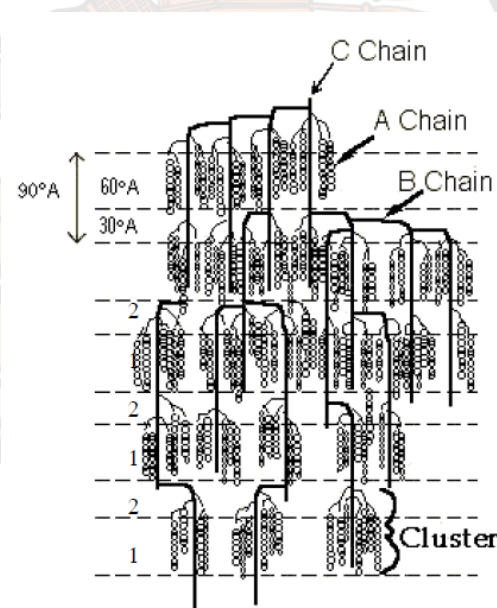


รูปที่ 4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

ที่มา: <https://www.smartkitchen.com/resources/amylopectin>



ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เป็นสายโซ่ที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นอีก 2 สาย หรือมากกว่า และสาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ 1 หมู่ ที่เป็นอิสระและถูกแทนที่เพียงจุด C-6 (Primary hydroxyl group) (รูปที่ 5) ซึ่งในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วย สาย C หนึ่งสายเท่านั้น เนื่องจากการเชื่อมต่อ A-chain, B-chain และ C-chain ภายในโมเลกุลอะไมโลเพคตินด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 glycosidic linkage ซึ่งมีสาย C-chain เพียงหนึ่งสายโซ่ต่อโมเลกุล ดังนั้นอัตราส่วนของ A-chain และ B-chain จึงมีความสำคัญเนื่องจากการแสดงถึง Degree of multiple branching ของโมเลกุล ซึ่งอะไมโลเพคตินหนึ่งโมเลกุลจะมีอัตราส่วนของ A-chain ต่อ B-chain ประมาณ 1.5 ถึง 2.6 ต่อ 1 (19)



รูปที่ 5 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคติน (22)

สัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินและค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดพอลิเมอร์ของกลูโคสของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1 สัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินและค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดพอลิเมอร์ของกลูโคสของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งชนิดต่าง ๆ (13)**

| แป้ง              | อะไมโลส | อะไมโลเพคติน | ค่า DP เฉลี่ย<br>ของอะไมโลส | ค่า DP เฉลี่ย<br>ของอะไมโลเพคติน |
|-------------------|---------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|
| แป้งมันฝรั่ง      | 25      | 75           | 3,000                       | 2,000,000                        |
| แป้งข้าวโพด       | 25      | 75           | 800                         | 2,000,000                        |
| แป้งสาลี          | 20      | 80           | 800                         | 2,000,000                        |
| แป้งมันสำปะหลัง   | 19      | 81           | 3,000                       | 2,000,000                        |
| แป้งข้าวเจ้า      | 19      | 81           |                             |                                  |
| แป้งข้าวโพดเหนียว | <1      | >99          | -                           | 2,000,000                        |

#### 2.1.1.3 ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง (23)

2.1.1.3.1 ความชื้น (Moisture) ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity; RH) ของอากาศขณะเก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงแป้งจะมีความชื้นสูง ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของแป้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง

2.1.1.3.2 ไขมัน (Lipid) องค์ประกอบของไขมันในแป้งมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 ซึ่งชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความหนืดของแป้ง โดยจะไปลดระดับการบวม น้ำ การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง

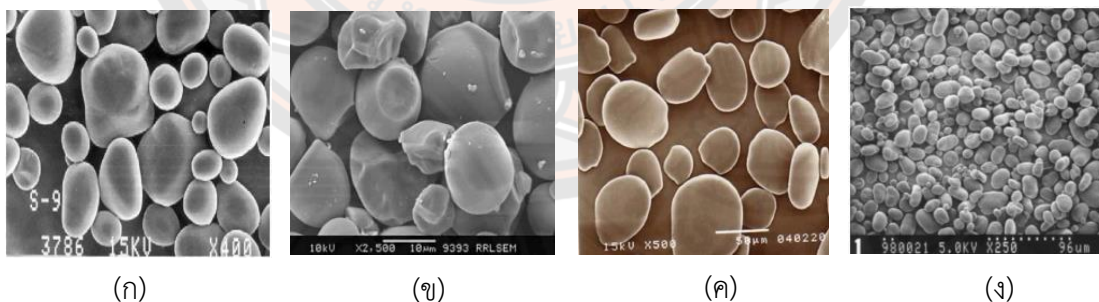
2.1.1.3.3 โปรตีน (Protein) องค์ประกอบของโปรตีนมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยแป้งจากหัวและราก เช่น แป้งมันฝรั่งและมันสำปะหลังจะมีโปรตีนปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด ซึ่งโปรตีนจะเกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อการลักษณะของแป้งคือทำให้เกิดประจุพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการบวม น้ำ และอัตราการเกิดเจลลิตีไนซ์เปลี่ยนแปลงไป

2.1.1.3.4 เถ้า (Ash) แป้งโดยทั่ว ๆ ไปจะมีองค์ประกอบอนินทรีย์ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งสารอนินทรีย์ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์ปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ แป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตในรูปของเกลือที่มีอยู่ในมันฝรั่งเองหรือได้จากการกระบวนการล้างน้ำ เถ้าของแป้งมันฝรั่งส่วนใหญ่มาจากหมู่ฟอสเฟต เถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืชมาจากฟอสฟอริปิด

2.1.1.3.5 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ภายในเม็ดแป้งอาจจะพบฟอสฟอรัสอยู่ในรูปแบบของฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส และในรูปของฟอสโฟลิปิด (Phospholipid)

## 2.1.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง (22)

แป้งที่พบในธรรมชาติมักจะพบอยู่ในรูปแบบของเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ภายในเม็ดแป้งประกอบไปด้วยการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และมีส่วนที่จัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ในบริเวณอะไมโลเพคตินที่เป็นสายโซ่สั้น ซึ่งเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกบางส่วน ในส่วนบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้งประกอบไปด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่เป็นสายโซ่ยาว และพบว่ามีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่นสูงจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แป้งที่ได้จากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้าเรียงตัวกันแบบหลวม ๆ จะเกิดผลึกแบบ B (แป้งที่ได้จากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และแบบ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งที่ได้จากพืชตระกูลถั่ว) โดยขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งดังแสดงในรูปที่ 6 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของเม็ดแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) (22)

(ก) แป้งมันฝรั่ง (ข) แป้งมันสำปะหลัง (ค) แป้งพุทธรักษา (ง) แป้งถั่วเขียว

ตารางที่ 2 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด (19)

| ชนิดแป้ง       | ความเป็นผลึก (%) |
|----------------|------------------|
| โครงสร้าง A    |                  |
| ข้าวโอ๊ต       | 33               |
| ข้าวไรน์       | 34               |
| ข้าวสาลี       | 36               |
| ข้าวเหนียว     | 37               |
| ข้าวฟ่าง       | 37               |
| ข้าวเจ้า       | 38               |
| ข้าวโพด        | 40               |
| ข้าวโพดเหนียว  | 40               |
| เผือกแช่เย็น   | 45               |
| โครงสร้าง B    |                  |
| ข้าวโพดอะไมโลส | 15-22            |
| สาหร่าย        | 26               |
| มันฝรั่ง       | 28               |
| โครงสร้าง C    |                  |
| มันเทศ         | 38               |
| มันสำปะหลัง    | 38               |

### 2.1.3 คุณสมบัติของแป้ง (19)

#### 2.1.3.1 การดูดซับ การบวม น้ำ และการละลาย

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้ง เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้เคียงกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้ง จะส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โดยโมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่อย่างอิสระ เม็ดแป้งจึงเกิดการบวม น้ำ ทำให้ความสามารถในการละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการบวม น้ำ และความสามารถในการละลายคือ

2.1.3.1.1 ชนิดของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบในการบวม น้ำ และการละลายแตกต่างกันคือ แป้งจากธัญพืชมีแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะ

บริเวณผลึกและบริเวณออสณฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะไฮโดรเจนสูงที่สุดจึงมีระดับการบวมน้ำและการละลายต่ำสุดเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง ปริมาณของอะไมโลสทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้นส่งผลให้การบวมน้ำต่ำ ส่วนแป้งจากบริเวณรากหรือส่วนกลางลำต้น อาทิ แป้งมันสำปะหลังมักจะมีกำลังการบวมน้ำและการละลายสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากจำนวนพันธะน้อยกว่าแป้งจากส่วนรากและเกิดการเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช และแป้งจากส่วนหัว อาทิ แป้งมันฝรั่ง จะมีการบวมน้ำสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมันฝรั่งยังส่งผลให้การบวมน้ำสูงขึ้น เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าได้

2.1.3.1.2 สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต สิ่งเจือปนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการบวมน้ำของเม็ดแป้ง เช่น แป้งข้าวโพดที่ถูกสกัดไขมันออกจะมีการบวมน้ำอย่างเป็นอิสระ และดีกว่าแป้งข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันในธรรมชาติของแป้งข้าวโพดจะยับยั้งการบวมน้ำของเม็ดแป้ง โดยจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส นอกจากนี้การเติมสารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผลต่อกำลังการบวมน้ำของเม็ดแป้ง

2.1.3.1.3 คุณสมบัติหลังการดัดแปรทางเคมี คุณสมบัติการบวมน้ำและการละลายของแป้งจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการดัดแปรทางเคมี การดัดแปรแป้งด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดแป้งกระจายออกเป็นชิ้นเล็ก การละลายและการบวมน้ำจึงสูงขึ้น สำหรับการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) หรืออีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) ส่งผลให้เกิดการแทนที่ของหมู่ฮันภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิเจลาติไนซ์ต่ำลง การบวมน้ำเพิ่มขึ้น และขอบเขตในการลดลงของอุณหภูมิเจลาติไนซ์และการบวมน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่กับจำนวนและธรรมชาติของหมู่ที่มาแทนที่ในกระบวนการครอสลิงค์ (Cross-linking) จะส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการบวมน้ำและการละลายจึงลดลง

### 2.1.3.2 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) (12)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ (Micelles) ซึ่งจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ส่งผลให้เม็ดแป้งละลายได้ยากในน้ำเย็น ดังนั้นเมื่อแป้งอยู่ในน้ำเย็นจะสามารถดูดซับน้ำและบวมน้ำได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจะส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนจะอ่อนแอลงทำให้เม็ดแป้งดูดน้ำแล้วเกิดการบวมน้ำ ส่วนผสมของน้ำกับแป้งจะมีความหนืดและมีความใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลอิสระของน้ำที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งน้อยลง ส่งผลให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดการ



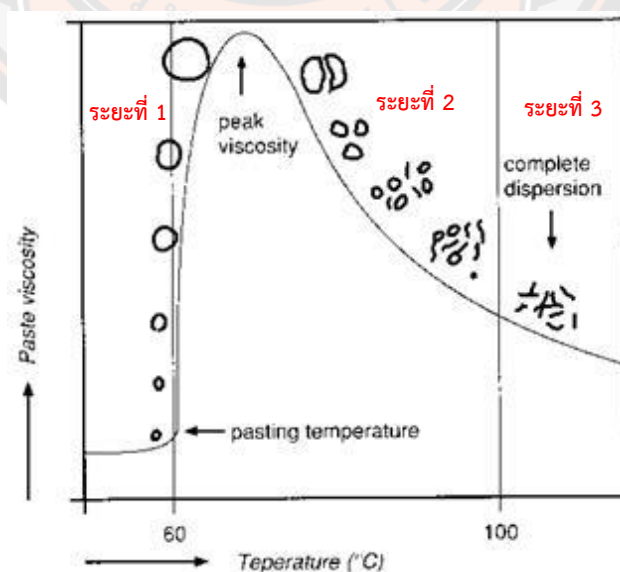
เจลาติไนเซชัน เมื่อใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิที่ทำให้เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่ทำให้เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งในเม็ดแป้งที่ต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกันไป

การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ (รูปที่ 7)

1) ระยะที่ 1 เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการบวมน้ำแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งจะยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ Birefringence ได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง)

2) ระยะที่ 2 เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะนี้เม็ดแป้งจะบวมน้ำอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ส่งผลให้เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาในเม็ดแป้งได้มากขึ้นและเกิดการบวมน้ำจนกระทั่งผันกลับไม่ได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน ในระยะนี้เม็ดแป้งจะมีการเปลี่ยนรูปร่าง Birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

3) ระยะที่ 3 เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อย ๆ รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของเม็ดแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ต่าง ๆ ได้ดีกว่า



รูปที่ 7 ระยะในการเกิดการเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา: [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2\\_intro.htm](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chap2_intro.htm)



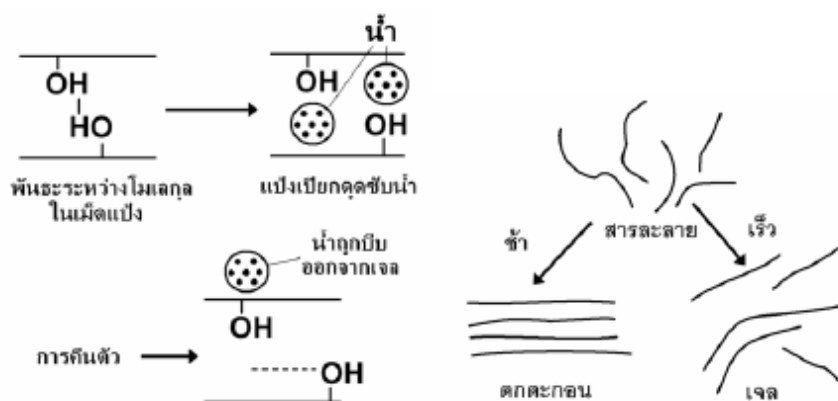
#### 2.1.3.4 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) (12)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลาติไนเซชัน แล้วยังมีการให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ จะทำให้เม็ดแป้งบวมน้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่บวมน้ำเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงกันตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดเพิ่มขึ้นเกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือลึกรูปปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นยิ่งขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่อย่างอิสระภายนอกจะถูกบีบออกมาจนเกิดเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งสุกและสารละลายแป้งส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดส่วนที่ไม่ละลายน้ำในแป้งสุกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลายทำให้กลายเป็นเจล และเมื่อน้ำถูกบีบออกมาจนเกิดเจลในระหว่างการคืนตัวของแป้ง กระบวนการนี้หากเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดการตกตะกอนเกิดขึ้น แต่ถ้าหากเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เจลมีลักษณะขุ่น (รูป 8)

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อนของสารละลายแป้ง กระบวนการให้ความเย็นกับสารละลายแป้ง อุณหภูมิ ระยะเวลา ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลสกับอะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดีในช่วงพีเอช 5 ถึง 7 ซึ่งเป็นช่วงที่แป้งคืนตัวได้เร็วมากที่สุด สำหรับช่วงพีเอชสูงกว่าหรือต่ำกว่านี้แป้งจะสามารถคืนตัวได้ช้าลง

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีผลต่อการคืนตัวของแป้ง หากว่าแป้งมีปริมาณของอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากกว่าและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงที่สุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ DP ของอะไมโลสมีค่าประมาณ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสสายยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมามีผลได้อีกครั้งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 การเกิดรีโทรกราเดชันและการคืนตัวของแป้ง (19)

#### 2.1.4 แป้งเปียก (Starch paste) (13)

สมบัติของแป้งเปียกขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง วิธีการตัดแปรง วิธีการต้มแป้ง รวมไปถึงวัสดุหรือองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในส่วนผสมของน้ำแป้งนั้น ๆ ดังนั้นการควบคุมวิธีการต้มแป้งสูงหรือตัดแปรงที่เหมาะสมจะสามารถทำให้แป้งเปียกมีสมบัติตามที่ต้องการ และได้สมบัติที่คงที่ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อคุณภาพของการต้มแป้งและสมบัติของแป้งได้แก่ อุปกรณ์ในการต้มแป้ง ความเข้มข้นของแป้งต่อน้ำ อุณหภูมิในการต้ม เวลาในการต้ม ความแรงของการกวนแป้งในขณะต้มแป้ง และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้ง

แป้งเปียกนั้นอาจประกอบไปด้วยเม็ดแป้งที่ไม่เกิดการบวม น้ำ เม็ดแป้งที่มีการบวมน้ำเพียงบางส่วน เม็ดแป้งที่มีการบวมน้ำอย่างสมบูรณ์ ขึ้นส่วนของเม็ดแป้งที่เกิดการบวมน้ำแล้ว กลุ่มก้อนของโมเลกุลแป้งที่ละลายแล้ว และตะกอนของแป้งที่เย็นตัว (Retrograded starch) สมบัติของแป้งเปียกที่สำคัญที่ทำให้สามารถนำน้ำแป้งไปใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิ สมบัติด้านความหนืด ลักษณะเนื้อสัมผัสของน้ำแป้ง และความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear) ของน้ำแป้ง นอกจากนี้สมบัติของแป้งเปียกจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งดังแสดงในตารางที่ 3

##### 2.1.4.1 ความหนืดแป้งเปียก (Paste viscosity)

น้ำแป้งเปียกจะมีความหนืดที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง วิธีการต้มแป้ง และความเข้มข้นของแป้ง ซึ่งค่าความหนืดสูงสุดของแป้งเปียกนั้นจะสามารถดูได้จาก Brabender curve ของแป้งเปียก ณ จุดสูงสุดของเส้นกราฟที่เรียกว่าความหนืดที่จุดยอด (Peak viscosity) ดังแสดงในรูปที่ 7

#### 2.1.4.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งเปียก

โดยทั่วไปแล้วแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพดนั้นจะประกอบไปด้วยเม็ดแป้งที่ไม่บวมน้ำมากนัก ซึ่งตรงข้ามกับแป้งเปียกของแป้งมันฝรั่งที่เม็ดแป้งที่อยู่ในน้ำแป้งนั้นจะมีลักษณะการบวมน้ำสูงมาก เม็ดแป้งที่บวมน้ำในแป้งมันฝรั่งจะมีพันธะจะมีพันธะอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลแป้งภายในเม็ดแป้ง และเมื่อให้แรงเฉือนกับแป้งเปียกจะทำให้เนื้อสัมผัสของน้ำแป้งมีลักษณะคล้ายเชือกที่มีความยืดหยุ่นสามารถดึงให้ยืดและหดตัวได้ เป็นลักษณะเหนียวคล้ายกาว (Cohesive) มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ (Visco-elastic) เป็นสายยาว (Long body) เป็นเส้นเหนียว (Stringy) ของไหล (Fluid) และมีลักษณะคล้ายยาง (Rubbery) ส่วนลักษณะเนื้อสัมผัสของน้ำแป้งของแป้งแวกซี (Waxy starch) และแป้งจากรากจะมีลักษณะคล้ายกับน้ำแป้งของแป้งมันฝรั่งแต่มีความเหนียวคล้ายกาว และมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าแป้งมันฝรั่ง ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งเปียกจากแป้งธัญพืชนั้นจะมีลักษณะไม่เหนียวเหมือนกาว (Non-cohesive) เป็นแป้งสายสั้น มีความนุ่ม และหนัก (Heavy body)

#### 2.1.4.3 ความใสของแป้งเปียก

เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเจลาติไนเซชันของแป้ง แป้งเปียกเริ่มต้นจะมีลักษณะขุ่นขาว และเมื่อให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ ความขุ่นจะเริ่มลดลง และน้ำแป้งเปียกจะเริ่มมีความใสมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งความใสสุดท้ายของแป้งเปียกนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งเป็นสำคัญ แป้งที่ผลิตจากพืชหัว ราก และแป้งแวกซี แป้งเปียกจะมีความใสมากกว่าแป้งจากธัญพืช และแป้งมันฝรั่งนั้นจะให้แป้งเปียกที่มีความใสมากที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งชนิดอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้วความใสของแป้งเปียกจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระจายตัวของแป้งในน้ำ (dispersion) และแนวโน้มของการรีโทรกราเดชันของแป้ง โดยการวัดความใสของแป้งเปียกนั้นสามารถวัดจากการส่งผ่านแสงไปในแป้งเปียกหรือวัดจากการสะท้อนแสงของแป้งเปียก

#### 2.1.4.4 ความทนทานของแป้งเปียกต่อแรงเฉือน

ความหนืดของแป้งเปียกนั้นอาจมีค่าลดลงได้หากได้รับแรงเฉือนจากการกวน การผสม การคน เป็นต้น ซึ่งแรงเฉือนทางกายภาพดังกล่าวนี้อาจทำให้เม็ดแป้งที่บวมน้ำเกิดการฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งแป้งจากพืชหัว ราก และแป้งแวกซีนั้นเมื่อถูกทำให้สุกจะได้เม็ดแป้งที่มีการบวมน้ำมาก และอ่อนแอต่อแรงเฉือนดังกล่าว และหากมีการคนเกิดขึ้นจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกตัว และทำให้มีความหนืดน้อยลง ส่วนในแป้งจากธัญพืชนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเม็ดแป้งจะเกิดการบวมน้ำอย่างช้า ๆ และมีความทนทานต่อแรงเฉือนจากการกวนหรือคนที่ทำให้ความหนืดลดลงในระดับปานกลาง

(ตารางที่ 3) ความทนทานต่อแรงฉีกของแป้งเปียกนั้นสามารถทดสอบได้โดยการทำการกวนน้ำแป้งเป็นเวลานาน 20 นาที และวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของแป้งเปียกที่เกิดขึ้น

**ตารางที่ 3 สมบัติของแป้งเปียกจากแป้งธรรมชาติ (13)**

| แป้ง          | ความหนืด<br>แป้งเปียก | ลักษณะเนื้อ<br>สัมผัส | ความใส  | แรงต้านแรง<br>ฉีก | อัตราการเกิด<br>รีโทรเกรเดชัน |
|---------------|-----------------------|-----------------------|---------|-------------------|-------------------------------|
| มันฝรั่ง      | สูงมาก                | ยาว                   | เกือบใส | ปานกลาง-ต่ำ       | ปานกลาง                       |
| ข้าวโพด       | ปานกลาง               | สั้น                  | ขุ่น    | ปานกลาง           | สูง                           |
| ข้าวสาลี      | ปานกลาง-ต่ำ           | สั้น                  | ขุ่น    | ปานกลาง           | สูง                           |
| มันสำปะหลัง   | สูง                   | ยาว                   | ใส      | ต่ำ               | ต่ำ                           |
| ข้าวโพดเหนียว | ปานกลาง-สูง           | ยาว                   | ใส      | ต่ำ               | ต่ำมาก                        |

#### 2.1.5 พิล์มแป้ง (Starch film) (13)

ในอุตสาหกรรมอาหารนั้นผลิตภัณฑ์จากแป้งโดยทั่วไปแล้วจะถูกใช้ในรูปของแป้งเปียก ซึ่งส่วนมากมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความข้นหนืดให้กับอาหารหรือที่เรียกว่าเป็น Thickener ส่วนในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมอาหารนั้น การใช้ผลิตภัณฑ์จากแป้งจะเป็นการทำให้แป้งสุกในน้ำ และนำน้ำแป้งสุกที่ได้ไปใช้เคลือบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และทำให้แห้งจะได้เป็นแป้งที่มีลักษณะบาง ๆ เคลือบอยู่ที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ หน้าที่ของแป้งนั้นจะทำหน้าที่คล้ายกาว ทำให้พื้นผิวสองพื้นผิวติดกันได้ (Adhesive) หรืออาจเป็นการใช้น้ำแป้งเคลือบอยู่บนผิวของกระดาษ หรือบนผ้าเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่มีความเรียบเนียน ซึ่งแผ่นฟิล์มของแป้งนั้นจะต้องมีสมบัติที่จำเพาะเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตามที่ต้องการ ตัวอย่างสมบัติของแผ่นฟิล์มของแป้งที่ดี ได้แก่ ความเป็นพลาสติก (Plasticity) ความแข็งแรงภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มของแป้ง ความสามารถในการละลายน้ำได้ การตอบสนองต่อความชื้น ความใส และความมันเงาของแผ่นฟิล์มแป้ง

แผ่นฟิล์มของผลิตภัณฑ์แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังจะมีการยืดหยุ่นดี มีความแข็งแรง ทนต่อแรงดึงได้ดี สามารถยืดให้มีความยาวได้มากก่อนการฉีกขาด และมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มของผลิตภัณฑ์แป้งข้าวโพดและแป้งสาลี

เพื่อให้สามารถนำแผ่นฟิล์มของแป้งไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในอุตสาหกรรม แผ่นฟิล์มจะต้องสามารถละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่นฟิล์มที่สามารถตอบสนองต่อความชื้นหรือสามารถทำให้ชื้นขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Remoistener)



แผ่นฟิล์มของแป้งที่มาจากแป้งต่างชนิดกันมีความสามารถในการละลายน้ำแตกต่างกัน และมีอัตราการรีโทรกราเดชันต่างกัน โดยแผ่นฟิล์มจากแป้งฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง หรือแป้งแวกซีสามารถที่จะกระจายตัวในน้ำได้ง่ายและดีกว่าแผ่นฟิล์มของผลิตภัณฑ์แป้งที่มาจากแป้งธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวฟ่าง เป็นต้น การที่แผ่นฟิล์มของแป้งจากธัญพืชมีความสามารถในการละลายน้ำได้นั้น เนื่องจากอิทธิพลของสายอะไมโลสรวมกับปริมาณไขมันที่มีมากในแป้งจากธัญพืชเหล่านั้น โดยที่โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กในแป้งจากธัญพืชจะสามารถรีโทรกราเดชันได้ในขณะที่แผ่นฟิล์มกำลังแห้ง ทำให้สายของอะไมโลสไม่สามารถละลายน้ำได้ รวมไปถึงทำให้โมเลกุลของอะไมโลสเกิดการรวมตัวเป็นตาข่ายร่างแหที่ไม่ละลายน้ำอีกด้วย ส่วนในแป้งที่มาจากพืชหัว ราก และแป้งแวกซี ซึ่งเป็นแป้งที่เกิดรีโทรกราเดชันได้น้อยเมื่อนำมาผลิตแผ่นฟิล์มจะได้แผ่นฟิล์มแป้งที่สามารถละลายน้ำได้ดี

## 2.2 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแป้งทาปิโอกา (Tapioca starch) หรือแป้งแมนนิออก (Manioc starch) แป้งมันสำปะหลังถูกผลิตมาจากส่วนรากของต้นมันสำปะหลัง (รูปที่ 9) กำลังการผลิตของแป้งมันสำปะหลังทั่วโลกมีประมาณ 1 ล้านตัน และผลิตได้มากในประเทศไทย บราซิล ฟิลิปปินส์ ไนจีเรีย มาเลเซีย และแองโกลา แป้งมันสำปะหลังมักจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และกา (13)



รูปที่ 9 ส่วนรากของต้นมันสำปะหลัง

ที่มา: <http://munsampalang.blogspot.com/2014/03/10-10-40.html>

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลังคือมีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งเจือปนต่ำ โดยจะมีปริมาณแป้งอยู่มากถึงร้อยละ 95 มีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 1) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่าร้อยละ 0.04 ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ อาจจะมีรอยบวมที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ดแป้ง (รูปที่ 6 (ข)) เม็ดแป้งส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางคืออยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติบางประการไม่คงตัว เช่น เมื่อได้รับความร้อนจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง แต่ความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงเฉือนและความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้การนำแป้งมันสำปะหลังจากธรรมชาติมาใช้ในการอุตสาหกรรมอาหารมีข้อจำกัด ดังนั้นการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (23)

## 2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch) (13)

โดยทั่วไปแล้วแป้งตามธรรมชาติหรือแป้งดิบ (Native starch) อาจมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องแก้ปัญหาโดยนำแป้งจากธรรมชาติไปผ่านกรรมวิธีที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงให้แป้งมีคุณสมบัติตามต้องการเพื่อให้คงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ในการแปรรูปและมีความคงตัวมากขึ้น

การดัดแปรแป้งดิบเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการนั้นถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้มีการใช้ผลิตภัณฑ์จากแป้งเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันวิธีการดัดแปรแป้งดิบนั้นมีหลากหลายวิธี โดยวิธีการดัดแปรต่าง ๆ นั้นสามารถแบ่งได้เป็นการดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification) การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) หรือใช้เอนไซม์ร่วมในการดัดแปรซึ่งแบ่งย่อยเป็นการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการย่อยแป้งด้วยกรด ต่าง เอนไซม์ การใช้สารออกซิไดซ์ซึ่งหรือการใช้กรดร่วมกับความร้อน ซึ่งเรียกรวมว่าคอนเวอร์ชัน (Conversion) และการทำแป้งอนุพันธ์ (Derivatization) ซึ่งเป็นการเติมหมู่ทางเคมีในโมเลกุลแป้ง เช่น การทำปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน เอสเทอร์ิฟิเคชัน และครอสลิงค์หรือการดัดแปรร่วม วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ (12)**

| การดัดแปร | ชนิดการดัดแปร      | การเตรียม                                                                                                |
|-----------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ทางกายภาพ | การให้ความร้อนขึ้น | ให้ความร้อนแก่แป้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเกิดเจลลาตินในเซชัน โดยมีความขึ้นในการเกิดเจลลาตินในเซชันที่จำกัด |



ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ (ต่อ)

| การดัดแปร      | ชนิดการดัดแปร           | การเตรียม                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | การพรีเจลาตีไนเซชัน     | เตรียมเจล/กึ่งสำเร็จรูป/และบวมน้ำโดยใช้น้ำเย็น โดยใช้วิธี Drum drying/ การสเปรย์และการเอ็กซ์ทรูชันโดยมีตัวทำละลายในกระบวนการ                                                                                                                                                                                   |
| Conversion     | การย่อยด้วยกรด          | ใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดออร์โท-ฟอสฟอริก หรือกรดซัลฟิวริก                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                | การย่อยด้วยเอนไซม์      | ทำในสารละลายของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเกิดเจลาติ-ไซเซชันด้วยเอนไซม์ย่อยอะไมโลส (Amylolytic enzyme)                                                                                                                                                                                                           |
|                | การใช้ต่าง              | ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | การออกซิเดชัน/การฟอกขาว | ใช้กรดเปอร์อะซิติก และ/หรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ โซเดียมคลอไรด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต                                                                                                                                                          |
| Derivatization | อีเทอร์ิฟิเคชัน         | แป้งไฮดรอกซีโพรพิล – การทำอีเทอร์ิฟิเคชันโดยโพรพิลีน-ออกไซด์                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | เอสเทอร์ิฟิเคชัน        | แป้งอะซีเตท – การทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยอะซีติกแอนไฮไดรด์หรือไวนิลอะซีเตท<br>Acetylated adipate – ทำการเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยอะซีติกแอนไฮไดรด์และอะดีกแอนไฮไดรด์<br>แป้งโซเดียมออกทีนิลซัคซิเนต – ทำการเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยออกทีนิลซัคซิเนตแอนไฮไดรด์                                                             |
|                | การเชื่อมข้าม           | โมโนสตาร์ชฟอสเฟต – ทำการเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยกรดออร์โท-ฟอสฟอริก โซเดียมหรือโพแทสเซียมออร์โทฟอสเฟต หรือโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต<br>ไดสตาร์ชฟอสเฟต – ทำการเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยโซเดียม-ไตรเมตาฟอสเฟตหรือฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์<br>Phosphate Distarch phosphate – ทำการใช้ร่วมกันระหว่างโมโนสตาร์ชฟอสเฟตและไดสตาร์ชฟอสเฟต |

**ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ (ต่อ)**

| การดัดแปร     | ชนิดการดัดแปร | การเตรียม                                                                                                                                                           |
|---------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การดัดแปรร่วม |               | Acetylated distarch phosphate – ทำการเอสเทอริฟิเคชันด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตหรือฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ร่วมกับทำการเอสเทอริฟิเคชันโดยอะซีติกแอนไฮไดรด์หรือไวโนลอะซีเตต |
|               |               | Hydroxypropyl distarch phosphate – ทำการเอสเทอริฟิเคชันด้วยโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต หรือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ด้วยการอีเทอร์ฟิเคชันด้วยโพรพิลีนออกไซด์                  |

## 2.4 แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) (13)

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งดัดแปรที่มีความหนืดต่ำ ทำได้โดยการตัดเส้นแป้งให้สั้นลงปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะเป็นการตัดสายพอลิเมอร์ของกลูโคสในแป้ง (Depolymerization) และเป็นการเติมหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-\text{COOH}$ ) และหมู่คาร์บอนิล ( $-\text{C}=\text{O}$ ) ในโมเลกุลแป้งแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลไปพร้อม ๆ กัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลแป้งส่งผลให้เกิดการดัดแปรทางเคมีของแป้งขึ้นสองชนิด คือ ดีพอลิเมอร์เซชันและการเติมหมู่คาร์บอกซิล ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะเกิดขึ้นกับโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน แต่การเติมหมู่คาร์บอกซิลและคาร์บอนิลบนสายตรงของอะไมโลสจะมีอิทธิพลต่อแนวโน้มการเกิดรีโทรกราเดชันที่ลดลงและการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์ในสารละลาย

ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของแป้งออกซิไดซ์และแป้งดิบที่ไม่ผ่านการดัดแปร อาทิ แป้งเปียกร้อนมีความหนืดต่ำโดยต่ำกว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ย มีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันต่ำเนื่องจากการมีหมู่คาร์บอกซิลบนสายอะไมโลส มีอุณหภูมิแป้งเปียก (Pasting temperature) ต่ำ อัตราการเกิดเจลในเซชันสูง และมีค่าความหนืดที่จุดยอด (Peak viscosity) ต่ำกว่าแป้งธรรมชาติ फिल्मแป้งมีความใสมากกว่าแป้งธรรมชาติ เม็ดแป้งดัดแปรที่ได้มีสีขาว กลิ่นรสดี และเกิดการปนเปื้อนด้วยเชื้อแบคทีเรียได้น้อยกว่าแป้งธรรมชาติ และมีประจุลบเนื่องจากคาร์บอกซิลที่แทนที่ด้วยโมเลกุลแป้ง

## 2.5 กระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

### 2.5.1 พลาสมา (Plasma) (14)

พลาสมาถูกจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากของแข็ง ของเหลวและแก๊ส พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของแก๊สที่เป็นกลาง กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไอออน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยการแตกตัวจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน ไมโครเวฟ และรังสียูวี เป็นต้น การกระตุ้นส่งผลให้อะตอมสูญเสียสภาพความเป็นกลางและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ปริมาณที่ใกล้เคียงกับประจุบวกส่งผลให้ประจุไฟฟ้าสุทธิของพลาสมาเป็นศูนย์ พลาสมาแสดงถึงพฤติกรรมเหมือนอนุภาคเป็นกลาง (Quasi-neutral) และมีการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่ม (Collective behavior)

พลาสมาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสมาอุณหภูมิสูงและพลาสมาอุณหภูมิต่ำ พลาสมาอุณหภูมิสูงคือพลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานสูงแกแก๊สเพื่อให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งแก๊สในระบบของพลาสมาประเภทนี้จะเกิดการแตกตัวเกือบสมบูรณ์และระบบประจุสุทธิอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ไอพ่นเครื่องยนต์ เป็นต้น ส่วนพลาสมาอุณหภูมิต่ำคือพลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานต่ำแกแก๊สส่งผลให้เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์ของไอออนในระบบอุณหภูมิต่ำ เช่น ระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ความดันต่ำ การปล่อยประจุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น

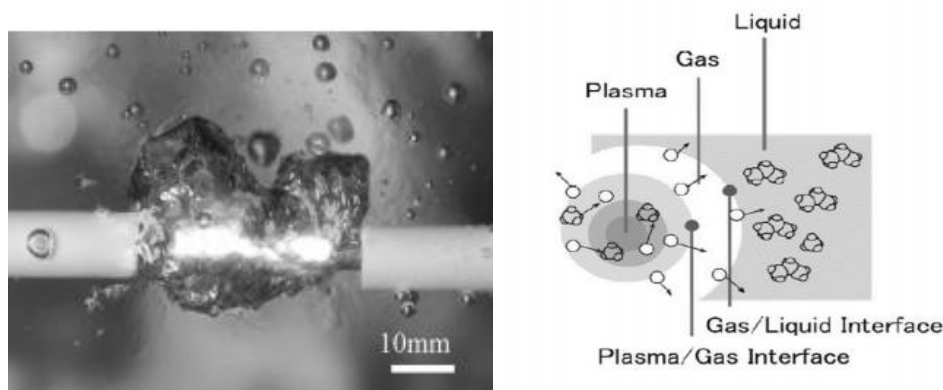
### 2.5.2 พลาสมาวิวัฒนาการของเหลว (Liquid phase plasma)

#### 2.5.2.1 หลักการของพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว (14)

พลาสมาวิวัฒนาการของเหลวคือ กระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบด้วยวิวัฒนาการของเหลวโดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดหมู่ว่องไว (Free radical) ซึ่งหมู่ว่องไวที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว ข้อดีของพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวคือ สามารถใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้ ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การดัดแปลงพื้นผิวของโลหะและการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

รูปแบบการเกิดพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวแสดงไว้ในรูปที่ 10 โดยพลาสมาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งถูกล้อมรอบด้วยแก๊สและของเหลวส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นบริเวณรอบ ๆ พลาสมา ในขณะที่พลาสมาถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้หมู่ว่องไวระหว่างชั้นอิเล็กโทรด

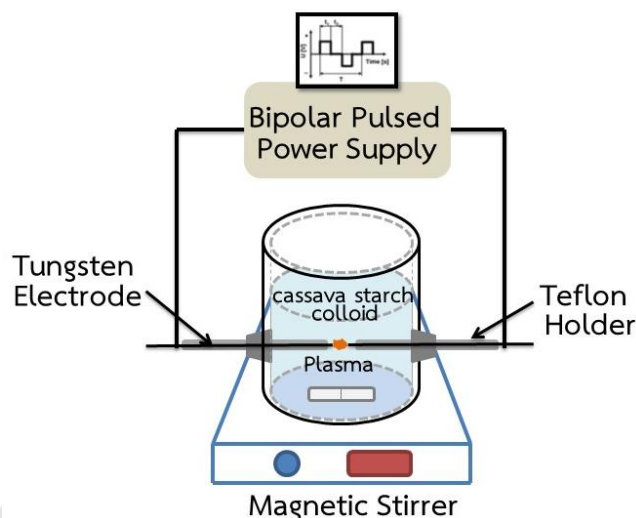
เพิ่มมากขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวไปอยู่บริเวณของเหลวที่มีหมว่องไวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวไปอยู่บริเวณของเหลวที่มีหมว่องไวน้อยกว่าโดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังนั้น สารที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นหมว่องไวต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้หมว่องไวภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย



รูปที่ 10 ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว (14)

### 2.5.3 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว (24)

พลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 11 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันและความถี่สูงระบบกระแสตรง ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulsed) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในเพาเวอร์ซัพพลายที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถึงปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ถึงปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้วรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ถึง 10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้งสองด้านของถึงปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทั้งสแตน ทองแดงและเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิกเพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมา ในการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลวจะเชื่อมต่อเพาเวอร์ซัพพลายเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 11 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว

พลาสมาสามารถสร้างหมว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยหมว่องไวที่เกิดขึ้นเป็นสารตัวนำไฟฟ้าเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ไอออนต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่าหมว่องไว โดยหมว่องไวที่มักเกิดขึ้นระหว่างการทรีทสารละลายด้วยพลาสมา เช่น Hydroxyl radical ( $\text{OH}^{\bullet}$ ), Hydrogen peroxide radical ( $\text{H}_2\text{O}_2^{\bullet}$ ), Free electron ( $e^-$ ), Superoxide anion ( $\text{O}^-$ ) เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างหมว่องไว สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งอยู่ภายในสารละลายแสดงถึงชนิดของหมว่องไว

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 2011 Pauli และคณะ (1) ได้ผลิตและศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยวิธีการออกซิเดชัน โดยเตรียมสารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คือ ร้อยละ 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่ความเข้มข้นของคลอรีนที่ออกฤทธิ์ (Active chlorine) ต่างกัน คือ ร้อยละ 0.8 และ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสารออกซิไดซ์ พบว่าผลการทดลองพบว่าการฟิล์มจากแป้งดิบพบความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยังพบว่ามีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งอยู่ในฟิล์มซึ่งไม่พบในฟิล์มแป้งที่ผ่านการออกซิเดชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากทำลายด้วยความร้อนในระหว่างกระบวนการออกซิเดชันส่งผลให้เม็ดแป้งอ่อนแอลง เมื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางกลพบว่าปริมาณของคลอรีนออกฤทธิ์มีผลต่อค่าความทนแรงดึง โดยฟิล์มแป้งที่ใช้คลอรีนออกฤทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงดึงมากกว่าฟิล์มแป้งที่ใช้



คลอรีนออกฤทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้คลอรีนออกฤทธิ์ที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มแบงมีความเข้มข้นของของแข็งสูงกว่าฟิล์มแบงที่ใช้คลอรีนออกฤทธิ์ที่ความเข้มข้นสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ากระบวนการออกซิเดชันแบงมันสำปะหลังส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดแบงเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการออกซิเดชันสนับสนุนให้เกิดการแตกของพันธะไกลโคซิดิกบางพันธะ ส่งผลให้เกิดการนำเข้าของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในโมเลกุลของเม็ดแบง ซึ่งทำให้ยากต่อการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงใหม่ และผลความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยแบงมันสำปะหลังมีผลโดยตรงต่อค่าการยืดตัวของฟิล์มแบง โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยแบงสูงมีค่าการยืดตัวที่สูง หลังจากนั้นจึงเลือกฟิล์มที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแขวนลอยแบงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคลอรีนออกฤทธิ์ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก มาวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ พบว่าระดับการบวมตัวของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบระดับการบวม น้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อระดับการบวมตัวของฟิล์ม เมื่อตรวจวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการละลายในน้ำของฟิล์มพบว่าฟิล์มที่ผลิตจากแบงมันสำปะหลังมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการละลายที่สูงกว่าฟิล์มที่ผลิตจากปิโตรเลียมและโปรตีน ข้อนี้จึงกลายเป็นข้อจำกัดของฟิล์มที่ผลิตจากแบง

ปี ค.ศ. 2015 Luchese และคณะ (2) ได้สังเคราะห์ฟิล์มที่ผลิตจากแบงพินฮาว (Pinhão starch) โดยศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มที่ผลิตจากแบงพินฮาวดิบและแบงพินฮาวดัดแปรด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาตรต่าง ๆ กัน คือ 1 3 และ 5 มิลลิลิตร โดยใช้กลีเซอรอลและแซนแทนกัม (Xanthan gum) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ผลการทดลองพบว่าแบงดิบ แบงที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดปริมาตร 1 และ 3 มิลลิลิตร แสดงลักษณะโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวและมีลักษณะคล้ายกัน แต่แบงที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดปริมาตร 5 มิลลิลิตร แสดงลักษณะโครงสร้างที่แตกและไม่สามารถอธิบายลักษณะรูปร่างได้ เนื่องจากการตกผลึกของโมเลกุลกลูโคสจึงไม่นำฟิล์มนี้มาทำการศึกษาวิเคราะห์ในด้านอื่นต่อ เมื่อตรวจวัดคุณสมบัติการละลายน้ำของฟิล์มพบว่าความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากการไฮโดรไลซิสแบงส่งเสริมให้เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ อีกทั้งกลีเซอรอลที่มีปฏิสัมพันธ์กับเมทริกซ์ของฟิล์มจึงช่วยสนับสนุนการเพิ่มช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เข้าไปในฟิล์มได้ง่ายขึ้น เมื่อตรวจวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มแบงที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ปริมาตร 1 และ 3 มิลลิลิตร แต่ในทางกลับกันฟิล์มที่ผลิตจากแบงดิบมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มแบงที่ผ่านการไฮโดรไลซิส เนื่องจากการซึมผ่านของไอน้ำมักเกิดขึ้นบริเวณออสเทนชัน และการไฮโดรไลซิสมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นออสเทนชันมากกว่าบริเวณที่เป็นโครงสร้างผลึก



ส่งผลให้บริเวณออสถฐานลดลง ดังนั้นค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของแป้งที่ผ่านการไฮโดรไลซิสจึงลดลง

ปี ค.ศ. 2016 Biduski และคณะ (3) ได้ศึกษาผลกระทบของการดัดแปรแป้งข้าวฟ่างต่อฟิล์ม โดยการใช้กรด การออกซิเดชัน และการใช้สองวิธีร่วมกัน โดยกระบวนการใช้กรดเตรียมสารละลายแขวนลอยผสมโดยใช้แป้ง 300 กรัม ในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เติมกรดแลกติกที่ความเข้มข้น 3 กรัม ต่อ 100 กรัมของแป้ง ปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร และทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ในกระบวนการออกซิเดชันเตรียมสารแขวนลอยผสมโดยใช้แป้ง 35 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็น 9.5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร เติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ช้า ๆ ในสารแขวนลอยผสมในระยะเวลา 30 นาที รักษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 9.5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร และกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 50 นาที หลังจากนั้นแป้งถูกทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง และกระบวนการดัดแปรแป้งข้าวฟ่างโดยใช้สองวิธีร่วมกันดำเนินการโดยใช้กรดในขั้นตอนแรกและการออกซิเดชันในขั้นตอนถัดไป ผลการทดลองพบว่าแป้งข้าวฟ่างดัดแปรทั้ง 3 ชนิด ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการเจลาติไนเซชันแป้งและค่าเอนทาลปีของแป้งดัดแปรทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดขึ้นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลและคาร์บอกซิล ที่โครงสร้างของเม็ดแป้ง จึงส่งผลให้มีพันธะไฮโดรเจนในแป้งดัดแปรเพิ่มขึ้นและจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำลายพันธะเหล่านี้ เมื่อนำแป้งดิบและแป้งดัดแปรขึ้นรูปเป็นฟิล์มพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดและการออกซิเดชันเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อเทียบกับแป้งดิบ ในทางกลับกันแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยสองวิธีมีรอยแตกเล็กน้อยซึ่งเกิดจากการเกิดขึ้นของหมู่ฟังก์ชันในปริมาณที่สูงซึ่งนำไปสู่การเพิ่มช่องว่างระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ เมื่อศึกษาความเข้มข้นของแป้งที่ต่างกันในการเตรียมฟิล์มพบว่าแป้งที่เตรียมที่ความเข้มข้นสูงมีความเรียบและสม่ำเสมอของฟิล์มมากกว่าแป้งที่เตรียมที่ความเข้มข้นต่ำ แป้งดัดแปรโดยใช้การใช้กรดและการออกซิเดชันพบว่ามีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง ในทางกลับกันแป้งที่ดัดแปรโดยใช้สองวิธีร่วมกันมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของแป้ง ทำให้น้ำสามารถเคลื่อนผ่านฟิล์มได้สูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันเพื่อควบคุมอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม เมื่อนำฟิล์มจากแป้งดัดแปรไปทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่าฟิล์มที่เกิดจากการดัดแปรแป้งโดยใช้สองวิธีมีค่าการต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันและการใช้กรดตามลำดับ ซึ่งโดยปกติบรรจุน้ำที่ไม่ต้องการการ

ยึดตัวที่สูง แต่ต้องการความต้านทานแรงดึงมาก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์มีโครงสร้างที่แข็งแรงสมบูรณ์

ปี ค.ศ. 2017 Colivet และคณะ (6) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการทางเคมี โดยศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม 4 ชนิด คือ ฟิล์มจากแป้งดิบ ฟิล์มจากแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการอะซีไทเลชัน กระบวนการโครสลิงค์ และกระบวนการดัดแปรโดยใช้ 2 วิธีร่วมกัน (อะซีไทเลชันและโครสลิงค์) โดยใช้ซอร์บิทอล (Sorbitol) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการอะซีไทเลชัน มีพื้นผิวที่เรียบเนียนและเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนฟิล์มที่ดัดแปรด้วยกระบวนการโครสลิงค์มีพื้นผิวที่ขรุขระแต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วย 2 วิธีร่วมกัน แต่เมื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในของฟิล์มแต่ละชนิดพบว่ายังเป็นเนื้อเดียวกัน มีพื้นผิวที่สม่ำเสมอและต่อเนื่อง เมื่อตรวจวัดระดับการบวมตัวของฟิล์มแต่ละชนิดพบว่า ฟิล์มจากแป้งดิบมีระดับการบวมตัวที่สูงกว่าฟิล์มจากแป้งดัดแปร เนื่องจากการดัดแปรแป้งส่งผลให้โมเลกุลของตัวทำละลายเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของเม็ดแป้งได้ยากเนื่องจากเกิดปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแรงระหว่างพอลิเมอร์จึงส่งผลให้ฟิล์มจากแป้งดัดแปรมีระดับการบวมตัวต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ ในส่วนของสมบัติด้านการละลายน้ำของฟิล์มแป้งแต่ละชนิดพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและยังพบว่าส่วนที่ละลายออกไปคือซอร์บิทอลที่ใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก เมื่อนำไปตรวจวัดความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำพบว่าฟิล์มจากแป้งดิบมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มจากแป้งดัดแปร เนื่องจากว่าพบการเกิดกลุ่มฟังก์ชันที่ไม่ชอบในโครงสร้างของเม็ดแป้งซึ่งกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้มีปฏิสัมพันธ์กับน้ำน้อยมาก และเมื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งแต่ละชนิดพบว่าฟิล์มจากแป้งที่ผ่านกระบวนการโครสลิงค์มีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์มจากแป้งดิบและแป้งที่ผ่านกระบวนการดัดแปร 2 วิธีร่วมกัน เนื่องจากกระบวนการโครสลิงค์จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างเม็ดแป้งจึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงสูง และยังพบว่าฟิล์มแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการอะซีไทเลชันมีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์มแป้งชนิดอื่น ๆ เนื่องจากว่ากระบวนการอะซีไทเลชันจะช่วยเชื่อมโยงโมเลกุลที่อ่อนแอโดยการลดหมู่ไฮดรอกซิลในภายในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ในทางกลับกันกลับพบว่าฟิล์มแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย 2 วิธีร่วมกันมีความแข็งแรงต่ำ ซึ่งสามารถให้เหตุผลได้ว่าการดัดแปรด้วย 2 วิธีร่วมกันเกิดที่รุนแรงของ 2 กระบวนการจึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงต่ำ และยังพบว่าฟิล์มแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย 2 วิธีร่วมกันรวมถึงฟิล์มแป้งที่ผ่านกระบวนการอะซีไทเลชันมีความยืดหยุ่นสูง โดยความยืดหยุ่นของฟิล์มแป้งสัมพันธ์กับความชื้นซึ่งเชื่อมโยงกับการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างของฟิล์มแป้งที่ผ่านกระบวนการอะซีไทเลชัน

ปี ค.ศ. 2018 Banura และคณะ (9) ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พลาสมาคลื่นความถี่วิทยุความดันต่ำ โดยนำตัวอย่างแป้งวางในจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปวาง

ไว้ระหว่างข้ออิเล็กโทรดในถังปฏิกรณ์พลาสมาโดยเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายคลื่นความถี่วิทยุที่คลื่นความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ ที่ระดับพลังงาน 40 และ 60 วัตต์ เป็นเวลา 10 และ 20 นาที ผลการทดลองพบว่าแปงข้าวโพดที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีปริมาณของอะไมโลสลดลง โดยที่เวลาในการทรีตพลาสมามีผลมากกว่าการเพิ่มระดับพลังงาน การลดลงของอะไมโลสเกิดจากการเกิดขึ้นของหมู่อนุมูลอิสระและอิเล็กตรอนทุติยภูมิในระหว่างกระบวนการพลาสมาทำให้เกิดการสลายของพันธะเชื่อมโยงไกลโคซิดิก ส่งผลให้ชิ้นส่วนของโมเลกุลมีน้ำหนักลดลงและก่อให้เกิดน้ำตาลเดี่ยว ในทางกลับกันแปงมันสำปะหลังที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีปริมาณของอะไมโลสเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากแปงมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลเพคตินที่สูง จึงส่งผลให้เกิดการดีพอลิเมอไรเซชันอะไมโลเพคติน ก่อให้เกิดชิ้นส่วนเล็กๆ ของอะไมโลส เมื่อตรวจวัดความสามารถในการจับกับน้ำของพบว่าแปงดัดแปรทั้งสองชนิดมีความสามารถในการจับตัวกับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแปงดิบที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างของแปงทั้งสองชนิดหลังผ่านการทรีตด้วยพลาสมาด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer แสดงให้เห็นว่าแปงทั้งสองชนิดเป็นแปงประเภทกึ่งผลึก โดยพลาสมาจะส่งผลต่อบริเวณอสัณฐานมากกว่าบริเวณผลึกเนื่องจากว่าบริเวณอสัณฐานมีความอ่อนไหวง่ายกว่า และเมื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าหลังผ่านการทรีตด้วยพลาสมาไม่พบรอยแตกบนเม็ดแปงทั้งสองชนิด แต่เม็ดแปงข้าวโพดแสดงพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งกระบวนการพลาสมาอาจจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของเม็ดแปงส่งผลให้ความสามารถในการชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการดัดแปรคุณสมบัติของแปง เช่น การจับกับน้ำ ระดับการบวม น้ำ คุณสมบัติด้านความหนืด

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.1.1 Magnetic stirrer (IKA ประเทศมาเลเซีย)
- 3.1.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว (PEKURIS ประเทศญี่ปุ่น)
- 3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร (Duran ประเทศเยอรมัน)
- 3.1.4 ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน (CaHc จำกัด ประเทศไทย)
- 3.1.5 เครื่องชั่งสาร (Denver ประเทศแคนาดา)
- 3.1.6 pH-meter (Denver ประเทศแคนาดา)
- 3.1.7 เตาอบ (France Etuves ประเทศฝรั่งเศส)
- 3.1.8 โถดูดความชื้น (Duran ประเทศเยอรมัน)
- 3.1.9 ปิ๊มสุญญากาศ (Deoro ประเทศไทย)
- 3.1.10 กรวยกรองบุชเนอร์และขวดกรองสาร (Pirex ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.1.11 กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman สหราชอาณาจักร)
- 3.1.12 ฐานหล่ออะคริลิก (บริษัท โซติการ ครีเอชั่น จำกัด ประเทศไทย)
- 3.1.13 ดิจิทัลไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo ประเทศญี่ปุ่น)
- 3.1.14 Universal testing machine (Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.1.15 UV-visible spectrophotometer (Helios Omega ประเทศเกาหลี)
- 3.1.16 X-Ray Diffractometer (Bruker ประเทศเยอรมัน)
- 3.1.17 แป้งมันสำปะหลัง (บริษัท อุตสาหกรรมแป้งไทย จำกัด ประเทศไทย)
- 3.1.18 อะไมโลสบริสุทธิ์จากแป้งมันฝรั่ง (Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.1.19 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, Conc. 37%)
- 3.1.20 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Conc. 97%)
- 3.1.21 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, Conc. 30%)
- 3.1.22 ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide)
- 3.1.23 ไอโอดีน (Iodine)
- 3.1.24 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide)
- 3.1.25 ไฮดรอกซีลามีนคลอไรด์ (Hydroxylamine chloride)
- 3.1.26 กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid)

3.1.27 กลีเซอรอล (Glycerol)

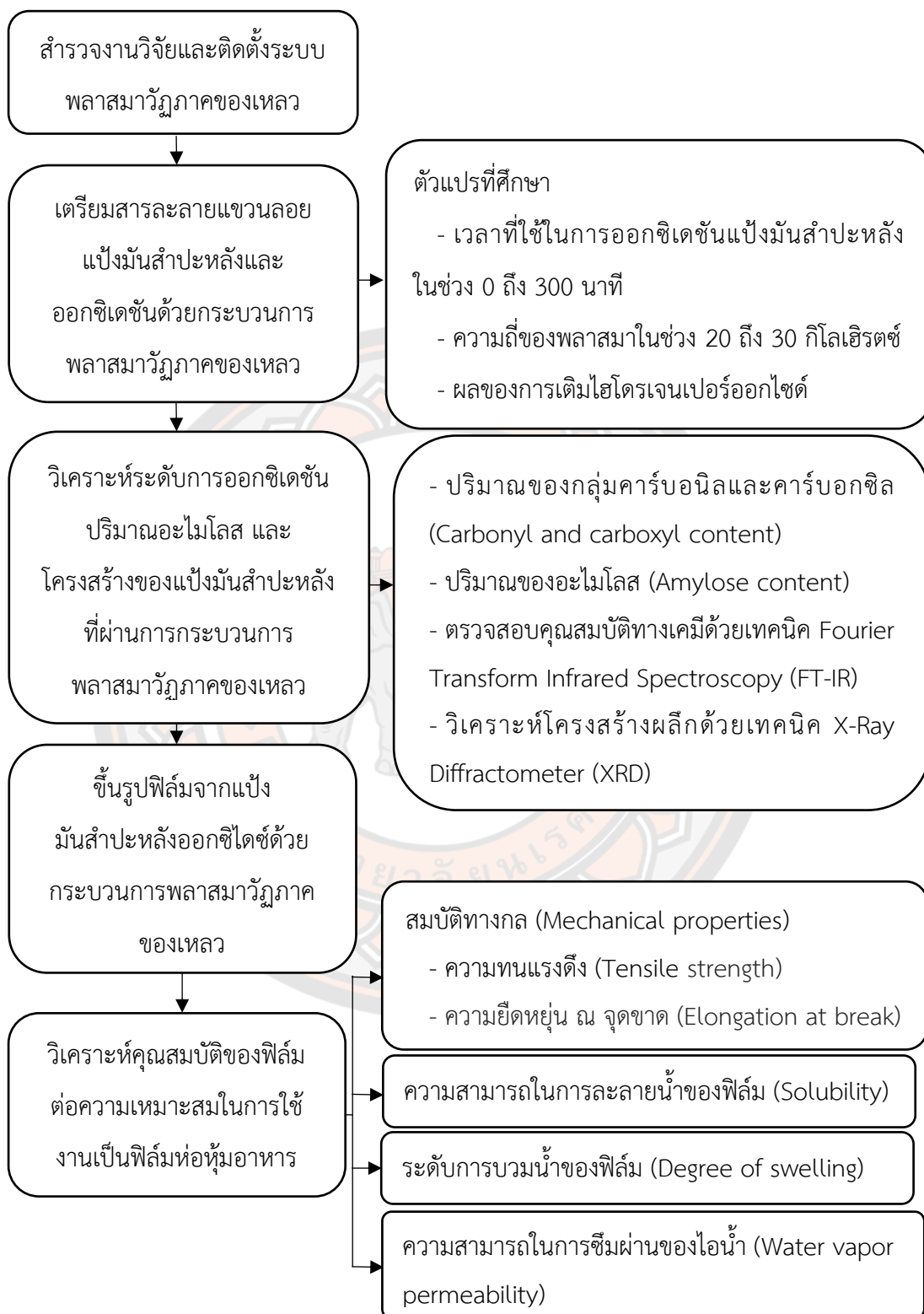
3.1.28 ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator)

3.1.29 เมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ (Methyl orange indicator)





### 3.2 วิธีการทดลอง



รูปที่ 12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

กระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวเกิดขึ้นภายในระบบเปิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ แก้วที่มีขั้วอิเล็กโทรดติดตั้งอยู่ทั้งสองข้างของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเกิดขึ้นระหว่างการติดตั้ง ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ติดตั้งให้มีระยะห่างระหว่าง ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว 0.2 มิลลิเมตร เชื่อมต่อขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับเครื่องพาวเวอร์ซัพพลาย ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ โดยที่เครื่องปฏิกรณ์แก้วตั้งอยู่บนเครื่องปั่นกวาน

#### 3.3.2 การออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

เตรียมสารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร ติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองและนำสารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ใส่ใน ถึงปฏิกรณ์พลาสมา ทำการออกซิไดซ์แป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวที่ ความต่างศักย์ (Voltage) 3 กิโลโวลต์ ความกว้างของพัลส์ (Pulse width)  $3 \times 10^{-6}$  วินาที โดยตัวแปร ที่ทำการศึกษาคือ เวลาที่ใช้ในการออกซิเดชันด้วยพลาสมา 0 30 60 120 180 240 และ 300 นาที ความถี่ของพลาสมา 20 25 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ อัตราส่วนแบ่งต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยน้ำหนัก 1 ต่อ 0.05

#### 3.3.3 ปริมาณการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน ด้วยพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

อนุมูลไฮดรอกซิลคืออนุมูลวที่ก่อตัวขึ้นระหว่างการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลัง ด้วยกระบวนการพลาสมา ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับ สารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังในระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมา ปริมาณการ ก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาดำเนินการตาม วิธีของ Prasertsung และคณะ (25) โดยปิเปตตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมกับกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเวลา 8 นาที แล้วนำส่วน ใสมาวัดค่าการดูดกลืนแสงอย่างรวดเร็วด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ค่าการดูดกลืน แสง 303 นาโนเมตร โดยสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ด้วยกรดซาลิไซลิกที่มีความเข้มข้น ต่าง ๆ กัน

3.3.4 การวิเคราะห์ระดับการออกซิเดชันของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

ระดับการออกซิเดชันสามารถตรวจวัดได้จากการไทเทรตหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิล

#### 3.3.4.1 ปริมาณคาร์บอนิล

ตรวจวัดปริมาณของคาร์บอนิลตามวิธีของ Dias และคณะ (26) โดยนำแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวไปเจลาตีไนเซชันจนสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งสารละลายให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็น 3.2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นเติมสารละลายไฮดรอกซีลามีนคลอไรด์ 15 มิลลิลิตร (วิธีการเตรียมไฮดรอกซีลามีนคลอไรด์เตรียมได้โดยละลายไฮดรอกซีลามีนคลอไรด์ 25 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร) แล้วนำไปวางในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมาไทเทรตอย่างรวดเร็วด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งพีเอชของสารละลายมีค่า 3.2 โดยใช้เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) เป็นอินดิเคเตอร์ บันทึกปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไทเทรตได้แล้วคำนวณหาปริมาณของคาร์บอนิลดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณของคาร์บอนิล} = \frac{(V_b - V_s) \times M \times 0.028 \times 100}{W} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $V_b$  = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไทเทรตได้ของสารละลายแบลนด์ (Blank) (มิลลิลิตร)

$V_s$  = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไทเทรตได้ของสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$M$  = โมลาริตีของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

#### 3.3.4.2 ปริมาณคาร์บอกซิล

ตรวจวัดปริมาณของคาร์บอกซิลตามวิธีของ Biduski และคณะ (3) โดยนำแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว 3 กรัม กระจายในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลายแขวนลอยด้วยปั๊มสุญญากาศโดยใช้กรวยกรองบุชเนอร์ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นประมาณ

400 มิลลิลิตร นำแบ่งที่กรองได้ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายแขวนลอยแบ่งมันสำปะหลังเจลาตินในเซชันจนสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารละลายมาไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งฟิเอชของสารละลายเท่ากับ 8.2 โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ บันทึกปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไทเทรตได้แล้ว คำนวณหาปริมาณของคาร์บอกซิลดังสมการที่ (3.2)

$$\text{ปริมาณของคาร์บอกซิล} = \frac{(V_s - V_b) \times M \times 0.045 \times 100}{W} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_s$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไทเทรตได้ของสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)  
 $V_b$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไทเทรตได้ของสารละลายแบลงค์ (blank) (มิลลิลิตร)  
 $M$  = โมลาริตีของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)  
 $W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

### 3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสในแป้งออกซีไดซ์

การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสในแป้งออกซีไดซ์พิจารณาโดยใช้วิธี Colorimetric method อ้างอิงตามวิธีของ Biduski B. และคณะ (3) ทำได้โดยนำแป้งออกซีไดซ์ 20 มิลลิกรัม กระจ่ายในสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 8 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วย้ายใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายผสมมีปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่ได้ 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายผสมไอโอดีน/โพแทสเซียมไอโอไดด์ (0.0025/0.0065 โมลาร์) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่างผสม เป็น 50 มิลลิลิตร วางทิ้งไว้ 15 นาที ก่อนจะอ่านค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ค่าการดูดกลืนแสง 600 นาโนเมตร โดยสร้างกราฟมาตรฐานจากอะไมโลสบริสุทธิ์

3.3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของของแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

3.3.6.1 ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของแข็งน้ำมันสำปะหลังทั้งก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวตรวจสอบโดยการเตรียมตัวอย่างแข็งน้ำมันสำปะหลังดิบและแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันในสภาวะต่าง ๆ ในรูปแบบผงแห้ง แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องมือ Fourier transform infrared spectroscopy ของบริษัท Perkin Elmer จากประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ ATR Mode สแกนในช่วง 4,000 ถึง 400 ต่อเซนติเมตร ค่าความสามารถในการแยก (Resolution) 0.3 ต่อเซนติเมตร และจำนวนสแกน 128 ครั้ง

3.3.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแข็งน้ำมันสำปะหลังทั้งก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยการเตรียมตัวอย่างแข็งน้ำมันสำปะหลังดิบและแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันที่สภาวะต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของผงแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer ของบริษัท Bruker จากประเทศเยอรมัน โดยทำการสแกนที่ 2-theta ตั้งแต่ 5 องศา ถึง 40 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศาต่อนาที

3.3.5 การขึ้นรูปฟิล์ม

กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มอ้างอิงตามวิธีของ Pauli และคณะ (1) ซึ่งมีการดัดแปรบางขั้นตอน โดยนำแข็งน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง (ในส่วนของกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มที่มีการศึกษาผลของการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก ก่อนการเจลาตินในเซชันผสมกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในสารละลายแขวนลอยแข็งน้ำมันสำปะหลังหลังจากนั้นจึงนำไปเจลาตินในเซชัน) จากนั้นเทสารละลายฟิล์มปริมาตร 27 มิลลิลิตร ลงบนวัสดุหล่อฟิล์มที่ทำจากอะคลิลิกขนาด 10.5×15.5 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 64.5



### 3.3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม

#### 3.3.6.1 สมบัติทางกล

##### 3.3.6.1.1 ความทนแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดขาด

ความทนแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดขาด วิเคราะห์ตามวิธีของ Colivet และคณะ กับ Biduski และคณะ (3, 6) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 12x2.5 ตารางเซนติเมตร ตั้งระยะห่างเริ่มต้นก่อนการดึงแผ่นฟิล์มที่ 100 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วในการทดสอบ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยพิจารณาค่าความทนแรงดึงจากจุดความเค้นสูงสุดบนกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) และค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาดพิจารณาจากระยะทางการดึงแผ่นฟิล์มเริ่มต้นจนกระทั่งถึงขณะที่ฟิล์มมีรอยแตก ทำการวิเคราะห์ผลของตัวอย่างที่นำมาทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

##### 3.3.6.2 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำวิเคราะห์ด้วยวิธี Desiccant method ตาม ASTM-E96 (27) โดยนำตัวอย่างฟิล์มแบ่งที่มีความหนาใกล้เคียงกันตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร แล้วปรับสภาวะฟิล์มในตู้ดูดความชื้นที่มีซิลิกาเจล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแห้งแล้วซึ่งมีร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0 บรรจุลงในจานเพาะเชื้อ แล้วนำตัวอย่างฟิล์มแบ่งปิดปากจานเพาะเชื้อ ผนึกขอบปากจานด้วยซีลพาราฟินโดยไม่ให้มีรอยรั่ว จากนั้นชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดแล้วนำไปวางไว้ในโถดูดความชื้น การถ่ายโอนไอน้ำวิเคราะห์โดยพิจารณาจากการเพิ่มมวลของระบบโดยการชั่งน้ำหนักฟิล์มทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน แล้วคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำตามสมการที่อธิบายไว้ใน ASTM E96

$$\text{ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{Wx}{tAP_0(RH_1 - RH_2)} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W/t$  = ค่าความชื้นจากกราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา (กรัมต่อชั่วโมง)

$x$  = ความหนาของฟิล์ม (มิลลิเมตร)

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของฟิล์ม (ตารางเซนติเมตร)

$P_0$  = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่ 25 องศาเซลเซียส (3.169 กิโลปาสกาล)

$RH_1 - RH_2$  = ความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.6.3 ระดับการบวมน้ำและความสามารถในการละลายของฟิล์ม

ระดับการบวมน้ำและความสามารถในการละลายของฟิล์มวิเคราะห์ตามวิธีที่อธิบายโดย Pauli และคณะ กับ Yoon (1, 28) โดยนำตัวอย่างฟิล์มพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตร ปรับสภาพในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ระดับการบวมน้ำทดสอบโดยการนำฟิล์มแช่ในน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นใช้คีมคีบออกมาวางในจานเพาะเชื้อและซับน้ำส่วนเกินออกด้วยกระดาษซับน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักฟิล์มที่ผ่านการแช่น้ำอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจากตัวฟิล์ม โดยที่ระดับการบวมน้ำของฟิล์มคำนวณตามสมการที่ (3.5)

$$\text{ระดับการบวมน้ำของฟิล์ม} = \frac{W_e - W_0}{W_e} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $W_0$  = น้ำหนักของฟิล์มแห้งเริ่มต้น (กรัม)

$W_e$  = น้ำหนักของฟิล์มหลังผ่านการแช่ในน้ำกลั่น (กรัม)

ความสามารถในการละลายของฟิล์มทำได้โดยนำฟิล์มแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร บั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตะกอนฟิล์มผ่านกระดาษกรองที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำกระดาษกรองที่มีตะกอนฟิล์มอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักฟิล์มแห้งอีกครั้ง ความสามารถในการละลายของฟิล์มคำนวณเป็นร้อยละของมวลสัมพัทธ์ที่ละลายน้ำเทียบกับมวลเริ่มต้นตามสมการที่ (3.6)

$$\text{ร้อยละความสามารถในการละลายของฟิล์ม} = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $W_d$  = น้ำหนักของฟิล์มแห้งหลังผ่านการแช่ในน้ำกลั่น (กรัม)

ทำการวิเคราะห์ระดับการบวมน้ำ ความสามารถในการละลายและการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มซ้ำ 3 ครั้ง

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเพื่อพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง รวมไปถึงการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานในด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารได้อธิบายไว้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 4.1 ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวแสดงในรูปที่ 13 โดยการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลจะเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการออกซิเดชัน หมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสในเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะถูกออกซิไดส์ครั้งแรกเป็นกลุ่มคาร์บอนิล หลังจากนั้นกลุ่มคาร์บอนิลจะถูกออกซิไดส์อีกครั้งเป็นกลุ่มคาร์บอกซิล (17) ดังนั้นการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการออกซิเดชัน โดยที่การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลบ่งชี้ถึงการออกซิเดชันในระดับต่ำและการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลบ่งชี้ถึงการออกซิเดชันในระดับที่รุนแรงขึ้น (28) จากรูปที่ 13 (ก) แสดงปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ก่อตัวขึ้นเมื่อผ่านการออกซิเดชันที่เวลาและความถี่ของพลาสมาต่าง ๆ กัน ผลการทดลองพบว่าที่เวลาในการออกซิเดชันด้วยพลาสมาแตกต่างกัน ความถี่ของพลาสมาเท่ากัน และไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพบว่าที่ความถี่ของพลาสมา 20 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาในการออกซิเดชัน 30 นาที และ 60 นาที ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจาก 120 ถึง 240 นาที ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่เวลา 240 นาที ปริมาณกลุ่มคาร์บอนิลมีค่า 0.69 ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส และเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจนกระทั่ง 300 นาที ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน 240 นาที เมื่อใช้ความถี่ของพลาสมา

25 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน 30 ถึง 240 นาที พบว่าปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่เวลา 240 นาที ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่า 1.02 ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส ทั้งนี้เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันเป็น 300 นาที ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกันเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน 240 นาที และเมื่อใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน 30 ถึง 180 นาที มีปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันเป็น 240 นาที พบว่าปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแปรงมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 180 นาที อย่างไรก็ตามที่ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่าสูงสุดเมื่อใช้เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที โดยมีค่า 0.68 ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของพลาสมา พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาส่งผลให้ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลบนแปรงมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามที่เวลาในการออกซิเดชัน 30 ถึง 120 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาสังเกตได้ว่าไม่มีผลต่อปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลมากนัก โดยปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชันตั้งแต่ 180 ถึง 300 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลในแปรงมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ากลุ่มคาร์บอนิลในแปรงมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงกว่าแปรงมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที ปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิลในแปรงมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณสูงกว่าในแปรงมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึง 4.5 เท่า แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจาก 30 นาที จนกระทั่ง 300 นาที

รูปที่ 13 (ข) แสดงถึงปริมาณของกลุ่มคาร์บอกซิลในแปรงมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันที่เวลาและความถี่ต่าง ๆ กัน ปริมาณของกลุ่มคาร์บอกซิลมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับปริมาณของกลุ่มคาร์บอนิล กล่าวคือเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันหรือเพิ่มความถี่ของพลาสมาปริมาณของกลุ่มคาร์บอกซิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันมีผลต่อการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลมากกว่าการเพิ่มความถี่ของพลาสมา และเมื่อ

เปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดลองพบว่า การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยกลุ่มคาร์บอกซิลมีค่าสูงสุดที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที สูงถึง 0.17 ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส ซึ่งที่เวลาเดียวกันนี้ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลบนแป้งมันสำปะหลังที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมีค่ามากกว่าไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึง 2.6 เท่า

การเพิ่มขึ้นของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลเมื่อเวลาและความถี่ที่ใช้ในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เกี่ยวข้องกับปริมาณการก่อตัวของอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นอนุมูลที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารละลายและไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ที่อยู่รอบข้างทันทีที่ก่อตัวขึ้นมา โดยอนุมูลไฮดรอกซิลถูกจัดเป็นสารออกซิไดซ์แรงสูง (Reactive oxygen species; ROS) ที่มีความว่องไวสูงสุด (29) การก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมา ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลออกซิเจน (Oxygen radical;  $\text{O}^\bullet$ ) กับน้ำในระบบเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลดังแสดงในสมการที่ 4.1 (15)



เพื่อศึกษาปริมาณการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน จึงได้ทำการทดลองตรวจวัดค่าปริมาณการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่สภาวะในการออกซิเดชันต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันส่งผลให้ปริมาณการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลออกซิเจนกับน้ำเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ระดับการออกซิเดชันบนเม็ดแป้งมันสำปะหลังจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น

ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมา ระดับการออกซิเดชันจะสูงขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเพิ่มความถี่ของพลาสมาเป็นการเพิ่มพลังงานในระบบซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเร่งการชนกันของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดการการไอออไนเซชัน (Ionization) และเกิดการแยกตัวของโมเลกุล (Dissociation) ภายในระบบ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 ถึง 4.5 (30) ดังนั้นที่เวลาเดียวกันเมื่อใช้ความถี่ของพลาสมาที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น



Ionization:



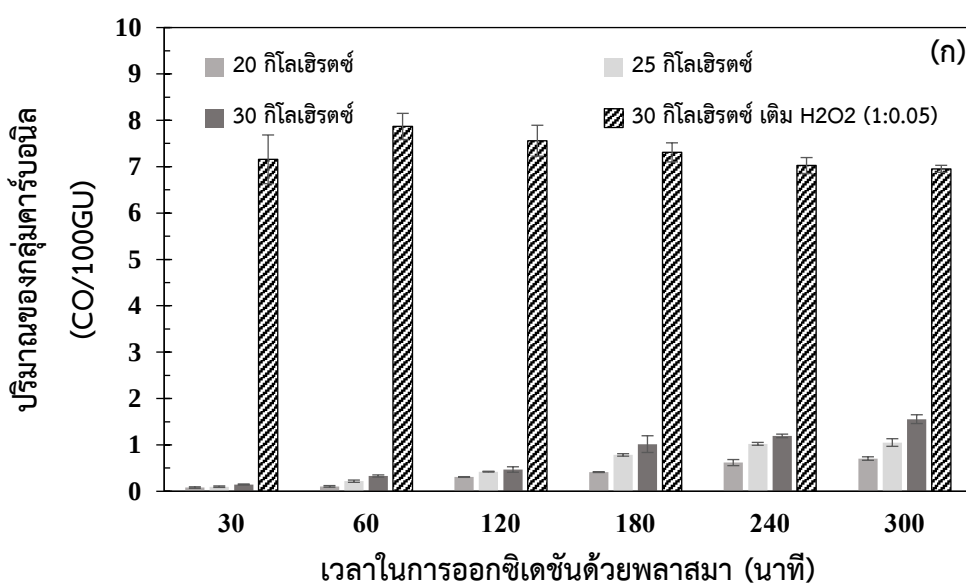
Dissociation:



การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการพลาสมาส่งผลต่อการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลในระดับที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน จากรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Baroch และคณะ (15) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแตกตัวของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulsed) พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับการยอมรับว่าเป็นสปีชีส์ที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes; AOPs) เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลดังแสดงในสมการที่ 4.6 นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Tolvanen และคณะ (31) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การเกิดออกซิเดชันของแป้งโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซ์ได้ระบุถึงปฏิกิริยาที่เกี่ยวกับการออกซิเดชันแป้งโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ว่าในระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และอนุมูลไฮดรอกซิล อีกทั้งเมื่อปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์เกิดรุนแรงขึ้นจะสามารถนำไปสู่การรวมตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกครั้งได้ดังสมการ 4.7 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติโดยสลายตัวเป็นแก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) กับน้ำดังสมการที่ 4.8 อย่างไรก็ตามการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลบนวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการนำไปงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหารหรือจำเป็นต้องสัมผัสกับอาหารจะต้องควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 1 ต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส (13)

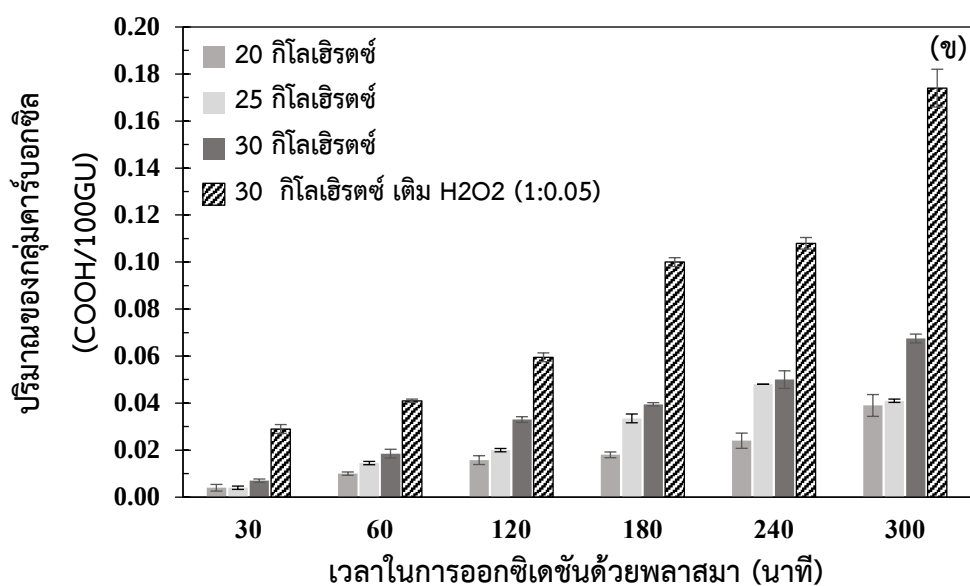


กลไกการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลในแป้งออกซิไดซ์แสดงในรูปที่ 15 โดยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวจะส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันที่บริเวณพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน อะตอมไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดการให้อิเล็กตรอนแก่หมู่อนุมูลไฮดรอกซิลที่ก่อตัวขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมา ส่งผลให้พันธะที่เกิดการให้อิเล็กตรอนเกิดการจับกับหมู่อนุมูลออกซิเจนเพื่อสร้างความเสถียรเกิดเป็นพันธะคู่ที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงหมู่คาร์บอนิลที่ก่อตัวขึ้นดังแสดงในสมการที่ 1 ถึง 4 ในรูปที่ 15 เมื่อการออกซิเดชันรุนแรงขึ้นสายโซ่บริเวณดังกล่าวจะถูกทำลายและจับกับหมู่อนุมูลไฮดรอกซิลที่ก่อตัวขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมา ส่งผลให้หมู่คาร์บอนิลถูกออกซิไดซ์อีกครั้งเป็นกลุ่มคาร์บอกซิลดังแสดงสมการที่ 4 ถึง 6 ในรูปที่ 15 (32) นอกจากนี้การออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมายังส่งผลให้เกิดการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิกก่อให้เกิดเป็นกลุ่มคาร์บอนิลและส่งผลให้พันธะที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวของพอลิเมอร์ในโครงสร้างแป้งสั่นลง ดังแสดงในสมการที่ 6 ถึง 8 ในรูปที่ 15 (30)

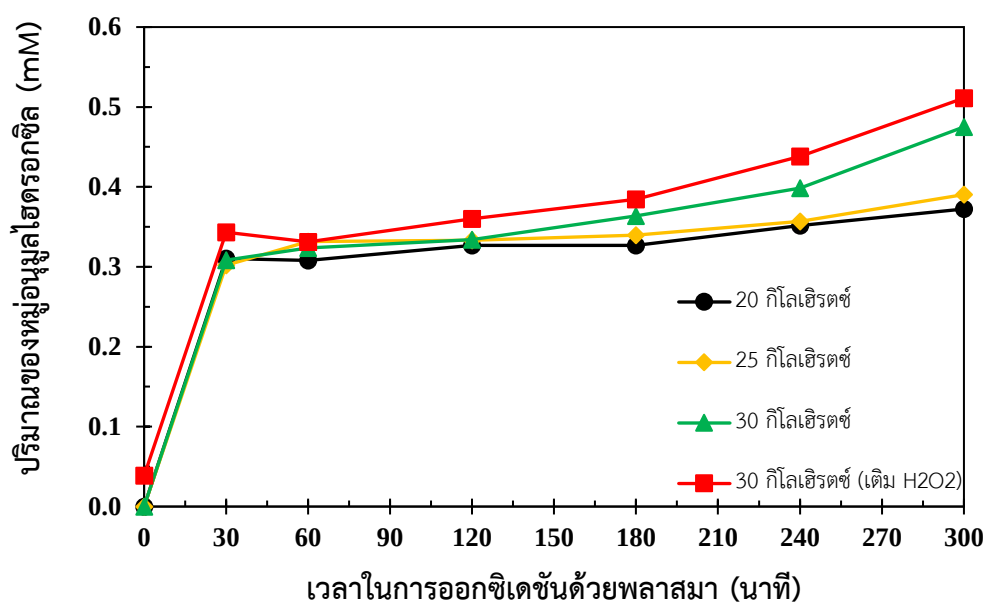


รูปที่ 13 ปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

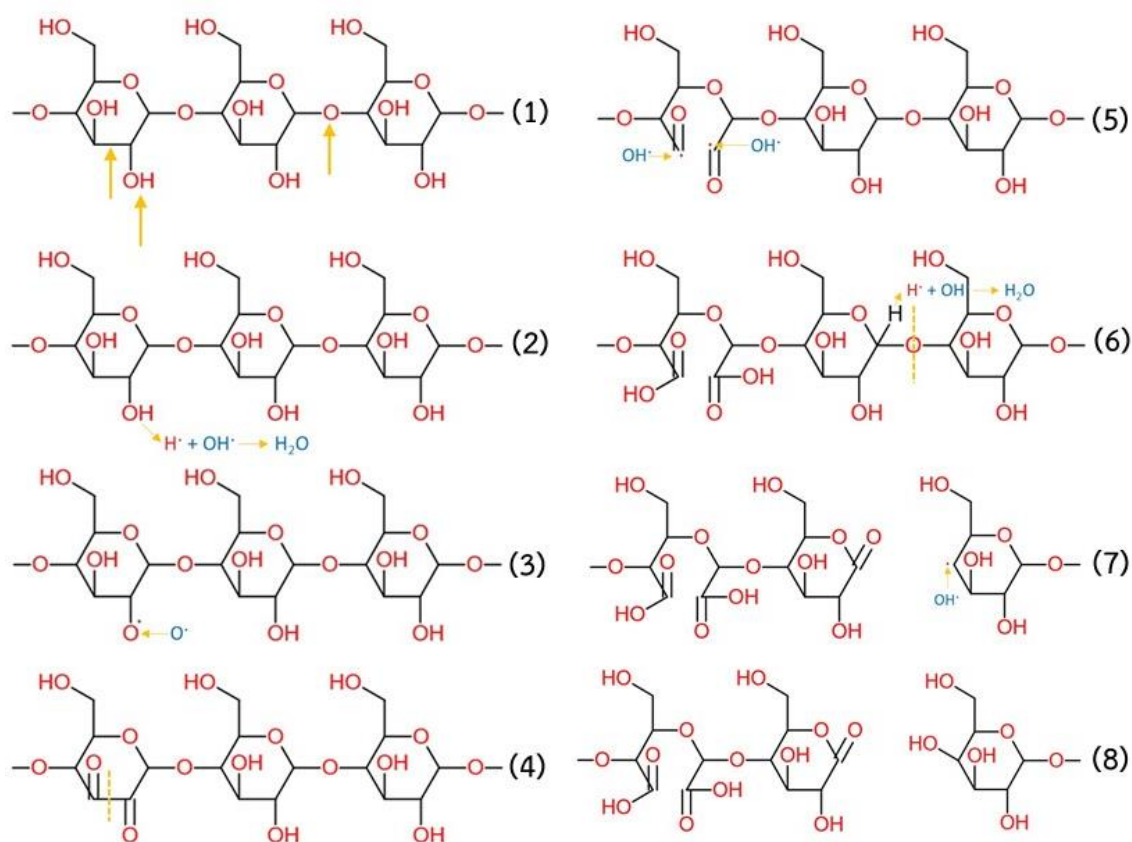
(ก) ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิล (ข) ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิล



รูปที่ 13 (ต่อ) ปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันใหม่ที่ก่อตัวในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว  
(ก) ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิล (ข) ปริมาณการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิล



รูปที่ 14 ปริมาณการก่อตัวของหมู่คาร์บอกซิลระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว



รูปที่ 15 กลไกการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลในโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

#### 4.2 ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

แป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) (7) โดยส่วนของโครงสร้างบริเวณที่เป็นผลึกจะประกอบไปด้วย อะไมโลเพคตินเป็นหลักและโครงสร้างบริเวณที่เป็นอสัณฐานจะประกอบด้วยอะไมโลสเป็นหลัก รูปที่ 16 แสดงถึงปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว การลดลงของอะไมโลสหลังจากการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะบ่งชี้ถึงการดีพอลิเมอร์ไรเซชันบนเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ มักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีอะไมโลสเป็นส่วนประกอบ (3) การดีพอลิเมอร์ไรเซชันจะส่งผลให้พันธะของสายโซ่อะไมโลสลดลง โดยเมื่อสายโซ่ของอะไมโลสถูกดีพอลิเมอร์ไรเซชันจนกระทั่งความยาวของสายโซ่น้อยกว่า 100 หน่วยกลูโคส การตรวจวัดปริมาณของอะไมโลสด้วยการใช้ไอโอดีนจะไม่สามารถทำ

ให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่อกัน (33) จึงส่งผลให้ปริมาณของอะไมโลสในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ลดลง จากผลการทดลองวัดปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการ ออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลวโดยเปรียบเทียบผลของการเพิ่มเวลาในการ ออกซิเดชันพบว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ การเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันไม่ส่งผลทำให้อะไมโลสลด ลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะเห็นได้จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันด้วยพลาสมามี ปริมาณอะไมโลสร้อยละ  $29.04 \pm 0.20$  เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลัง 30 ถึง 240 นาที ปริมาณอะไมโลสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการ ออกซิเดชันเป็น 300 นาที ปริมาณของอะไมโลสลดลงเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ  $25.72 \pm 0.42$  เมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาเป็น 25 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าเวลาในการออกซิเดชัน 30 ถึง 180 นาที การลดลงของปริมาณอะไมโลสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันด้วยพลาสมา จนกระทั่งเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันเป็น 240 นาที ปริมาณของอะไมโลสเริ่มมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีร้อยละปริมาณของอะไมโลส เท่ากับ  $24.72 \pm 0.31$  แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจนกระทั่ง 300 นาที ปริมาณ ของอะไมโลสไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาจนกระทั่ง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันด้วยพลาสมามีค่าร้อยละ  $29.04 \pm 0.20$  เมื่อออกซิเดชันด้วยพลาสมา 30 ถึง 120 นาที ปริมาณอะไมโลสในแป้งออกซิไดซ์มี แนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดและลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที พบว่าอะไมโลสถูกดีพอลิเมอร์ไรเซชันจนกระทั่งมีค่าอะไมโลสเท่ากับร้อยละ  $19.98 \pm 0.92$

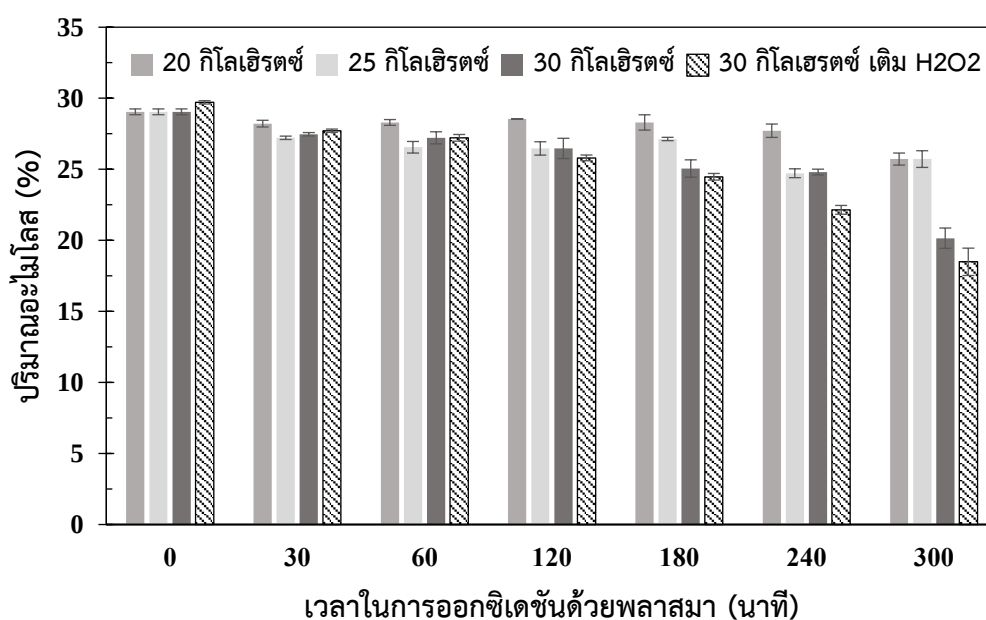
เมื่อสังเกตกราฟการลดลงของอะไมโลสจากรูปที่ 16 จะพบว่าการเพิ่มความถี่ของพลาสมาจะ เห็นความแตกต่างของปริมาณอะไมโลสได้อย่างชัดเจนที่เวลาในการออกซิเดชันตั้งแต่ 180 นาที โดยที่ ความถี่ของพลาสมา 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะส่งผลต่อการดีพอลิเมอร์ไรเซชันอะไมโลสบนแป้งมันสำปะหลัง ออกซิไดซ์ต่ำสุด และเมื่อเพิ่มความถี่ในการออกซิเดชันเป็น 25 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะส่งผลมากขึ้น ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของการลดลงของปริมาณอะไมโลสที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที จะพบว่าที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีการลดลงของปริมาณอะไมโลสที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับ ความถี่ที่ 20 และ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยปริมาณอะไมโลสที่เวลา 300 นาที ความถี่ 20 25 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับร้อยละ  $25.72 \pm 0.42$   $25.72 \pm 0.59$  และ  $19.98 \pm 0.92$  ตามลำดับ ผล ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความถี่ของพลาสมามีส่งผลต่อความสามารถในการดีพอลิเมอร์ไรเซชันที่รุนแรง ขึ้น โดยเฉพาะที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์



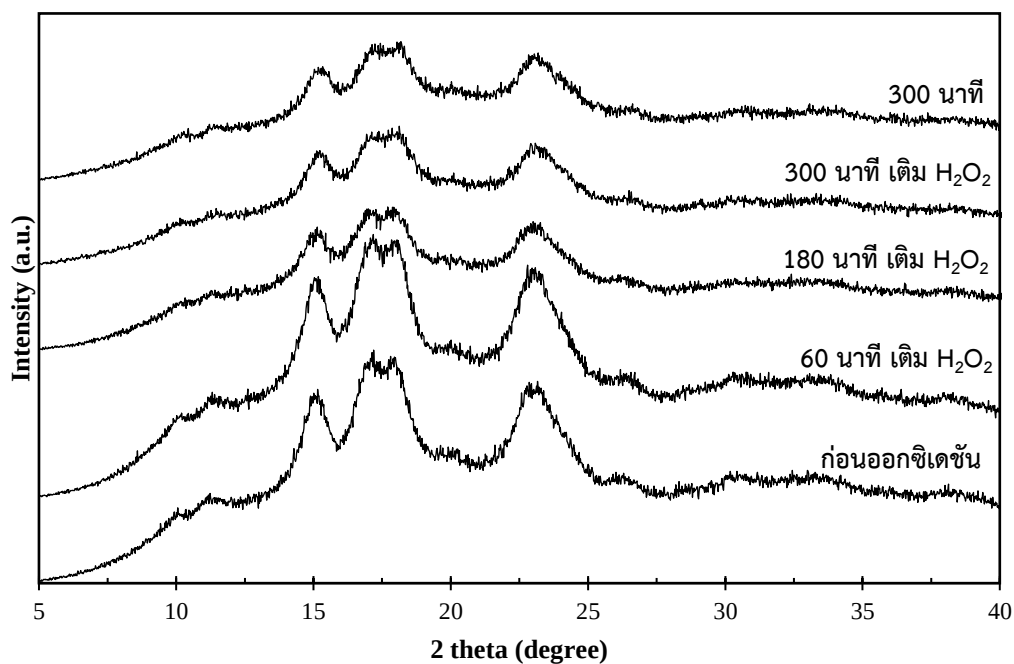
เมื่อทำการทดลองวัดปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการพลาสมาและเปรียบเทียบผลกับปริมาณอะไมโลสในแป้งออกซิไดซ์ที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่าที่เวลาในการออกซิเดชันตั้งแต่ 120 นาที ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกดีพอลิเมอร์เชชันไปมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจนกระทั่งที่เวลา 300 นาที ปริมาณของอะไมโลสลดลงเหลือร้อยละ  $18.49 \pm 0.96$  ซึ่งปริมาณของอะไมโลสถูกดีพอลิเมอร์เชชันไปมากกว่าถึง 1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาเดียวกัน ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะส่งเสริมให้เกิดการดีพอลิเมอร์เชชันอะไมโลสที่รุนแรงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการพลาสมาจะส่งผลต่อการก่อตัวของหมู่อนุมูลไฮดรอกซิลเนื่องจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการที่ 4.6 ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันหมู่อนุมูลดังกล่าวจะก่อตัวมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการดีพอลิเมอร์เชชันบนเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น

เพื่อยืนยันผลกระทบของสภาวะต่าง ๆ ในการออกซิเดชันที่ส่งผลต่อการดีพอลิเมอร์เชชันอะไมโลสบนเม็ดแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันจึงได้ทำการตรวจวัดโครงสร้างของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง โดยเลือกบางสภาวะเพื่อศึกษาผลกระทบของการออกซิเดชันที่มีผลต่อโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (รูปที่ 17) ผลการวิเคราะห์พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันจะแสดงส่วนที่เป็นผลึกที่พิคตำแหน่ง 15 องศา 17 องศา 18 องศา และ 23 องศา เมื่อผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมา วัฏภาคของเหลวที่มีความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาในการออกซิเดชัน 180 ถึง 300 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการพลาสมา และไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลา 300 นาที พบว่าพิคของกราฟลดต่ำลง แสดงให้เห็นถึงการออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและส่งผลกระทบต่อการดีพอลิเมอร์เชชันทั้งบริเวณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน จึงทำให้ทั้งส่วนโครงสร้างที่เป็นผลึกและอสัณฐานของพอลิเมอร์แป้งถูกทำลายไปอย่างสิ้นเชิง เมื่อทำการคำนวณร้อยละของบริเวณที่เป็นผลึก (%Crystallinity) ของแป้งมันสำปะหลังทั้งก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันโดยใช้โปรแกรม BRUKER's Diffrac.eva (version 5.0) ผลดังตารางที่ 5 พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันโดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชัน มีร้อยละ

ของโครงสร้างผลึกลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมีร้อยละความเป็นผลึกน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลวส่งผลกระทบท่อการดีพอลิเมอไรเซชันทั้งบริเวณที่ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน และการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะส่งเสริมให้เกิดการออกซิเดชันที่รุนแรงขึ้น ทำให้เกิดการดีพอลิเมอไรเซชันทั้งส่วนที่ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน



รูปที่ 16 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยพลาสมาวิญญากาศของเหลว



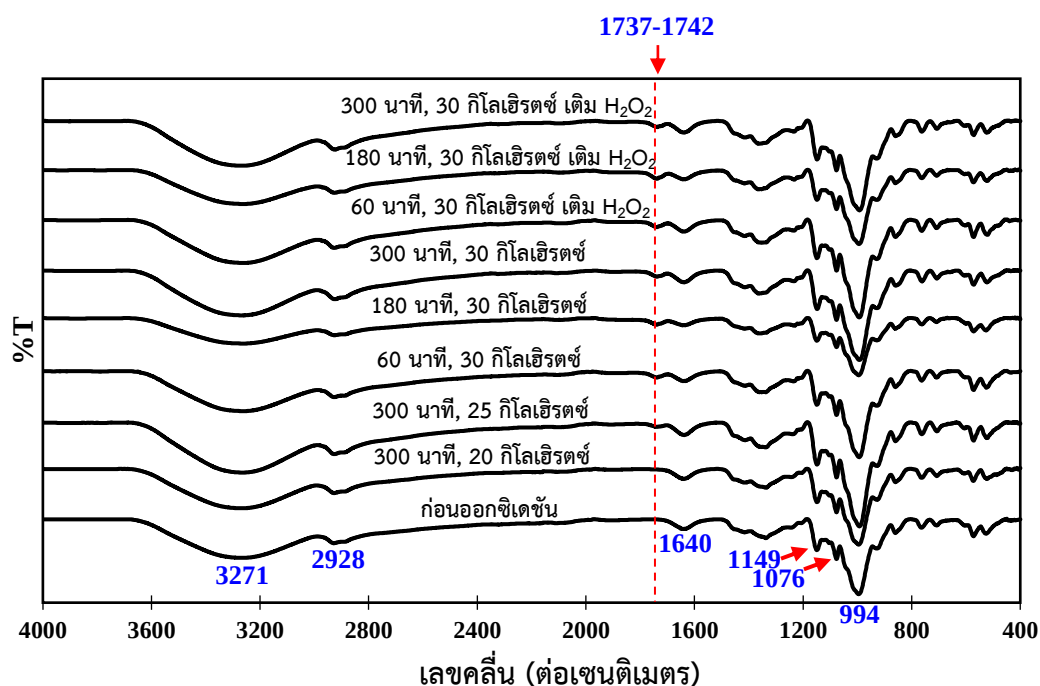
รูปที่ 17 X-ray diffractograms ของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันด้วย  
กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

ตารางที่ 5 ร้อยละบริเวณที่เป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันด้วย  
กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

| เวลาในการออกซิเดชัน<br>(นาที) | เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ | บริเวณที่เป็นผลึก<br>(%) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 นาที                        | ×                        | 34.3                     |
| 60 นาที                       | ✓                        | 37.6                     |
| 180 นาที                      | ✓                        | 21.2                     |
| 300 นาที                      | ✓                        | 20.5                     |
| 300 นาที                      | ×                        | 27.8                     |

### 4.3 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน เพื่อยืนยันผลการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลที่ก่อตัวขึ้นบนแป้งมันสำปะหลังที่ออกซิไดซ์ จากรูปที่ 18 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังก่อนการออกซิเดชัน แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน และแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันโดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่เวลา 0 ถึง 300 นาที ความถี่ 20 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 0 ถึง 300 นาที จากผลการทดลองที่ได้พบว่าโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันแสดงพีกตำแหน่ง 3,271 และ 2,928 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะที่มีการสั่นยืด (Stretching) ที่เชื่อมระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนและคาร์บอนกับไฮโดรเจน (O—H และ C—H) (34) พีกตำแหน่ง 1,640 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะที่มีการสั่นแบบงอ (Bending) ของน้ำที่เชื่อมระหว่าง O—H (35) พีกที่ตำแหน่ง 1,149 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะการเชื่อมโยงไกลโคซิดิก (C—O—C) ระหว่างมอนอเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังที่มีการสั่นแบบสมมาตร (Symmetric stretching) (36) และพีกที่ตำแหน่ง 1,076 และ 994 ต่อเซนติเมตร ยังแสดงถึงพันธะเชื่อมโยงระหว่างคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน (C—O—H) พันธะที่มีการสั่นแบบยืดที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C—O) (37) หลังจากผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวพบว่า พีกที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน และนอกจากนี้ยังพบพีกที่สำคัญที่อาจแสดงถึงการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลหรือกลุ่มคาร์บอกซิลที่เกิดจากการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาที่ตำแหน่งระหว่าง 1,737 ถึง 1,742 ต่อเซนติเมตร โดยสามารถสังเกตพีกเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที และใช้ความถี่ของพลาสมาตั้งแต่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Prachayawarakorn และ Tamseekhram (34) ที่ได้ดัดแปรฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการดัดแปรทางเคมีพบว่าพบพีกที่สำคัญที่ตำแหน่ง 1,737 ถึง 1,742 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะคู่ที่มีการสั่นแบบยืดที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C=O) จากการทดลองนี้จึงสันนิษฐานพันธะคู่ดังกล่าวที่ก่อตัวขึ้นเป็นส่วนประกอบของของคาร์บอนิลหรือกลุ่มคาร์บอกซิลที่เกิดจากการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว



รูปที่ 18 FT-IR Absorption band ของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วย กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสร้างด้วยเทคนิค FT-IR

#### 4.4 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชัน พบว่าคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ได้มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีระดับการออกซิเดชันที่สูงอย่างเห็นได้ชัด จึงได้ทำการเลือกแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาศึกษาขึ้นรูปและศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มแป้งออกซิไดซ์ และเพื่อศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของเวลาในการออกซิเดชันต่อคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจึงได้ทำการเลือกแป้งออกซิไดซ์ที่เวลา 0 60 180 และ 300 นาที ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงทำการเลือกแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่ความถี่ของพลาสมาที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 300 นาที เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่เวลาต่ำกว่า 300 นาที ความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ รวมทั้งแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่ความถี่พลาสมา 20 และ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลาต่าง ๆ จะมีระดับการออกซิเดชันที่ต่ำ จึงได้ทำการเลือกแป้งมันสำปะหลังที่สภาวะดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแป้งออกซิไดซ์และศึกษาเปรียบเทียบผลคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มต่อไป

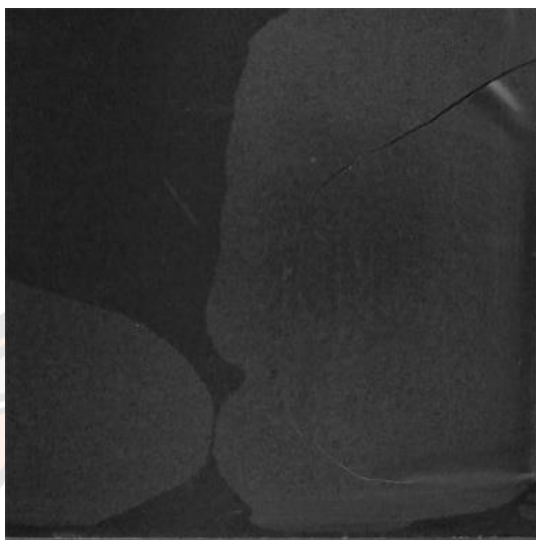


การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันโดยใช้กระบวนการพลาสมา วัฏภาคของเหลว พบว่ากลีเซอรอลที่ถูกเลือกใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) มีผลต่อการเกาะตัวเป็นแผ่นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมกลีเซอรอลมีลักษณะพื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน ยึดเกาะกับฐานหล่ออะคลิลิกได้เป็นอย่างดี และสามารถนำออกจากฐานหล่ออะคลิลิกได้ง่าย ในทางกลับกันฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีลักษณะเปราะและแตกจากบริเวณขอบเข้ามาบริเวณพื้นที่กลางฟิล์ม พื้นผิวไม่เรียบ และไม่สามารถนำออกจากฐานหล่อได้ เนื่องจากฟิล์มมีลักษณะเปราะและแข็งจึงทำให้แตกในระหว่างนำออกจากฐานหล่อฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 19 การเติมกลีเซอรอลจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ในเมทริกซ์ฟิล์มเนื่องจากเกิดการแข่งขันกันเพื่อจับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้สายโซ่ พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่และทำให้เมทริกซ์ฟิล์มเกิดช่องว่าง ดังนั้นจึงทำให้แผ่นฟิล์มสามารถยืดตัวได้สูง (38) เมื่อนำฟิล์มไปอบด้วยความร้อนจึงลดการหดตัวของแผ่นฟิล์มเนื่องจากการระเหยของตัวทำละลาย

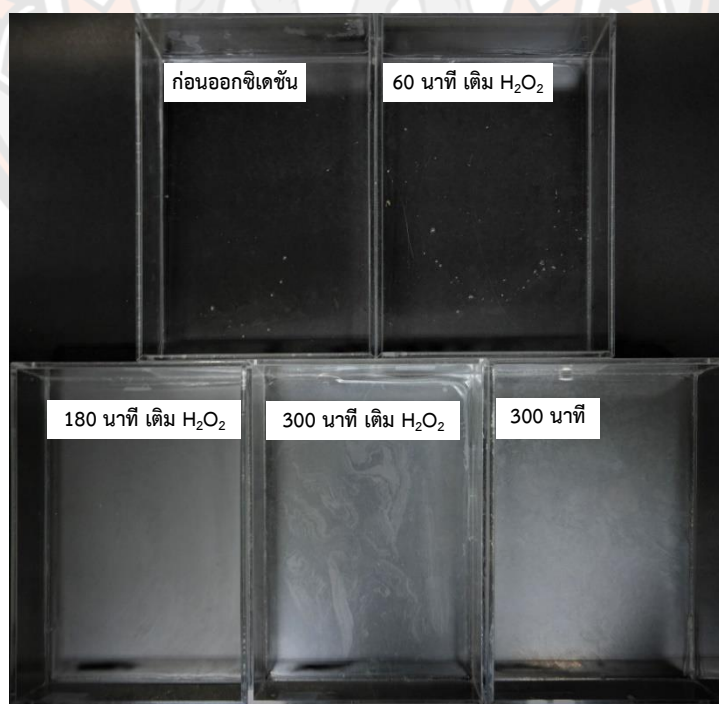
ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลก่อนการขึ้นรูป พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันที่ใช้เวลาออกซิเดชัน 60 นาที มีลักษณะโปร่งใส สะท้อนแสง พื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 180 นาที และ 300 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที มีลักษณะขุ่น แต่อย่างไรก็ตามยังมีพื้นผิวที่เรียบเนียนและเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 20 เหตุผลข้อนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าการดีพอลิเมอร์ไรเซชันที่สูงขึ้นจากการเพิ่มเวลาในการออกซิเดชัน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่แบบใหม่ในเม็ดแป้ง ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน การกระจายตัวของแสงในฟิล์มแป้งที่สภาวะต่าง ๆ จึงแตกต่างกันไป (39)

อย่างไรก็ตามการเติมกลีเซอรอลจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของฟิล์มมันสำปะหลัง โดยเฉพาะสมบัติการละลายน้ำและสมบัติการบวมน้ำ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่มีความเข้ากันได้ดีกับน้ำ (40) ดังนั้นน้ำหนักของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการทดลองค่า ความสามารถในการละลายและความสามารถในการบวมน้ำอาจจะมีผลกระทบจากการละลายน้ำของกลีเซอรอลร่วมด้วย นอกจากนี้การเติมกลีเซอรอลยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของฟิล์มโดยตรง เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ในพอลิเมอร์แป้ง ดังนั้นปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปจึงมีผลต่อการปรับปรุง

คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งผลกระทบของการเติมกลีเซอรอลได้อธิบายในหัวข้อ 4.6 ถึง 4.8



รูปที่ 19 พื้นผิวของฟิล์มที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล

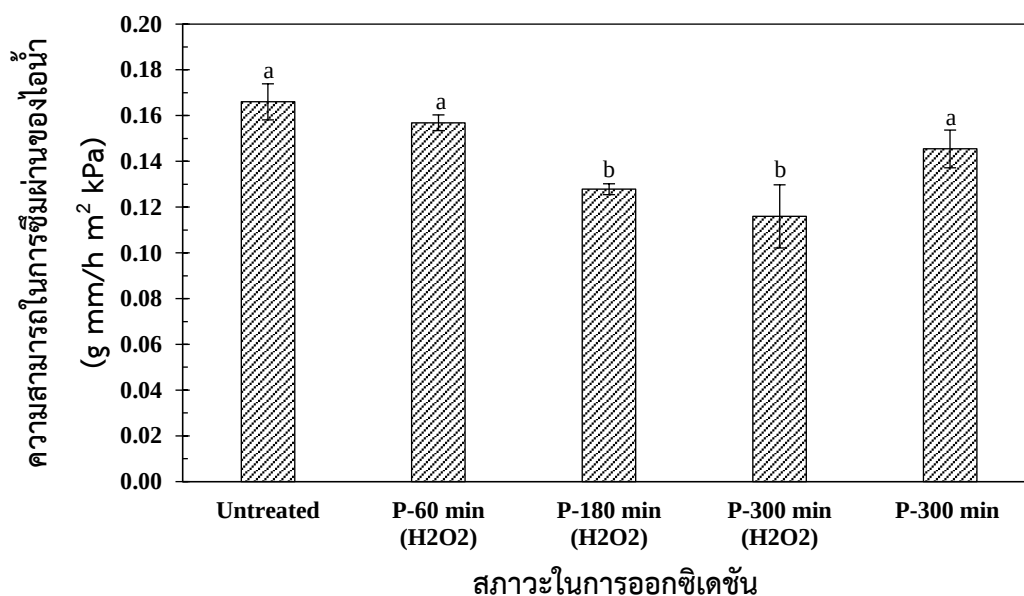


รูปที่ 20 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่สภาวะต่าง ๆ

#### 4.5 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเป็นตัวชี้วัดถึงความง่ายในการถ่ายโอนความชื้นผ่านแผ่นฟิล์ม (3) โดยปกติฟิล์มที่ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารจะต้องมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำน้อยสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อลดการอัตรากายโอนความชื้นระหว่างอาหารสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสียก่อนกำหนด (2) จากรูปที่ 21 แสดงถึงค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมา วัฏภาคของเหลวที่ความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยเปรียบเทียบเวลาในการออกซิเดชันและผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน ผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ  $0.17 \pm 0.008 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$  เมื่อนำตัวอย่างฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวเป็นเวลา 300 นาที มาทดสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำพบว่ามีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ  $0.16 \pm 0.003 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$  ซึ่งค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 300 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 60 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ  $0.15 \pm 0.008 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$  อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำที่เวลาในการออกซิเดชัน 60 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยพลาสมาโดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 300 นาที เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังเป็น 180 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ก่อนการออกซิเดชันพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มมีค่า  $0.13 \pm 0.002 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$  ซึ่งค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมถึงการเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำตัวอย่างฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสถานะที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 180 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตามที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วว่า แป้งถูกระบุว่าเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกซึ่งประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเป็นหลักและโครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งประกอบด้วยอะไมโลสเป็นหลัก ในงานวิจัยของ Luchese และคณะ (2) ได้กล่าวถึงความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มมักจะเกิดในส่วนของโครงสร้างที่บริเวณเป็นอสัณฐาน (41) ซึ่งบริเวณอสัณฐานเป็นส่วนที่ง่ายต่อการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน การดีพอลิเมอร์ไรเซชันส่งผลให้สายโซ่ของอะไมโลสสั้นลงพร้อมกับการลดขนาดของโมเลกุล จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่ส่งผลให้ไอน้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมทริกซ์ฟิล์มได้ง่ายขึ้น (42, 43) จากผลการทดลองนี้พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน 300 นาที่ และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน 60 นาที่ โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูง และเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 180 และ 300 นาที่ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังดังรูปที่ 16 โดยแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีปริมาณอะไมโลสที่สูงและเมื่อเพิ่มสถานะต่าง ๆ ในการออกซิเดชันปริมาณของอะไมโลสลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที่ พบว่ามีค่าต่ำกว่าปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาในการออกซิเดชัน 60 นาที่ และ 180 นาที่ ในทางกลับกันค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำกลับมีค่าที่สูงกว่า ซึ่งผลดังกล่าวอาจสันนิษฐานได้ว่าถึงแม้ปริมาณของอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 300 นาที่ จะต่ำกว่า แต่การใช้เวลาในการออกซิเดชันที่นานกว่าจะส่งผลให้สายโซ่อะไมโลเพคตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของส่วนที่เป็นผลึกของโครงสร้างเม็ดแป้งสั้นลง จึงเป็นผลให้มีช่องว่างในการซึมผ่านของไอน้ำที่มากขึ้น



รูปที่ 21 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาอุณหภูมิของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และเปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (a และ b แสดงการเปรียบเทียบนัยสำคัญ  $P < 0.05$  ช่วงความเชื่อมั่น 95%)

\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงถึงการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

\*\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงถึงการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

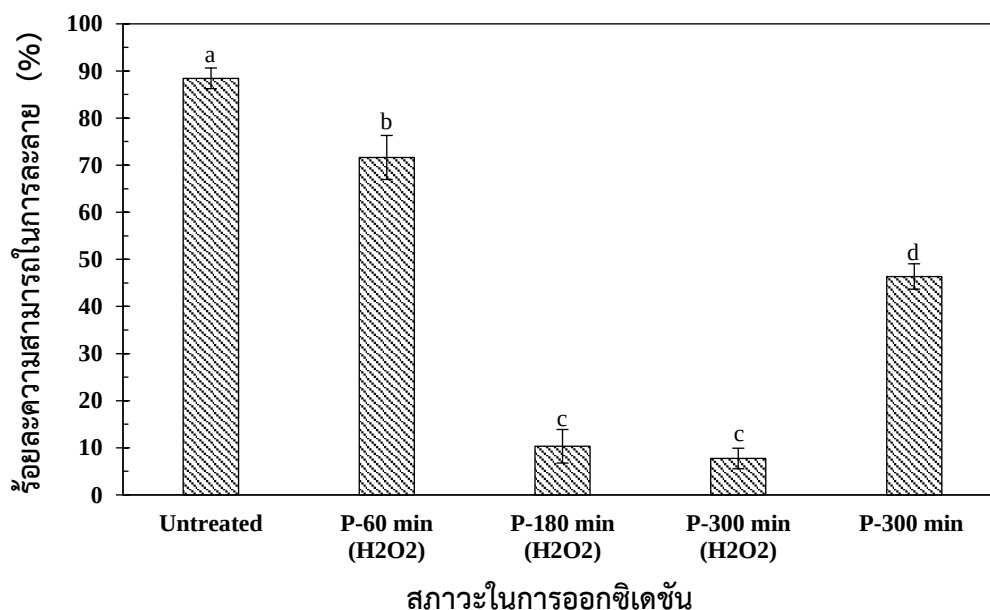
#### 4.6 ความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะใช้พิจารณาถึงความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร เช่นฟิล์มที่มีความสามารถในการละลายสูงเหมาะกับบรรจุภัณฑ์อาหารที่ปรุงแล้วและใช้เวลาในการห่อหุ้มอาหารไม่นานนัก อีกทั้งฟิล์มที่มีความสามารถในการละลายที่สูงจะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและเร็ว ส่วนฟิล์มที่มีความสามารถในการละลายต่ำเหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารสดหรืออาหารที่มีความชื้นสูงและใช้เวลาในการห่อหุ้มอาหารเป็นเวลาหลายวัน (1) รูปที่ 22 แสดงร้อยละความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาอุณหภูมิของเหลวที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยเปรียบเทียบเวลาในการออกซิเดชันและผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน ผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าร้อยละความสามารถในการละลายที่สูงโดยมีค่าเท่ากับ  $88.44 \pm 2.20$  เมื่อเพิ่มเวลาใน



การออกซิเดชันจนกระทั่ง 300 นาที พบว่าค่าร้อยละความสามารถในการละลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเท่ากับ  $46.37 \pm 2.70$  เมื่อพิจารณาผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่าที่เวลาในการออกซิเดชัน 60 นาที ค่าร้อยละความสามารถในการละลายมีค่าเท่ากับ  $71.63 \pm 4.67$  ซึ่งมีค่ามากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชันด้วยพลาสมาโดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันเป็น 180 นาที ค่าร้อยละความสามารถในการละลายมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยมีค่าเท่ากับ  $10.33 \pm 3.56$  อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจนกระทั่ง 300 นาที พบว่าค่าร้อยละความสามารถในการละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเวลาการออกซิเดชัน 180 นาที

Ghanbarzadeh และคณะ (44) ได้กล่าวถึงการลดลงของความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้ง ว่ากลุ่มคาร์บอกซิลที่ก่อตัวขึ้นในแป้งออกซิไดซ์จะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับกลุ่มไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง โดยจะเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลส่งผลให้การละลายน้ำของฟิล์มแป้งลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลดัง รูปที่ 14 (ข) ในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบวนการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว การละลายน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังส่วนหนึ่งเกิดจากการละลายของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มการเกาะตัวและการยืดหยุ่นของฟิล์มแป้ง ซึ่งโดยส่วนใหญ่สารเสริมสภาพพลาสติกจะมีความเข้ากันกับน้ำได้ดี (40) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กลีเซอรอลเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเข้ากันกับน้ำได้ดี ดังนั้นอัตราส่วนที่ละลายไปส่วนหนึ่งของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังอาจเกิดจากการละลายของกลีเซอรอล อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของกลีเซอรอลที่ถูกเติมเข้าไปก่อนการขึ้นรูปฟิล์มได้ใช้อัตราส่วนที่เท่ากันในทุกสภาวะการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นอัตราส่วนที่ละลายไปของกลีเซอรอลในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังแต่ละสภาวะจึงไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 22 ร้อยละความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชัน ด้วยกระบวนการพลาสมาอุณหภูมิของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์และ เปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(a b c และ d แสดงการเปรียบเทียบนัยสำคัญ  $P < 0.05$  ช่วงความเชื่อมั่น 95%)

\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงถึงการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

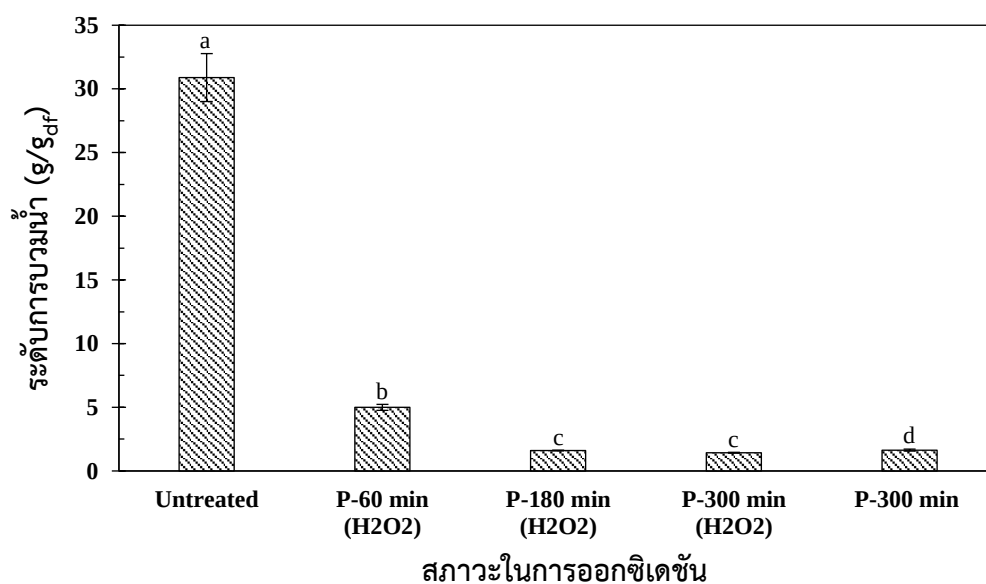
\*\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงถึงการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.7 ระดับการบวมน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 23 แสดงถึงระดับการบวมน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันที่ สภาวะต่าง ๆ ด้วยกระบวนการพลาสมาอุณหภูมิของเหลวที่ความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดย เปรียบเทียบเวลาในการออกซิเดชันและผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน ผลการทดลองพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าระดับการบวมน้ำค่อนข้างสูง โดยมีค่าเท่ากับ  $30.89 \pm 1.88$  กรัมต่อกรัมของฟิล์มแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งที่ใช้เวลาในการ ออกซิเดชัน 60 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมา พบว่ามีค่าลดลงถึง ประมาณ 6 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ  $4.99 \pm 1.88$  กรัมต่อกรัมของฟิล์มแห้ง และเมื่อเพิ่มเวลาในการ ออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนกระทั่ง 180 นาที พบว่าระดับการ บวมน้ำลดลงถึง  $1.61 \pm 0.03$  กรัมต่อกรัมของฟิล์มแห้ง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชัน แป้งมันสำปะหลังเป็น 300 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่าค่า

ระดับการบวมน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่เวลา 180 นาที่ ระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที่ มีค่าเท่ากับ  $1.64 \pm 0.08$  กรัมต่อกรัมของฟิล์มแห้ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลของฟิล์มแข็งที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 180 และ 300 นาที่ พบว่าแตกต่างกับเพียงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลของระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่สภาวะต่าง ๆ มีแนวโน้มเดียวกับผลของค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการละลายของฟิล์มแข็งมันสำปะหลัง ทั้งนี้ค่าระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังในแต่ละสภาวะอาจจะมีผลของการละลายของกลีเซอรอลในระหว่างการแช่น้ำ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของกลีเซอรอลที่ละลายออกไปคาดว่าจะไม่แตกต่างกันมากในแต่ละสภาวะ เนื่องจากปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมเข้าไปก่อนการเจลาตินในเซชันมีอัตราส่วนที่เท่ากัน จึงไม่ส่งผลมากนักต่อค่าความแตกต่างของระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังในแต่ละสภาวะ

ระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งบ่งชี้ถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำของฟิล์ม โดยระดับการบวมน้ำของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาศของเหลวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันแสดงให้เห็นว่าฟิล์มแข็งมีความไม่ชอบน้ำสูง (Hydrophobic) ซึ่งระหว่างการออกซิเดชันอาจเกิดจากการก่อตัวของกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น จึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มแข็งมีปฏิสัมพันธ์กับน้ำน้อยมาก (6) และเหตุผลที่กล่าวไปในหัวข้อ 4.1 เกี่ยวกับการออกซิเดชันที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิล ซึ่งจะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับกลุ่มไฮดรอกซิลภายในเม็ดแป้งมันสำปะหลังและปรับปรุงปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งส่งผลให้แป้งมีความชอบน้ำน้อยลง



รูปที่ 23 ระดับการบวมน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์และเปรียบเทียบผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(a b c และ d แสดงการเปรียบเทียบนัยสำคัญ  $P < 0.05$  ช่วงความเชื่อมั่น 95%)

\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงถึงการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

\*\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงถึงการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.8 สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์คุณสมบัติความทนแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดขาด แสดงดังรูปที่ 24 โดยแสดงสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดสอบค่าความทนแรงดึงพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวมีค่าความทนแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ  $0.41 \pm 0.06$  เมกะปาสคาล เมื่อนำฟิล์มแป้งที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยใช้เวลาในการออกซิเดชัน 60 นาที และมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมาตรวจวัดค่าความทนแรงดึงพบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนกระทั่ง 180 นาที

พบว่าค่าความทนแรงดึงของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ  $1.34 \pm 0.35$  เมกกะปาสคาล ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความทนแรงดึงของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่าค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่เวลาเดียวกันเมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ  $2.40 \pm 0.20$  เมกกะปาสคาล การเพิ่มขึ้นของค่าความทนแรงดึงเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน โดยการปรากฏตัวของกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันจะส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน พันธะเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างในเมทริกซ์ฟิล์มของพอลิเมอร์เกิดความสมบูรณ์และแข็งแรงจึงส่งผลให้พอลิเมอร์มีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น (45)

เมื่อทำการทดสอบค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ผลการทดลองพบว่าค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าความทนแรงดึง โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันจะมีค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดเท่ากับ  $240.67 \pm 19.94$  ซึ่งค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันจะมีค่าสูงกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว เมื่อนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 60 นาที มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมาทดสอบ พบว่าค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ  $138.33 \pm 36.35$  อย่างไรก็ตามเมื่อนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 180 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมาทดสอบ พบว่าค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 60 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันจนกระทั่ง 300 นาที ค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเท่ากับ  $51.40 \pm 16.00$  ความยืดหยุ่นของฟิล์มแป้งจะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของสายโซ่ในบริเวณอสัณฐานและความสามารถในการดูดซึมน้ำของเมทริกซ์ฟิล์ม (46)

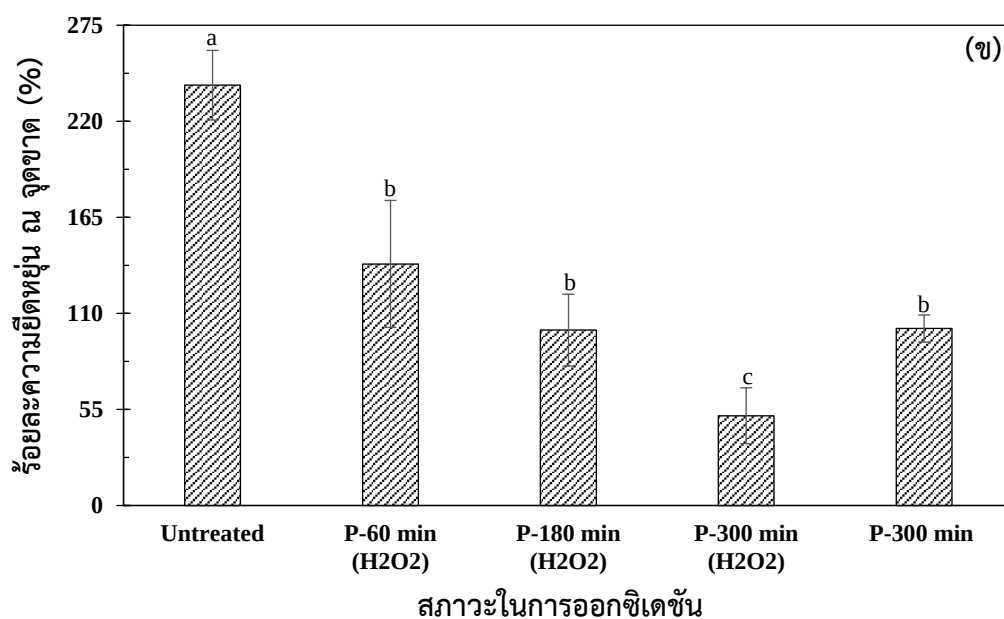
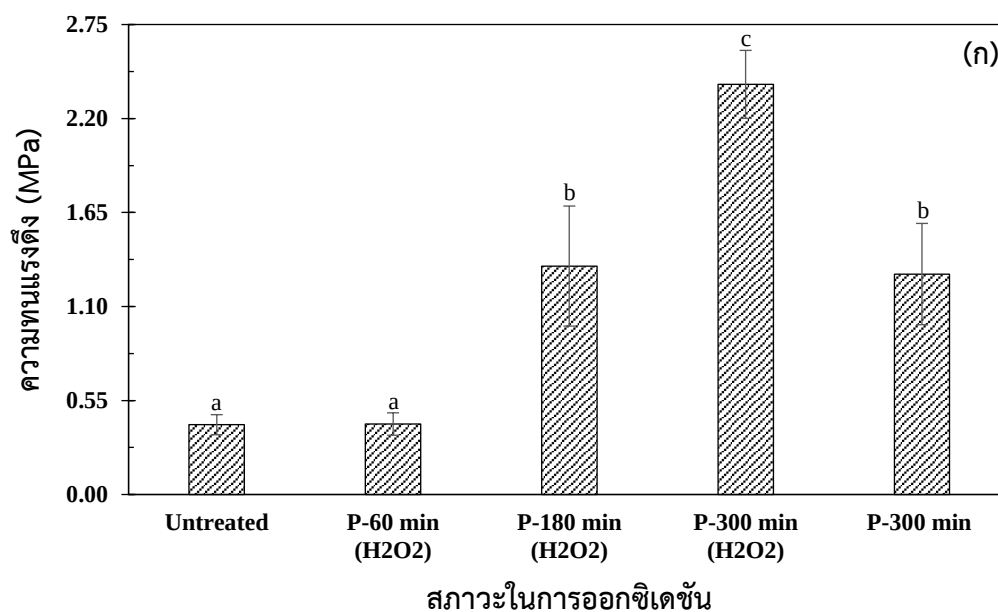


ดังนั้นค่าการยึดตัวที่แตกต่างกันอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นของฟิล์มแป้ง ค่าระดับการบวม น้ำ และความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำจึงมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับความสามารถในการ ยึดหยุ่นของฟิล์มแป้ง โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันจะมีค่าระดับการพองตัวและ ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูงจึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการ ออกซิเดชันมีค่าร้อยละการยึดตัวที่สูงกว่าฟิล์มแป้งที่สภาวะอื่น ๆ นอกจากนี้ฟิล์มแป้งที่ผ่านการ ออกซิเดชันที่เวลา 60 และ 180 นาที มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน กับฟิล์ม แป้งที่ผ่านการออกซิเดชัน 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน ถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังการพองตัวที่ต่ำ แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบกับค่าร้อยละความสามารถใน การซึมผ่านของไอน้ำพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันกับค่าร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด

โดยปกติฟิล์มแป้งที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร อาทิ ถังบรรจุภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ถังบรรจุ ภัณฑ์อาหารสด จะไม่ต้องการการยึดตัวสูงแต่ต้องการความทนแรงดึงมาก เพื่อให้บรรจุภัณฑ์มี โครงสร้างที่แข็งแรงสมบูรณ์มากขึ้น ในทางกลับกันในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ อาทิ ใช้ ในการเคลือบผิวอาหาร ใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหาร ควรจะเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง (3) จาก การทำงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหาร ดังนั้นสิ่งนี้อาจเป็นหนึ่งในข้อเสียที่เกิดขึ้นจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่ อย่างไรก็ตามปัญหาความยืดหยุ่นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังต่ำสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราส่วน ของสารเสริมสภาพพลาสติกในปริมาณที่มากขึ้น โดยเมื่อสารเสริมสภาพพลาสติกถูกรวมเข้ากับ เมทริกซ์ของฟิล์ม โมเลกุลของสารเสริมสภาพพลาสติกจะเกิดการแข่งขันกันเพื่อจะจับกับโมเลกุลของ พอลิเมอร์ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และทำให้ช่องว่างในเมทริกซ์ฟิล์มมากขึ้น ฟิล์มจากแป้งจึงสามารถยึดตัวได้สูงขึ้น (38)

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันมีความชอบน้ำสูงกว่าฟิล์มแป้งออกซิไดซ์ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งเป็นข้อจำกัด ในการนำไปใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารสด เมื่อวิเคราะห์ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันที่ เวลา 60 นาที มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชัน 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าฟิล์มมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหาร แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความชอบน้ำของฟิล์ม แป้งที่สองสภาวะดังกล่าวมีค่าสูง โดยพบว่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง ค่าร้อยละความสามารถในการ ละลายมีค่ามากกว่า 50 ซึ่งอาจจะยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านอาหารสด เนื่องจากอาหาร

สดบางชนิดจะมีส่วนประกอบของน้ำจึงส่งผลให้ฟิล์มห่อหุ้มอาหารย่อยสลายเร็วกว่าเวลาที่กำหนด เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่เวลาในการออกซิเดชัน 180 และ 300 นาที มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าฟิล์มทั้งสองสภาวะมีความชอบน้ำต่ำ มีความสามารถในการย่อยสลายที่ล่าช้ากว่าฟิล์มที่สภาวะอื่น ๆ มีคุณสมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำ ซึ่งจะช่วยชะลอการเน่าเสียของอาหารสดก่อนกำหนด และถึงแม้ว่าคุณสมบัติทางกลของฟิล์มทั้งสองสภาวะนี้จะเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารสดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ แต่ฟิล์มยังคงมีความยืดหยุ่นและไม่เปราะ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่เวลา 300 นาที ที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่เวลา 180 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงชี้ให้เห็นว่าในการทดลองครั้งนี้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารสดมากที่สุดคือ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่เวลา 180 นาที ทั้งนี้คุณสมบัติบางประการที่ยังเป็นข้อด้อยของฟิล์มแป้งที่เวลาดังกล่าวยังสามารถปรับปรุงแก้ไขได้โดยการศึกษาปรับลดความเข้มข้นของสารเสริมสภาพพลาสติกและทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต



รูปที่ 24 สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยกระบวนการ

พลาสมาพลาสมาของเหลว

(ก) ความทนแรงดึง (ข) ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด

(a b และ c แสดงการเปรียบเทียบนัยสำคัญ  $P < 0.05$  ช่วงความเชื่อมั่น 95%)

\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงถึงการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

\*\*ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงถึงการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาการเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวสำหรับใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยศึกษาเวลาในการออกซิเดชันระหว่าง 0 ถึง 300 นาที ความถี่พลาสมา 20 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน พบว่าแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์มีโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันส่งผลให้เกิดการก่อตัวของกลุ่มฟังก์ชันใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิล โดยการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอนิลแสดงถึงการออกซิเดชันในระดับอ่อนและการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลแสดงถึงการออกซิเดชันในระดับที่รุนแรง เมื่อเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้ระดับการก่อตัวของกลุ่มฟังก์ชันใหม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวมีความสามารถในการผลิตอนุมูลอิสระต่าง ๆ โดยอนุมูลที่สำคัญที่ถูกผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชันคืออนุมูลไฮดรอกซิล อนุมูลไฮดรอกซิลถูกจัดว่าเป็นสารออกซิไดซ์แรงสูง ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการออกซิเดชันจะส่งผลให้เกิดการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ระดับการออกซิเดชันสูงขึ้น การเพิ่มความถี่ของพลาสมาจะส่งผลให้เกิดการเร่งการชนกันของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลดังนั้นที่เวลาเดียวกันเมื่อใช้ความถี่ของพลาสมาที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับการออกซิเดชันจึงสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังก่อนการออกซิเดชันโดยใช้ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าที่ความถี่เดียวกันระดับการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้รับการยอมรับว่าเป็นสปีชีส์ที่มีความสำคัญในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงและมีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิล ดังนั้นการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงส่งผลให้เกิดการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลที่มากขึ้นและเกิดการออกซิเดชันบนเม็ดแป้งที่รุนแรงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้การออกซิเดชันยังส่งผลให้เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันพอลิเมอร์บนเม็ดแป้งมันสำปะหลังโดยเฉพาะส่วนโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะไมโลส การออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวที่ความถี่และเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการ

ดีพอลิเมอไรเซชันทั้งบริเวณโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ดังนั้นจึงส่งผลให้บริเวณที่เป็นผลึกและอสัณฐานบางส่วนถูกทำลายไป การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันที่รุนแรงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐานอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 เมื่อเลือกแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน และแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 60 180 และ 300 นาที โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะและคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการออกซิเดชันด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวจำเป็นต้องใช้สารเสริมสภาพพลาสติกเพื่อลดการเปราะและแตกของฟิล์มแป้งเนื่องจากการหดตัวจากการระเหยของน้ำระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นในการทดลองนี้กลีเซอรอลจึงถูกเลือกใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ได้พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการออกซิเดชันและฟิล์มที่ผ่านการออกซิเดชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีลักษณะใส โปร่งแสง แต่ในทางกลับกันฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 180 นาที และ 300 นาที โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชัน และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เวลาในการออกซิเดชัน 300 นาที โดยไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมีลักษณะขุ่น แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มแป้งทุก ๆ สภาวะมีลักษณะเรียบเนียนและเป็นเนื้อเดียวกัน

5.1.3 เมื่อนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ พบว่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำลง โดยเฉพาะการออกซิเดชันที่เวลา 180 นาที และ 300 นาที และมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการออกซิเดชันมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำ เนื่องจากไอน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นอสัณฐาน ดังนั้นเมื่อการดีพอลิเมอไรเซชันสูงขึ้นส่งผลให้บริเวณโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานลดลง การซึมผ่านของไอน้ำจึงต่ำลง ในทำนองเดียวกันความสามารถในการละลายและความสามารถในการบวมตัวของฟิล์มแป้งออกซิไดซ์มีค่าลดลง โดยเฉพาะในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีการก่อตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลในปริมาณที่สูง เนื่องจากกลุ่มคาร์บอกซิลที่ก่อตัวขึ้นในแป้งออกซิไดซ์จะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับหมู่ไฮดรอกซิลและปรับปรุงปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง ส่งผลให้แป้งมีความชอบน้ำน้อยลง เมื่อนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไปทดสอบสมบัติทางกลพบว่าฟิล์มแป้ง



มันสำปะหลังที่ผ่านการออกซิเดชันมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันมีค่าความสามารถในการยืดหยุ่นที่ลดลง ซึ่งโดยทั่วไปฟิล์มที่ใช้ห่อหุ้มอาหารควรจะเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานกับประเภทอาหารให้มากขึ้น โดยการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เติมลงไปก่อนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาการเตรียมแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวสำหรับใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ถึงแม้ว่าจะมีคุณสมบัติบางประการที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านฟิล์มห่อหุ้มอาหาร แต่อย่างไรก็ตามมีสมบัติบางประการที่ควรปรับปรุงเพื่อให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น สมบัติทางกล ซึ่งสารเสริมสภาพพลาสติกมีส่วนสำคัญที่ทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเปลี่ยนไป ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรเพิ่มการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารเสริมสภาพพลาสติกที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

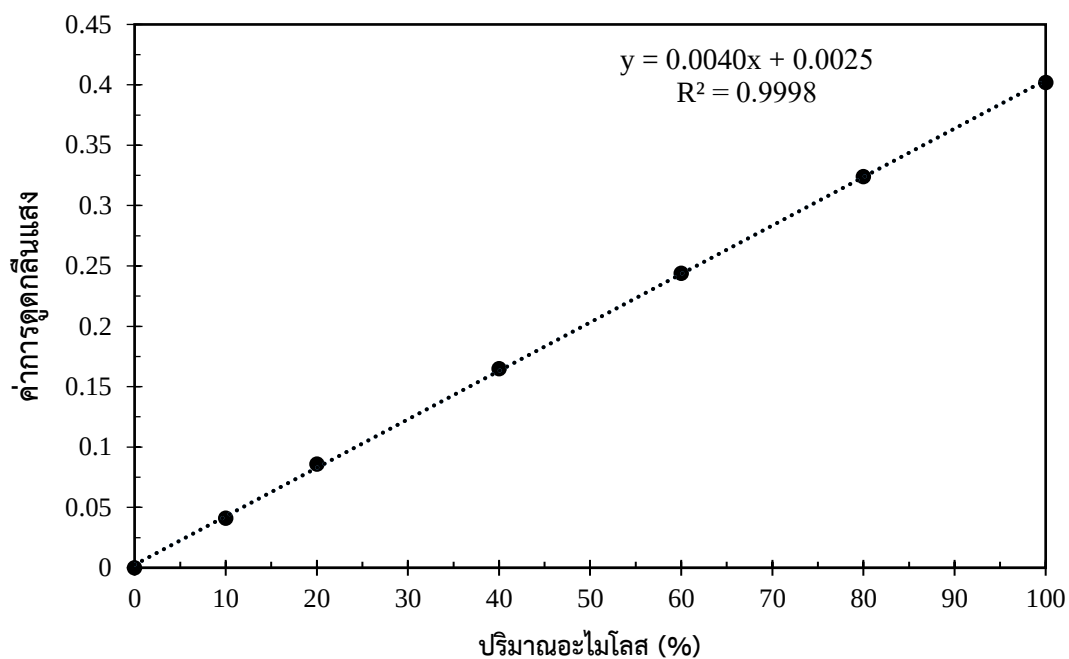
5.2.2 การศึกษาร้อยละความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวบ่งชี้ว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มการศึกษาระยะเวลาที่ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจะสามารถย่อยสลายไปจนหมด เพื่อจะได้นำฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับประเภทของอาหารให้เหมาะสม

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมการวิเคราะห์ต้นทุนที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยพลาสมาเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จริง

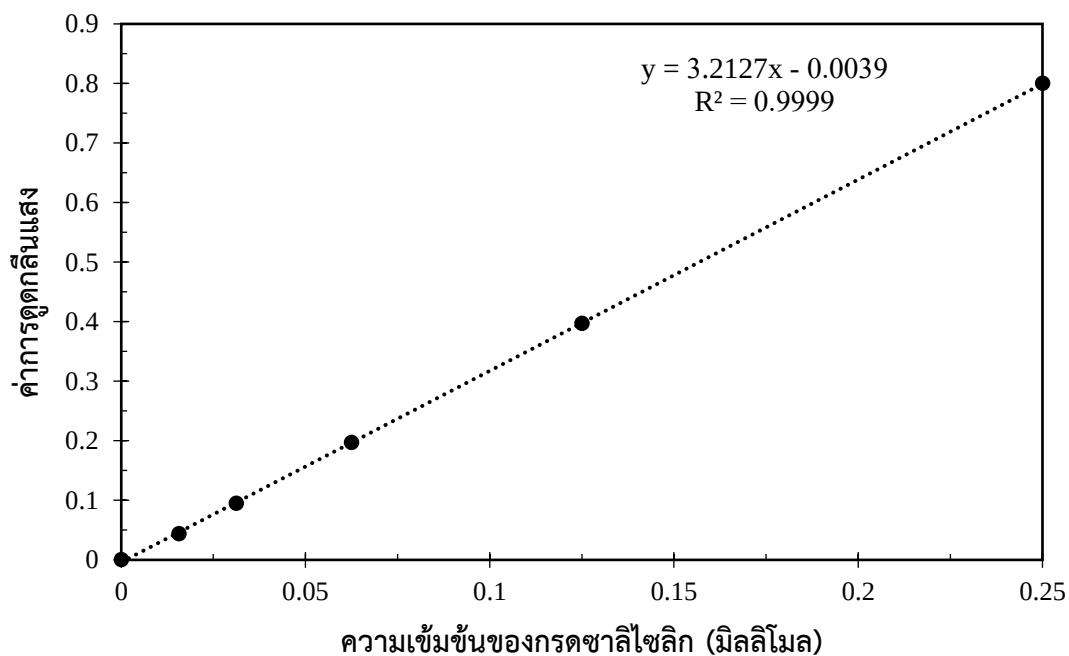


ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนครพนม



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของปริมาณการก่อดำของอะไมโลส



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ก่อดำขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน  
แป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

## บรรณานุกรม

1. Pauli RB, Quast LB, Demiate IM, Sakanaka LS. Production and characterization of oxidized cassava starch (*Manihot esculenta* Crantz) biodegradable films. *Starch/Stärke*. 2011;63(10):595-603.
2. Luchese CL, Frick JM, Patzer VL, Spada JC, Tessaro IC. Synthesis and characterization of biofilms using native and modified pinhão starch. *Food Hydrocolloids*. 2015;45:203-10.
3. Biduski B, Silva FTd, Silva WMd, Halal SLME, Pinto VZ, Dias ARG, et al. Impact of acid and oxidative modifications, single or dual, of sorghum starch on biodegradable films. *Food Chemistry*. 2017;214:53-60.
4. การสำรวจภาวะการผลิตและการค้ามันสำปะหลังฤดูการผลิต 2560/2561. สมาคมโรงงานผลิตมันสำปะหลังไทย (the thai tapioca product factory association). [Available from: <http://thaitapioca.org/2017/สรุปผลการสำรวจภาวะการผลิต/>].
5. Oladunmoye OO, Aworh OC, Maziya-Dixon B, Erukainure OL, Elemo GN. Chemical and functional properties of cassava starch, durum wheat semolina flour, and their blends. *Food science&nutrition*. 2014;2(2):132-8.
6. Colivet J, Carvalho RA. Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically modified cassava starch films. *Industrial Crops and Products*. 2017;95:599-607.
7. Tadini CC. Bio-Based Materials from Traditional and Nonconventional Native and Modified Starches. *Starch-Based Materials in Food Packaging*: Academic Press; 2017. p. 19-36.
8. Teixeira BS, Garcia RHL, Takinami PYI, Mastro NL. Comparison of gamma radiation effects on natural corn and potato starches and modified cassava starch. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018;142:44-9.
9. Banura S, Thirumdas R, Kaur A, Deshmukh RR, Annapure US. Modification of starch using low pressure radio frequency air plasma. *LWT-Food Science and Technology*. 2018;89:719-24.
10. Bahrami N, Bayliss D, Chope G, Penson S, Perehinec T, Fisk ID. Cold plasma: A

new technology to modify wheat flour functionality. Food Chemistry. 2016;202:247-53.

11. ญัฐยา พูนสุวรรณ, ปาณิสรา จางศิริกุล, นิภาวัลย์ นีระมนต์, กาญจนา ละม้ายศรี. อิทธิพลของสภาวะในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และความหนืด. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2016;7(1):57-64.
12. ลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์. การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าโดยใช้วิธีความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี. สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2550.
13. ชนิตา หันสวาสดี. เคมีของแป้งและแป้งดัดแปร. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนติ้ง เฮาส์; 2551.
14. Takai O. Solution plasma processing (SPP). Pure and Applied Chemistry. 2008;80(9):2003-11.
15. Baroch P, Anita V, Saito N, Takai O. Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water. Journal of Electrostatics. 2008;66(5):294-9.
16. Wurzburg OB. Modified starches. Food polysaccharides and their applications. 2006:87-118.
17. Zamudio-Flores PB, Vargas-Torres A, Pérez-González J, Bosquez-Molina E, Bello-Pérez LA. Films prepared with oxidized banana starch: mechanical and barrier properties. Starch/Stärke. 2006;58(6):274-82.
18. Thunwall M, Kuthanová V, Boldizar A, Rigdahl M. Film blowing of thermoplastic starch. Carbohydrate Polymers. 2008;71(4):583-90.
19. กล้านรงค์ ศิริโรด. เทคโนโลยีของแป้ง. เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, editor. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2550.
20. มาโนชญ์ สุธีพัฒน์นันท์. รายงานการวิจัยการเพิ่มปริมาณแป้งด้านทานการย่อยในผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้า: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2558.
21. อริญา ลาภโคกสูง. ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพกตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2555.
22. ดุษฎี ชาญวรัญญู. การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของสเฟียรูไลต์จากแป้งมันสำปะหลัง. คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2556.
23. วิลาสินี เกิดเกลื่อน. การเตรียมและการนำแป้งโครสลิงค์ชนิดฟอสเฟตไปใช้ประโยชน์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2553.



24. Prasertsung I, Damrongsakkul S, Terashima C, Saito N, Takai O. Preparation of low molecular weight chitosan using solution plasma system. *Carbohydrate Polymers*. 2012;87(4):2745-9.
25. Prasertsung I, Chutinate P, Watthanaphanit A, Saito N, Damrongsakkul S. Conversion of cellulose into reducing sugar by solution plasma process (SPP). *Carbohydrate polymers*. 2017;172:230-6.
26. Dias ARG, Zavareze EdR, Helbig E, Moura FAd, Vargas CG, Ciacco CF. Oxidation of fermented cassava starch using hydrogen peroxide. *Carbohydrate Polymers*. 2011;86(1):185-91.
27. ASTM E96-95. (1995). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA. 1995.
28. Yoon SD. Cross-linked potato starch-based blend films using ascorbic acid as a plasticizer. *Agricultural and Food Chemistry*. 2014;62(8):1755-64.
29. Halliwell B. Establishing the significance and optimal intake of dietary antioxidants: The biomarker concept. *Nutrition Reviews*. 1999;57:104-13.
30. Prasertsung I, Aroonraj K, Kamwilaisak K, Saito N, Damrongsakkul S. Production of reducing sugar from cassava starch waste (CSW) using solution plasma process (SPP). *Carbohydrate polymers*. 2019;205:472-9.
31. Tolvanen P, Mäki-Arvela P, Sorokin AB, Salmi T, Murzin DY. Kinetics of starch oxidation using hydrogen peroxide as an environmentally friendly oxidant and an iron complex as a catalyst. *Chemical Engineering Journal*. 2009;154(1-3):52-9.
32. Vanier NL, El Halal SLM, Dias ARG, Rosa Zavareze E. Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*. 2017;221:1546-59.
33. Daris K, Ya-Jane W. Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. *Starch/Stärke*. 2001;53:211-8.
34. Jutarat P, Jintapa T. Chemical modification of biodegradable cassava starch films by natural mono-, di- and tri-carboxylic acids. *Original Article*. 2019;41(2):355-62.
35. Jose M, Alex V-G, Pedro H-F, Fabio Z, Silvio D. Physicochemical characterization of natural and acetylated thermoplastic cassava starch. *Medellin*. 2011;166:166-73.
36. Klein B, Vanier NL, Moomand K, Pinto VZ, Colussi R, da Rosa Zavareze E, et al.

Ozone oxidation of cassava starch in aqueous solution at different pH. *Food Chemistry*. 2014;155:167-73.

37. Bower DI, Maddams WF. *The vibrational spectroscopy of polymers* (2 nd ed.). Cambridge, England: Cambridge University Press; 1996.

38. Sothornvit R, Krochta JM. Water vapor permeability and solubility of films from hydrolyzed whey protein. *Food Science*. 2000;65(4):700-3.

39. Buléon A, Colonna P, Planchot V, Ball S. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 1998;23(2):85-112.

40. Rompothi O, Pradipasena P, Tananuwong K, Somwangthanaroj A, Janjarasskul T. Development of non-water soluble, ductile mung bean starch based edible film with oxygen barrier and heat sealability. *Carbohydrate Polymers*. 2017;157:748-56.

41. García MA, Pinotti A, Martino M, Zaritzky N. Electrically treated composite films based on chitosan and methylcellulose blends. *Food Hydrocolloids*. 2009;23(3):722-8.

42. Hoover R. Acid-treated starches. *Food Reviews International*. 2000;16(3):369-92.

43. Linfeng W, Ya-Jane W. Structures and physicochemical properties of acid-thinned corn, potato and rice starches. *Starch/Stärke*. 2001;53:570-6.

44. Ghanbarzadeh B, Almasi H, Entezami A. Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*. 2011;33(1):229-35.

45. Zhang YR, Wang XL, Zhao GM, Wang YZ. Influence of oxidized starch on the properties of thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*. 2013;96(1):358-64.

46. Manoi K, Rizvi SSH. Physicochemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion. *Carbohydrate Polymers*. 2010;81(3):687-94.