



## โครงการ

### การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การเตรียมมาสก์หน้าจากเกลบข้าวนาโนเซลลูโลส

Preparation of Rice Husk Nanocellulose Facial Mask

**ชื่อนิสิต** นางสาว ทัสชา ปฏิภาณปรีชาวุฒิ **เลขประจำตัว** 6033232423

นางสาว นภััสภรณ์ พิซิตอนันต์สกุล 6033239923

**ภาควิชา** วัสดุศาสตร์

แขนงพอลิเมอร์และสิ่งทอ

**ปีการศึกษา** 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมมาส์กหน้าจากแอลกอฮอล์

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์

นางสาว ทัสชา ปฏิภาณปรีชาวุฒิ 6033232423

นางสาว นกัศภรณ์ พิชิตอนันต์สกุล 6033239923

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์

อนุมัติโดย



(รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2563

**ชื่องานวิจัย :** การเตรียมมาส์กหน้าจากกลบข้าวนาโนเซลลูโลส

**ชื่อผู้วิจัย :** นางสาว ทัสชา ปฏิภาณปรีชาวุฒิ นางสาว นภัสภรณ์ พิชิตอนันต์สกุล และ รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์\*

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

Duangdao.A@chula.ac.th

### **บทคัดย่อ**

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งสามารถพบได้ในพืชและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลสูงและมีความสามารถในการกักเก็บความชื้นได้ดี โดยนาโนเซลลูโลสสามารถเตรียมได้จากการนำเซลลูโลสระดับไมโครเมตรผ่านกระบวนการทางกลและกระบวนการทางเคมี จากที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงเป็นแนวทางที่ดีในการนำผลผลิตทางการเกษตรที่มีหลากหลายโดยเฉพาะข้าวไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม กลบข้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวเปลือกซึ่งในกระบวนการนี้มีการผลิตกลบข้าวในปริมาณมาก ดังนั้นจึงทำให้เกิดขยะเหลือทิ้งโดยไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จำนวนมาก จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่ากลบข้าวประกอบด้วยเซลลูโลสในปริมาณที่สูงจึงทำให้สามารถนำกลบข้าวมาใช้ในการสกัดเป็นนาโนเซลลูโลสได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากกลบข้าวเพื่อนำมาเตรียมแผ่นมาส์กหน้าไฮโดรเจลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ในขั้นตอนแรกทำการเตรียมสารแขวนลอยนาโนเซลลูโลสโดยเครื่องลดขนาดอนุภาคชนิดความดันสูง จากนั้นนำสารแขวนลอยนาโนเซลลูโลสมาผสมกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนักตามลำดับ เพื่อทำให้เกิดแผ่นไฮโดรเจลที่มีรูพรุน นอกจากนี้ยังใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวางที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 0.05, 0.10, 0.20, 0.40 และ 0.80 โมลาร์ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นไฮโดรเจล จากการศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีพบว่าส่วนที่เป็นอสัณฐานได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกาได้ถูกกำจัดออกไปอย่างมีประสิทธิภาพหลังจากผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกด้วยกระบวนการทางเคมี และการศึกษาดัชนีความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าเยื่อที่กำจัดสิ่งสกปรกด้วยกระบวนการทางเคมีต่างๆ มีค่าดัชนีความเป็นผลึกสูงกว่ากลบข้าวอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่มีส่วนประกอบของนาโนเซลลูโลสและโซเดียมอัลจิเนตมีความสามารถในการอุ้มน้ำมากกว่าแผ่นไฮโดรเจลที่มีส่วนประกอบของโซเดียมอัลจิเนตเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์พบว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของแผ่นไฮโดรเจลมีค่าลดลง โดยงานวิจัยในอนาคตจะนำแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไปทำการนึ่งฆ่าเชื้อ และศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพและฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียต่อไป

**คำสำคัญ** กลบข้าว, นาโนเซลลูโลส, โซเดียมอัลจิเนต, แคลเซียมคลอไรด์, แผ่นไฮโดรเจล

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Research title</b> | Preparation of Rice Husk Nanocellulose Facial Mask       |
| <b>Researchers</b>    | Tascha Patiparnpreechavud<br>Napassaporn Pichitanansakul |
| <b>Advisor</b>        | Assoc. Prof Dr. Duangdao Aht-Ong                         |

---

### Abstract

Cellulose found in plants is a biopolymer which can be degraded naturally in an environment. Nanocellulose that have great mechanical properties and high moisture content can typically be prepared by treating micron-sized cellulose with both chemical and mechanical processes. Since Thailand is an agricultural producing country, it is a great opportunity of utilizing agricultural crops, i.e., rice, as value-added products. Rice husk is an agricultural waste that is mechanically extracted from paddy rice. During milling process, large amount of rich husk is extensively generated, thereby leaving lots of residual waste. According to its composition, rice husk comprises high cellulose content which can possibly be turned into nanocellulose. Therefore, this research aimed to prepare nanocellulose from rice husk for producing hydrogel facial mask in cosmetic applications. First, nanocellulose aqueous suspension was prepared by a high-pressure homogenizer and then incorporated with sodium alginate solution at various proportions: 1:1, 2:1, 3:1, and 4:1 w/w (nanocellulose: sodium alginate) to create porous hydrogels. Moreover, calcium chloride was used as a crosslinking agent at different concentrations: 0.05, 0.10, 0.20, 0.40, and 0.80 M to study the optimum condition for preparing hydrogels. The functional groups confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) showed the obvious disappearance of amorphous components including hemicellulose, lignin, and silica after being treated with chemical processes. As studied by X-ray diffraction (XRD) analysis, it was found that the chemically treated pulp had much higher crystallinity index than raw rice husk. Additionally, the hydrogels prepared by both nanocellulose and sodium alginate exhibited much higher water absorption than that prepared by sodium alginate alone. When increasing concentration of calcium chloride solution, the hydrogels tended to provide lower water absorption ability. In future work, the produced hydrogels will be sterilized, and their biocompatibility as well as antibacterial activity will further be investigated.

**Keyword:** Rice husk, Nanocellulose, Sodium alginate, Calcium chloride, Hydrogel

## คำนำ

รายงานวิจัยนี้ จัดทำขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ในระดับปริญญาตรี ซึ่งเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมมาส์กหน้าจากแอลกอฮอล์ โดยมีความหมายในการเตรียมแผ่นมาส์กหน้าไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการกักเก็บความชื้นได้ดี โดยเตรียมจากวัสดุจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ และไม่มีอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะกล่าวถึงความจำเป็นในการทำวิจัย วัตถุประสงค์ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผลจากการดำเนินงานวิจัย ได้รวบรวมในรายงานฉบับนี้

คณะผู้จัดทำหวังว่ารายงานวิจัยนี้จะช่วยส่งเสริมความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ และเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจที่จะทำวิจัยต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำ ขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงการด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานจนโครงการนี้สำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณพีนิสิตปริญญาเอก สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื่อนัทซ หงส์รัตนวิจิตร และพีไกรวิชญ์ ปากอุตสาห์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อมาให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางและให้ความช่วยเหลืออย่างสม่ำเสมอในการตรวจสอบชิ้นงานในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เครื่องแก้วที่เกี่ยวข้องในการทดลอง รวมถึงความช่วยเหลือในทั้งด้านวิชาการ การดำเนินงาน และเงินทุนสนับสนุนจากภาควิชา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว เป็นอย่างสูงที่ได้อบรมสั่งสอนและส่งเสริมสนับสนุนการศึกษาเป็นอย่างดี ตลอดจนเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้การศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาว ทัสชา ปฎิภาณปรีชาวุฒิ

นางสาว นภัสภรณ์ พิชิตอนันต์สกุล

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ.....                              | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                    | ข    |
| คำนำ.....                                  | ค    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                       | ง    |
| สารบัญ.....                                | จ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                          | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....                           | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                          | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                      | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....                    | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....         | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4    |
| 2.1 แกลบข้าว.....                          | 4    |
| 2.2 เซลลูโลส.....                          | 4    |
| 2.3 เฮมิเซลลูโลส.....                      | 5    |
| 2.4 ลิกนิน.....                            | 6    |
| 2.5 แก้วแกลบ.....                          | 7    |
| 2.6 นาโนเซลลูโลส.....                      | 7    |
| 2.6.1 Cellulose Nanocrystals (CNCs).....   | 8    |

|   |    |
|---|----|
| 2.6.2 Cellulose Nanofibrils (CNFs).....   | 9  |
| 2.6.3 Bacteria cellulose (BC).....  | 9  |
| 2.7 กระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลส.....  | 10 |
| 2.7.1 กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid hydrolysis).....   | 10 |
| 2.7.2 กระบวนการไฮโมจีไนเซชันแรงเฉือนสูงหรือความดันสูง (High shear<br>homogenization or High pressure homogenization)..... | 11 |
| 2.7.3 กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis).....  | 11 |
| 2.8 ไฮโดรเจล.....   | 12 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 13 |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....  | 17 |
| 3.1 วัสดุ วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....   | 17 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....   | 17 |
| 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การทดสอบ.....  | 18 |
| 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....  | 19 |
| 3.4.1 การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว.....   | 19 |
| 3.4.1.1 การเตรียมแกลบ.....  | 19 |
| 3.4.1.2 การกำจัดซิกิลิกาและเฮมิเซลลูโลส (Alkaline Treatment).....   | 19 |
| 3.4.1.3 การกำจัดลิกนิน (Delignification).....   | 19 |
| 3.4.1.4 การฟอกขาว (Bleaching treatment) .....   | 19 |
| 3.4.1.5 การปั่นเยื่อเซลลูโลสแกลบด้วยความเร็วสูง (High Speed Agitation).....   | 20 |
| 3.4.1.6 การผลิตเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสโดยใช้เครื่องลดขนาดอนุภาค  |    |



|   |    |
|---|----|
| (microfluidizer).....   | 20 |
| 3.4.2 การเตรียมแผ่นมาส์กจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเกลบข้าว.....                     | 20 |
| 3.4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....   | 20 |
| 3.4.4 การวิเคราะห์ และการทดสอบสมบัติเซลลูโลสนาโนไฟบริลจากเกลบข้าว.....            | 23 |
| 3.4.4.1 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา.....   | 23 |
| 3.4.4.2 ความเป็นผลึก.....   | 23 |
| 3.4.4.3 หมู่ฟังก์ชัน.....   | 23 |
| 3.4.4.4 เสถียรภาพทางความร้อน.....   | 23 |
| 3.4.5 การวิเคราะห์ และการทดสอบสมบัติแผ่นมาส์กจากนาโนเซลลูโลสจากเกลบข้าว.....      | 24 |
| 3.4.5.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความเป็นพิษ (Biocompatibility and toxicity). 24 |    |
| 3.4.5.2 การอุ้มน้ำ (Water retention).....   | 24 |
| 3.5 ตารางการดำเนินการ.....  | 25 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....   | 27 |
| 4.1 ผลการเตรียมเซลลูโลสจากเกลบข้าว.....   | 27 |
| 4.1.1 การกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส.....  | 27 |
| 4.1.2 การกำจัดลิกนิน.....   | 28 |
| 4.1.3 การฟอกขาว.....  | 28 |
| 4.2 ผลการเตรียมนาโนเซลลูโลส.....  | 29 |
| 4.3 ผลการขึ้นรูปไฮโดรเจล.....   | 29 |
| 4.4 การวิเคราะห์สมบัตินาโนเซลลูโลส.....   | 30 |
| 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยา.....  | 30 |
| 4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....                     | 34 |
| 4.5 การวิเคราะห์แผ่นไฮโดรเจล.....                         | 35 |
| 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....                | 35 |
| 4.5.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....                     | 39 |
| 4.5.3 ผลความสามารถในการอุ้มน้ำ.....                       | 41 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัยในอนาคต..... | 43 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                                   | 43 |
| 5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเส้นใยนาโนเซลลูโลส.....           | 43 |
| 5.1.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....                | 43 |
| 5.1.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....                     | 43 |
| 5.1.1.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....                     | 43 |
| 5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติแผ่นไฮโดรเจล.....                 | 44 |
| 5.1.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....                | 44 |
| 5.1.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....                     | 44 |
| 5.1.2.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ.....           | 44 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะและการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต.....            | 44 |
| 5.2.1 ข้อเสนอแนะ.....                                     | 44 |
| 5.2.2 การต่อยอดงานวิจัยในอนาคต.....                       | 44 |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 46 |

## สารบัญรูปภาพ

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....   | 5    |
| รูปที่ 2.2 เซลลูโลสที่เป็นโครงสร้างส่วนผลึกและอสัณฐาน.....  | 5    |
| รูปที่ 2.3 มอนอเมอร์หลักของเฮมิเซลลูโลส.....  | 6    |
| รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน.....   | 6    |
| รูปที่ 2.5 ลักษณะของแกลบ(a) และเถ้าแกลบ(b) .....  | 7    |
| รูปที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่าง CNC และ CNFs.....   | 8    |
| รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Bacterial cellulose.....  | 8    |
| รูปที่ 2.8 ภาพ FE-SEM ของ cellulose nanocrystals.....   | 9    |
| รูปที่ 2.9 ภาพ FE-SEM ของ cellulose nanofibrils.....  | 9    |
| รูปที่ 2.10 ภาพ FE-SEM ของ bacterial cellulose.....   | 10   |
| รูปที่ 2.11 แผนผังกระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลสด้วยวิธีการต่าง ๆ.....   | 10   |
| รูปที่ 2.12 การเชื่อมขวางของไฮโดรเจลแบบกายภาพและแบบเคมี.....  | 12   |
| รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลจากนาโนเซลลูโลสโดยใช้สารละลายโซเดียมอัลจิเนตและ<br>สารละลายแคลเซียมคลอไรด์..... | 15   |
| รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการเตรียมนาโนเซลลูโลส.....   | 21   |
| รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการเตรียมแผ่นมาส์กจากเส้นใยนาโนเซลลูโลส.....   | 22   |
| รูปที่ 4.1 แกลบข้าวที่ผ่านการแยกด้วยตะแกรงร่อน.....   | 27   |
| รูปที่ 4.2 แกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลสกระบวนการฟอกขาว.....   | 27   |
| รูปที่ 4.3 แกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดลิกนิน.....   | 28   |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.4 เส้นใยไมโครเซลลูโลสจากแกลบที่ผ่านการฟอกขาว จำนวน 1 รอบ(ก) 2 รอบ(ข) และ 3 รอบ(ค)..   | 28 |
| รูปที่ 4.5 นาโนเซลลูโลส.....   | 29 |
| รูปที่ 4.6 แผ่นไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (ก) และแผ่นไฮโดรเจลผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต โดยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 (ข) 2:1 (ค) 3:1 (ง) และ 4:1 (จ) โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์.....   | 30 |
| รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของแกลบข้าว: พื้นผิวด้านในและด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก), พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข), พื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค) และพื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ง-จ).....  | 31 |
| รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการฟอกขาว: พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก), พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 2000 เท่า (ข) และพื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค).....   | 32 |
| รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว: พื้นผิวของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) และพื้นผิวของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข).....   | 32 |
| รูปที่ 4.10 ผลสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแกลบข้าว (ก.)และ เส้นใยไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการกำจัดซัลไฟและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนิน และการฟอกขาว (ข.) .....  | 34 |
| รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซัลไฟและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนินและการฟอกขาว.....   | 35 |
| รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ก-ข) และสัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ค-ง), สัดส่วน 2:1 ที่ |    |

|   |    |
|---|----|
| กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (จ-ฉ), สัดส่วน 3:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ            |    |
| กำลังขยาย 1000 เท่า (ช-ซ) และสัดส่วน 4:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ณ-        |    |
| ญ) ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์.....                        | 36 |
| รูปที่ 4.13 สันฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต |    |
| ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 3:1 ที่ความเข้มข้นของ             |    |
| สารละลายแคลเซียมคลอไรด์คือ 0.05 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ก-          |    |
| ข), ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ค-ง), ความเข้มข้น      |    |
| 0.20 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (จ-ฉ), ความเข้มข้น 0.40 โมลาร์ ที่      |    |
| กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ช-ซ), และความเข้มข้น 0.80 โมลาร์ ที่กำลังขยาย         |    |
| 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ณ-ญ) ตามลำดับ .....   | 37 |
| รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัล-   |    |
| จิเนตและแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วย              |    |
| อัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์.....                           | 39 |
| รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโน-    |    |
| เซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตในสัดส่วน 3:1 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม            |    |
| คลอไรด์ที่แตกต่างกัน.....   | 40 |
| รูปที่ 4.16 กราฟปริมาณร้อยละของน้ำที่อยู่ในแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (ฟ้า) และแผ่น |    |
| ไฮโดรเจลผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่สัดส่วน 1:1 (ส้ม) 2:1          |    |
| (เทา) 3:1 (เหลือง) และ 4:1 (เขียว) ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.05 0.10           |    |
| 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์.....  | 42 |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัยในระยะเวลาต่างๆ.....   | 25   |
| ตารางที่ 4.1 ความเป็นผลึกของเกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลส.....   | 35   |
| ตารางที่ 4.2 ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต และแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 โดยความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์..... | 40   |
| ตารางที่ 4.3 ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 3:1 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์คือ 0.05 0.10 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์                          | 41   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เซลลูโลส (cellulose) มีสูตรโครงสร้างคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  จัดเป็นสารชีวโมเลกุลที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่เป็นสารคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ที่มีโมเลกุลของกลูโคส (glucose) กว่า 1,000 ถึง 10,000 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -glycosidic bond) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 โดยมีการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่ตรงอย่างเป็นระเบียบ เส้นใยเซลลูโลสจัดเป็นหนึ่งในสารพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่พบในสิ่งมีชีวิตทั้งในผนังเซลล์ของพืช และแบคทีเรีย ส่วนเส้นใยนาโนเซลลูโลส (nanocellulose) นั้น เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำเซลลูโลสจากพืชมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การใช้เอนไซม์ สารเคมี และแรงเชิงกล โดยโครงสร้างของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากพืชจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ นาโนคริสตัลเซลลูโลส หรือ ผลึกนาโนเซลลูโลส (cellulose nanocrystals, CNCs) และเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofibrils, CNFs) นาโนเซลลูโลสทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากวิธีการสกัด ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีความพยายามในการนำนาโนเซลลูโลสมาประยุกต์ใช้ในการเป็นวัสดุติดตั้งต้นในการผลิต รวมถึงใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4 ถึง 100 นาโนเมตร ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม สามารถกักเก็บความชื้นได้ดี ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

แหล่งเซลลูโลสที่จะนำมาสกัดเป็นนาโนเซลลูโลสที่หาได้ง่ายที่สุดคือเซลลูโลสจากพืช ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก นอกจากนี้ประชากรส่วนใหญ่ ยังคงประกอบอาชีพทำการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำนาข้าวซึ่งเป็นอาชีพดั้งเดิมควบคู่กับคนไทยมาอย่างยาวนาน ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทย และเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ มีการเพาะปลูก และมีผลผลิตจากข้าวเป็นจำนวนมาก ทั้งส่งออกต่างประเทศ และภายในประเทศ ซึ่งในการผลิตข้าวนั้นจะทำให้มีแกลบซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าว โดยทั่วไปแล้วแกลบจะถูกนำไปกำจัดโดยใช้วิธีฝังกลบ หรือการเผา ก่อให้เกิดมลพิษที่จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และคนในชุมชนที่ใกล้เคียง จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการนำแกลบไปใช้ประโยชน์ อาทิ นำไปทำเป็นเชื้อเพลิง นำไปผสมกับวัสดุอื่น ๆ ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ทำเป็นซีเมนต์เพื่อใช้กันความชื้นในคอนกรีต และทำปุ๋ยหมักได้ แต่ก็ยังไม่สามารถเพิ่มมูลค่า และไม่สามารถดึงสมบัติเด่นของแกลบที่เหลือมาใช้ได้มากนัก จากการศึกษาองค์ประกอบ

ของแกลบพบว่ามี เซลลูโลส ร้อยละ 38 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 25 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 20 และ เถ้า (ash) ร้อยละ 17 ซึ่งในเถ้าประกอบด้วยซิลิกา (silica) มากถึงร้อยละ 94 [1] หรือกล่าวได้ว่า องค์ประกอบของแกลบนั้นมีปริมาณเซลลูโลสอยู่มาก ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำแกลบมาใช้สกัดเป็นนาโนเซลลูโลสเพื่อใช้ประโยชน์ในหลากหลายอุตสาหกรรม อาทิ อาหาร ยา เครื่องสำอาง กระดาษ สิ่งทอ วัสดุก่อสร้าง และสารเคลือบผิว เป็นต้น แต่ในการนำมาสกัดเป็นนาโนเซลลูโลสจะต้องมีการกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสออก เนื่องจากสารทั้งสองนี้มีความเป็นอสัณฐานซึ่งจะทำให้นาโนเซลลูโลสที่สกัดได้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง รวมไปถึงมีความชอบน้ำที่มากขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการนำนาโนเซลลูโลสมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโต และขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ผู้บริโภคทั้งเพศชาย และเพศหญิง เริ่มมีความใส่ใจในการดูแลตัวเอง ดูแลผิวพรรณความงามมากยิ่งขึ้น ประกอบกับการที่ผู้บริโภคเริ่มหันมาใส่ใจผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่ดีในการนำผลผลิตเหลือทิ้งจากการเกษตรมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเครื่องสำอาง แทนการสังเคราะห์จากสารเคมี เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุดิบทางการเกษตร และยังลดความเสี่ยงในการเกิดการระคายเคืองต่อผิวของผู้บริโภคที่เกิดจากการใช้สารเคมี สำหรับงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการสกัดนาโนเซลลูโลสจากแกลบ และนำมาผลิตเป็นแผ่นมาร์กบำรุงผิวหน้า โดยใช้กระบวนการเชิงกลผนวกเข้ากับกระบวนการเชิงเคมีโดยมีการใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคความดันสูง (microfluidizer) เป็นเครื่องมือในการลดขนาดอนุภาค เมื่อสกัดออกมาเป็นนาโนเซลลูโลสแล้วจะเข้าสู่กระบวนการเตรียมแผ่นมาร์ก จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ (cell fibroblast) และสมบัติการอุ้มน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและเตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแกลบข้าว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาความเข้มข้นของโซเดียมอัลจินेटที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นมาร์กนาโนเซลลูโลส
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความเป็นพิษ และสมบัติการอุ้มน้ำของแผ่นมาร์กที่เตรียมจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากแกลบข้าว



### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาขั้นตอนและภาวะในการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากเกลบด้วยกระบวนการเชิงกลด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใช้ความดันสูงที่ความดัน 20,000 psi เป็นเวลา 60 นาที
- 1.3.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา หมูฟิงก์ชัน ดัชนีความเป็นผลึกและเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้
- 1.3.3 ศึกษาขั้นตอนและภาวะในการเตรียมแผ่นมาสก์จากนาโนเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมอัลจินेट และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 และ 0.8 โมลาร์
- 1.3.4 ทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความเป็นพิษต่อ cell fibroblast และการอุ้มน้ำของแผ่นมาสก์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากเกลบข้าว ซึ่งเป็นการลดปริมาณขยะจากอุตสาหกรรมเกษตรที่เพิ่มมูลค่าให้แก่เกลบข้าว และยังเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ
- 1.4.2 การทำไฮโดรเจลจากเกลบข้าวนาโนเซลลูโลสและโซเดียมอัลจินेटจะเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีสมบัติความอุ้มน้ำที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นมาสก์หน้าทั่วไปซึ่งจะเป็นส่วนช่วยในการพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้

## บทที่ 2

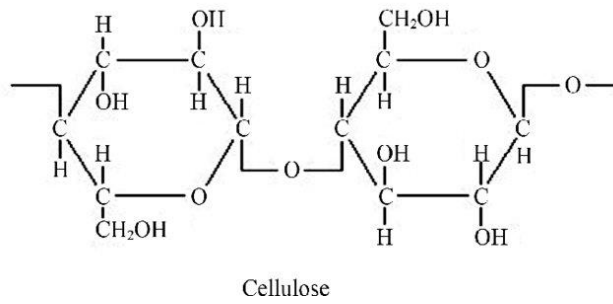
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แกลบข้าว

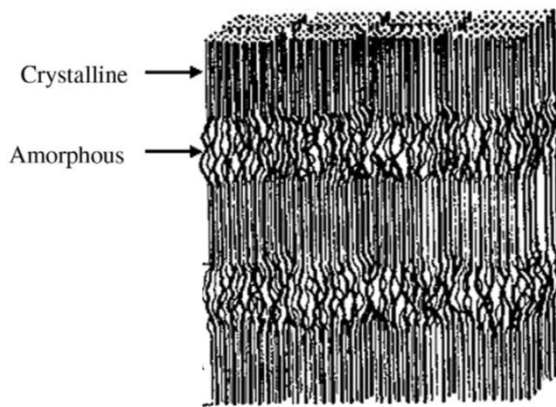
แกลบข้าว (rice husk) คือเปลือกแข็งของเมล็ดข้าวได้มาจากการสีข้าว เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร มีลักษณะเป็นรูปทรงรียาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือสีเหลืองนวลขึ้นกับภูมิประเทศที่มีการเพาะปลูกและสายพันธุ์ของข้าว แกลบข้าวมีสมบัติไม่ละลายน้ำ มีความเสถียรภาพทางเคมี มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีสมบัติการดูดซับที่ดี เหมาะแก่การนำไปใช้ดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย แกลบมีองค์ประกอบคือ เซลลูโลส ร้อยละ 38, เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 25, ลิกนิน ร้อยละ 20 และเถ้าร้อยละ 17 ซึ่งในเถ้าประกอบด้วยซิลิกา ร้อยละ 94 ในปัจจุบันมีการนำแกลบข้าวมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น ผสมกับดินเพื่อปรับสภาพดิน ใช้ทำปุ๋ยหมัก ใช้เป็นอาหารเสริมให้กับสัตว์ และใช้เป็นวัสดุรองพื้นเพื่อกันความชื้นและระบายน้ำในคอกสัตว์ เป็นต้น ที่ผ่านมามีการจัดการและการปรับปรุงสมบัติของแกลบข้าวยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรรวมถึงเพิ่มมูลค่าของแกลบได้น้อย จึงเป็นสาเหตุให้นักวิจัยหลากหลายท่านที่สนใจศึกษาวิจัยการทำแกลบข้าว ไปใช้ประโยชน์โดยมีการนำแกลบข้าวไปผสมกับวัสดุอื่นเพื่อทำเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์, สิ่งก่อสร้าง เช่น พื้นกระเบื้อง และราวบันได เป็นต้น [1-2]

#### 2.2 เซลลูโลส

เซลลูโลส (cellulose) มีสูตรโมเลกุลคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยเส้นใยเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์พืช สาหร่าย และเชื้อรา เซลลูโลสเป็นสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) ที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4 glycosidic) ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ของโมเลกุลกลูโคส เป็นสายพอลิเมอร์เส้นตรงไม่มีกิ่งแขนง ดังรูปที่ 2.1 ทำให้เส้นใยเซลลูโลสไม่ละลายน้ำ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เซลลูโลสที่พบโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับไมโครเมตร โดยเส้นใยเซลลูโลสจะประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ลักษณะ คือโครงสร้างส่วนที่เกิดการเรียงชิดแน่น และจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ผลึก (crystalline) และโครงสร้างส่วนที่เกิดการเรียงแบบหลวม ๆ เกิดช่องว่างอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า ออสันฐาน (amorphous) [1] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส [3]

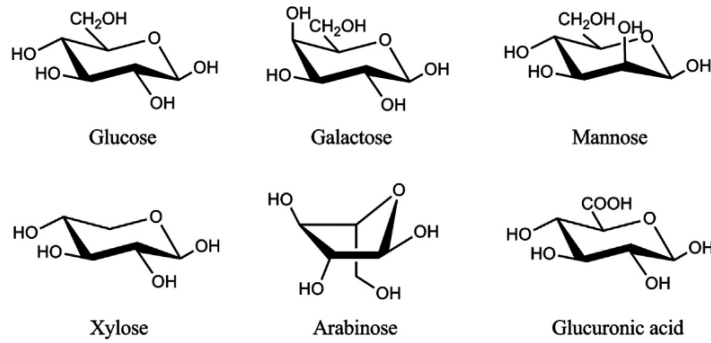


รูปที่ 2.2 เซลลูโลสที่เป็นโครงสร้างส่วนผลึกและอสัณฐาน [4]

### 2.3 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) จัดเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความซับซ้อน โดยมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีความคล้ายคลึงกับของเซลลูโลส แต่จากการที่โครงสร้างต่อกันเป็นพอลิเมอร์สายสั้น และแตกกิ่งออกทำให้มีลักษณะที่เป็นอสัณฐานส่งผลให้มีมวลโมเลกุลที่น้อยกว่า และความแข็งแรงต่ำกว่าเซลลูโลส แต่เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่งที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส จึงเกิดปฏิกิริยาทางเคมีความว่องไวต่ำกว่าเซลลูโลส และการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization) มีค่าต่ำกว่าเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า

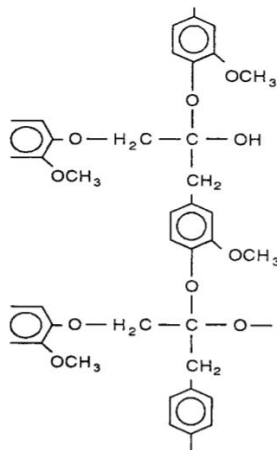
เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำตาลในโครงสร้าง โดยน้ำตาลที่พบประกอบด้วยน้ำตาลเพนโทส ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส น้ำตาลเฮกโซส ได้แก่ กาแลกโตส แมนโนส แรมโนส และฟิวโคสและมีกรดยูโรนิก ได้แก่ กรดกลูคูโรนิก [5] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 มอนอเมอร์หลักของเฮมิเซลลูโลส [6]

## 2.4 ลิกนิน

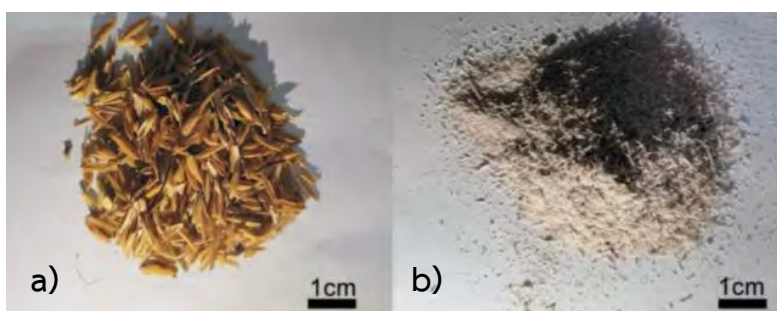
ลิกนิน (lignin) มาจากชื่อภาษาลาติน lignum แปลว่าไม้ มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน ได้แก่ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) มอนอเมอร์ประกอบด้วยฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกฟีนอล ดังรูปที่ 2.4 ลิกนินมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายในกรดได้เล็กน้อย สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นด่าง และถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนได้ในอากาศ ลิกนินที่ผนังเซลล์ทำหน้าที่ในการควบคุมการซึมผ่านของน้ำและอากาศ และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับผนังเซลล์ แต่หน้าที่หลักของลิกนินคือเสริมความแข็งแรงให้กับเซลล์เนื้อเยื่อพืช อีกทั้งยังมีการเชื่อมต่อกับเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นในพืช [7]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [8]

## 2.5 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ (rice husk ash) ได้จากการนำแกลบไปเผาไหม้โดยสมบูรณ์เพื่อใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อน และการผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการใช้เถ้าแกลบในการผลิตปูนซีเมนต์ สารทำความสะอาด และใช้เป็นสารเสริมแรงให้แก่ยางหรือพอลิเมอร์อีกด้วย เถ้าแกลบประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูพรุนจำนวนมาก ความหนาแน่นต่ำ และมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งเถ้าแกลบมีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากถึงร้อยละ 94 และมีสิ่งเจือปนจำพวกเป็นโลหะออกไซด์อีกเล็กน้อย ลักษณะของเถ้าแกลบแสดงดังรูปที่ 2.5 [9-10]



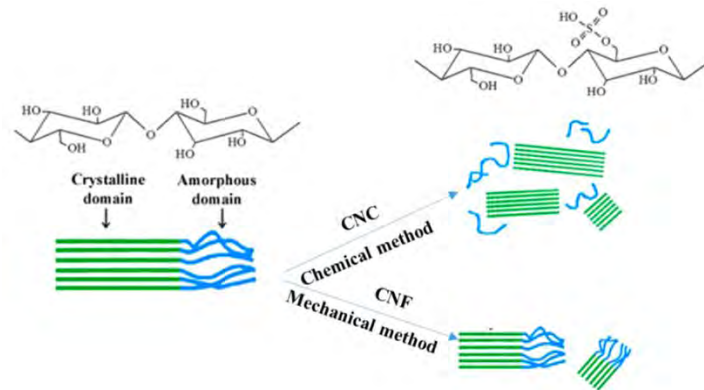
รูปที่ 2.5 ลักษณะของแกลบ (a) และเถ้าแกลบ (b) [9]

ซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย แต่สามารถละลายได้ในสารละลายต่างที่มีการให้ความร้อน ซิลิกามีสมบัติไม่ลุกติดไฟจึงมักใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับวัสดุทนไฟ และยังมีสมบัติดูดซับความชื้นและสารเคมีได้ดี จึงนิยมใช้เป็นสารดูดความชื้นที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและยา ซิลิกาที่อยู่ในแกลบเกิดจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าวโดยรากของข้าวจะดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ที่จำเป็นรวมทั้งธาตุซิลิกอน (Si) จากนั้นสารละลายกรดโมโนซิลิซิก (monosilicic acid) จะสะสมอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกเมล็ดข้าว กลายเป็นซิลิกาที่รวมตัวกับเซลลูโลสและลิกนินเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าว หากนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเถ้าจะประกอบด้วยซิลิกาแบบอสัณฐาน (amorphous silica) แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะได้ซิลิกาแบบผลึก (crystalline silica) [11-13]

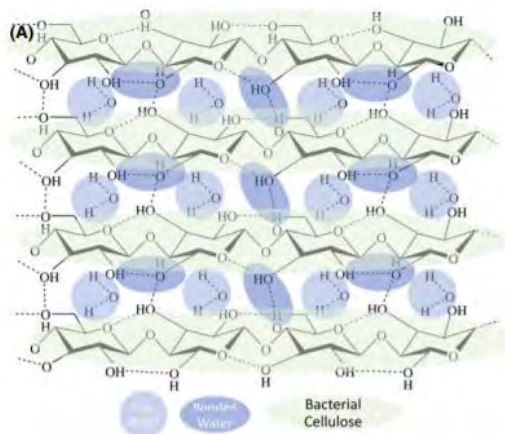
## 2.6 นาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส (nanocellulose) เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการสกัดจนมีขนาดเส้นใยในระดับนาโนเมตร ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน อาทิ ทางชีวการแพทย์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับตกแต่งบาดแผล วัสดุไบโอพอลิเมอร์ผสมที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อีกทั้งถูกนำมาใช้ผลิตแผ่นฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สเพื่อทำเป็นแผ่นฟิล์มถนอมอาหาร นอกจากนี้ยังนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิ

เมอร์เมทริกซ์และวัสดุเชิงสารประกอบ เพื่อทดแทนสารเสริมแรงหรือสารตัวเติมจากเส้นใยสังเคราะห์ โดยนาโนเซลลูโลสสามารถจัดแบ่งเป็น 3 ชนิดหลัก คือ Cellulose Nanocrystals (CNCs) Cellulose Nanofibrils (CNFs) และ Bacterial cellulose (BC) [14-15] ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



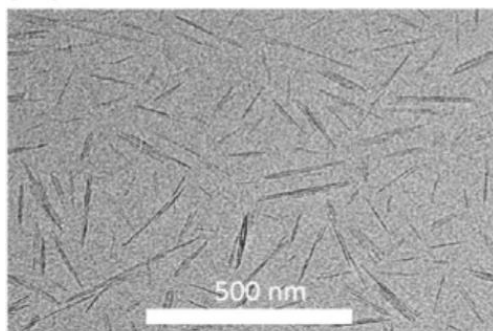
รูปที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่าง CNCs และ CNFs [16]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Bacterial cellulose [17]

### 2.6.1 Cellulose Nanocrystals (CNCs)

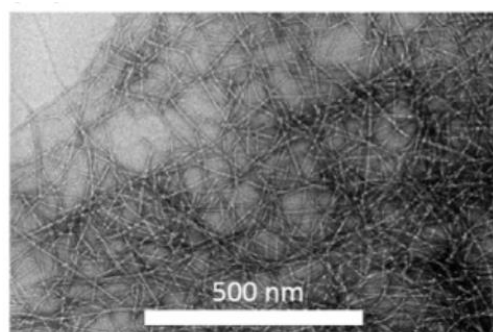
เป็นเซลลูโลสที่มีลักษณะคล้ายแท่งสั้น (short rod) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตรและความยาวมากกว่า 100 ถึง 600 นาโนเมตร และเป็นเซลลูโลสที่ได้จากการใช้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยา โดยส่วนมากสารเคมีที่ใช้จะเป็นพวกกรด เพื่อให้สายโซ่มอเลกุลที่เป็นผลึกและอสัณฐานเกิดการแยกออกจากกัน ส่วนที่เป็นอสัณฐานจะเกิดการสลายตัวจากตัวละลายที่เป็นกรด ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุภาคของ CNCs ที่มีความเป็นผลึกสูง [18] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพ FE-SEM ของ cellulose nanocrystals [19]

### 2.6.2 Cellulose Nanofibrils (CNFs)

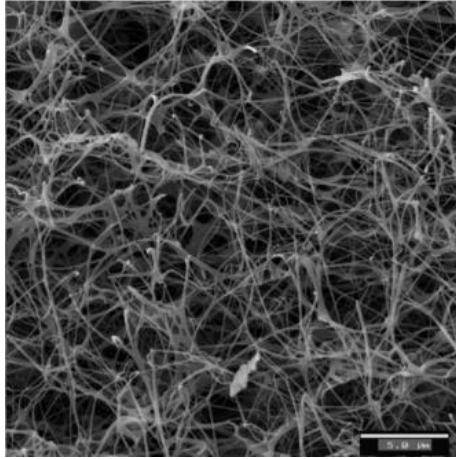
เป็นเส้นใยเซลลูโลสเส้นใยยาว โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ถึง 30 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร และเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่เกิดจากแรงเชิงกล ทำให้เกิดการกระจายตัวและแยกตัวออกจากโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสระดับไมโครเมตร CNFs จะมีความเป็นผลึกต่ำกว่า CNCs เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวมีส่วนที่เป็นอสัณฐานหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง [18] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพ FE-SEM ของ cellulose nanofibrils [19]

### 2.6.3 Bacterial cellulose (BC)

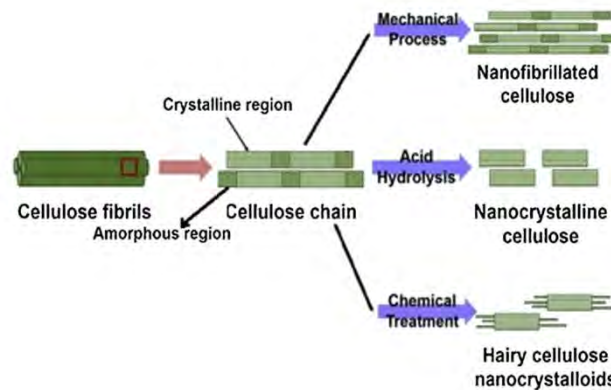
เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ของแบคทีเรีย เช่น *Gluconacetobacter xylinus*, *Acetobacter xylinum* และ *Gluconacetobacter xylinus* เป็นต้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 ถึง 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.10 มีความเป็นผลึกสูง สภาวะที่ใช้ในการหมัก และปริมาณอากาศในระบบ เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ โดย BC จะมีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากปราศจากสารที่อาจปนอยู่ในเซลลูโลสที่สกัดได้จากพืช ได้แก่ ลิกนิน และสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เซลลูโลส [20]



รูปที่ 2.10 ภาพ FE-SEM ของ bacterial cellulose [21]

## 2.7 กระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลส

กระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลสที่ใช้ในปัจจุบันมี 3 วิธีหลักได้แก่ กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงเฉือนสูงหรือความดันสูง (high shear homogenization or high pressure homogenization) และกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [22]



รูปที่ 2.11 แผนผังกระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลสในวิธีการต่าง ๆ [23]

### 2.7.1 กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis)

การไฮโดรไลซิสด้วยกรดจะทำให้ได้ผลึกนาโนเซลลูโลสที่มีรูปร่างเป็นแท่งสั้น ส่วนที่ทำปฏิกิริยากับกรดได้ง่ายคือส่วนที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลส เนื่องจากมีพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า ส่วนที่เป็นโครงสร้างเป็นผลึก ส่งผลให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานถูกทำลายได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ ความเข้มข้นของกรด ชนิดของเวลา อุณหภูมิในกระบวนการเกิดปฏิกิริยา



ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และสัดส่วนระหว่างสารละลายกรดต่อเส้นใยเซลลูโลส กรดที่นิยมใช้ในกระบวนการเตรียม CNCs ส่วนมากเป็นกรดเข้มข้น ได้แก่ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) การใช้กรดไฮโดรคลอริกในการไฮโดรไลซิสจะทำให้มีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มของนาโนเซลลูโลสที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย ในขณะที่ถ้าใช้กรดซัลฟิวริก ปฏิกิริยาจะเกิดที่หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสที่ได้จะมีประจุลบของหมู่ซัลเฟตทำให้เกิดการผลักกันของโมเลกุลจึงมีการกระจายตัวได้ดีในสารละลาย ประจุของหมู่ซัลเฟตยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสที่ได้มีเสถียรภาพต่อความร้อนลดลง [24]

### 2.7.2 กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงเฉือนสูงหรือความดันสูง (high shear homogenization or high pressure homogenization)

กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงเฉือนสูงหรือความดันสูง เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เรียกว่า เซลลูโลสนาโนไฟบริล โดยกระบวนการใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร (microfluidizer) ซึ่งอาศัยแรงเฉือนในขั้นตอนการผลิตนาโนเซลลูโลส การเกิดแรงดันหรือแรงเฉือนทำให้เส้นใยเกิดการแตกออก โดยจะทำให้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของผลึกและอสัณฐาน [25-26]

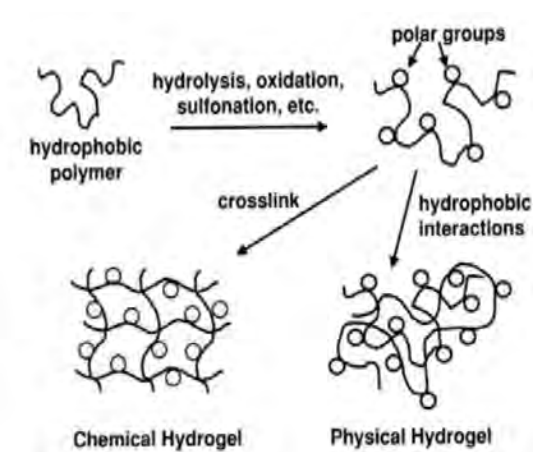
### 2.7.3 กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ เป็นกระบวนการสัปดาห์นาโนเซลลูโลสโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ประกอบด้วยเอนไซม์ Cellobiohydrolase และเอนไซม์ Endoglucanase ซึ่งจะทำลายโครงสร้างเซลลูโลสส่วนที่เป็นผลึก และอสัณฐานตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทำลายเซลลูโลส คือความเป็นผลึกและพื้นที่ผิว ซึ่งมีผลต่อความสามารถของเซลลูโลสในการดูดซับของเอนไซม์เซลลูเลสเข้าไปในโมเลกุล จากโครงสร้างของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน พบว่าส่วนที่เป็นผลึกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่า 100 เท่าเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน เนื่องจากส่วนที่เป็นอสัณฐานมีรูปร่างและการจัดเรียงตัวที่ไม่หนาแน่นเท่าส่วนที่เป็นผลึก จึงส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่า โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จะทำที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส และทำการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิมากกว่า 80 องศาเซลเซียสเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มักนิยมใช้ร่วมกับกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงเฉือนสูงหรือความดันสูง เพื่อช่วยลดระยะเวลาให้สั้นลงแต่ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร [27-28]

## 2.8 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (hydrogel) คือวัสดุที่มีความนุ่มเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (hydrophilic polymer) ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ความเป็นรูพรุนนี้เกิดขึ้นได้จากสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมต่อเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการใช้สารเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล โดยปกติแล้วไฮโดรเจลจะมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้มากถึงร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก โดยโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกในช่องว่างของไฮโดรเจล ทำให้เกิดการพองตัวเมื่อดูดซับน้ำและจะหดตัวเมื่อมีการคายน้ำออกไป [29]

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งประเภทได้ตามชนิดของแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงข่าย โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เจลกายภาพ (physical gels) มีการเชื่อมขวางของโครงข่ายสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยอันตรกิริยาระหว่างไอออน (ionic interactions) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) และอันตรกิริยาแบบแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals interactions) เจลเคมี (chemical gels) โครงข่ายของสายโซ่พอลิเมอร์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonds) หรือสารเชื่อมขวาง (crosslink agents) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของไฮโดรเจล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ความแรงของสารไอออนิก ความดัน แสง และอุณหภูมิ [30]



รูปที่ 2.12 การเชื่อมขวางของไฮโดรเจลแบบกายภาพและแบบเคมี [31]

ปัจจุบันมีการใช้งานไฮโดรเจลทางด้านชีวการแพทย์ เช่น ใช้เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ (scaffolds) คอนแทคเลนส์ (contact lens) แผ่นปิดรักษาบาดแผล (wound healing and dressing) แผ่นมาสก์หน้า (facial mask) ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขอนามัย (hygienic products) และระบบนำส่งยา (drug delivery) [29]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากชานอ้อยโดยใช้วิธี high pressure homogenization (HPH) โดยนำชานอ้อยมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วนำเซลลูโลสมาล้างด้วยสารละลายกรด และน้ำกลั่นจนมีสถานะเป็นกลาง จากนั้นผสมสารละลายเซลลูโลสจากชานอ้อยที่ได้ กับ 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([Bmim]Cl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล ด้วยการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้เซลลูโลสละลายกลายเป็นสารละลายใส และหนืด หลังจากนั้นทำให้สารละลายนี้กลายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการใช้เครื่อง high pressure homogenizer โดยปรับความดันในช่วง 40 ถึง 140 MPa 50 HPH cycles แล้วทิ้งให้เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นเส้นใยเซลลูโลสถูกทำให้ตกตะกอนด้วยสารละลายไอออนิก (ionic solution) จากนั้นทำให้แห้งโดยใช้วิธีการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (vacuum freeze drying) แล้วนำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ เช่น ขนาดโมเลกุล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา หมู่ฟังก์ชัน ปริมาณผลึก สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหล (rheology properties) จากผลการวิเคราะห์และทดสอบพบว่าได้นาโนเซลลูโลสที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 20 นาโนเมตร ตั้งแต่ที่ความดัน 80 MPa 30 HPH cycles มีหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสคือหมู่ C-H และ O-H เช่นเดียวกับเซลลูโลสตั้งต้น ซึ่งนาโนเซลลูโลสที่ได้มีความทนทานต่อความร้อนและความเป็นผลึกน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสตั้งเดิม เพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างเซลลูโลสถูกทำลายจากการละลายเซลลูโลสด้วย [Bmim]Cl และจากแรงเฉือนและความดันสูงของเครื่อง high pressure homogenizer จากการศึกษาสมบัติการไหลของนาโนเซลลูโลสพบว่ามีค่ามอดูลัสจริง (storage modulus) มากกว่าค่ามอดูลัสจินตภาพ (loss modulus) ในทุกความถี่เชิงมุม (angular frequency) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เป็น gel-like ของนาโนเซลลูโลส [32]

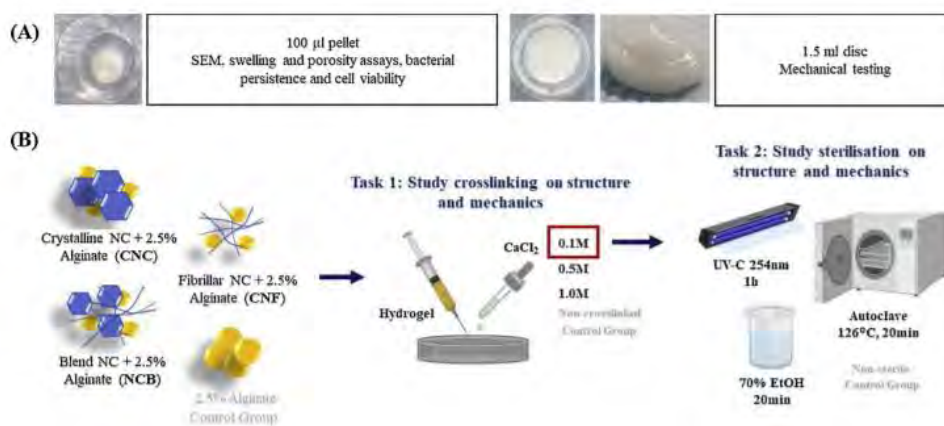
Kaur และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าวโดยกระบวนการทางเคมี ด้วยการใส่สารละลายต่าง (alkali treatment) คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากแกลบ จากนั้นทำการฟอกขาว (bleaching treatment) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเซลลูโลสที่ถูกฟอกขาวไปทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (acid hydrolysis) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการปั่นหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) คงที่ในช่วง

ระหว่าง 5 ถึง 6 ขั้นตอนสุดท้ายเส้นใยเซลลูโลสที่ได้นั้นจะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยวิธีการแช่แข็ง (cryocrushing) โดยใช้ไนโตรเจนเหลวแล้วจึงให้แรงกระทำอย่างรุนแรง ซึ่งจะทำให้ผนังเซลล์แตก และเกิดเป็นนาโนเซลลูโลสที่เป็นผลึก ผลึกนาโนเซลลูโลสที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติความเป็นผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิจึงความร้อน ผลการวิจัยพบว่าพื้นผิวของผลึกนาโนเซลลูโลสมีผิวเรียบ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากับ 76.77 นาโนเมตร มีการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นผลึกภายหลังการสกัดด้วยวิธีทางเคมีทำให้ผลึกนาโนเซลลูโลสกลับมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จากกระบวนการฟอกขาวและการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดทำให้ความเป็นออสันฐานลดลง นอกจากนี้พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะสลายตัวในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน [33]

Ludueña และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ได้จากโรงงานผลิตข้าวในประเทศไทยตอนต้น โดยใช้สารละลายต่างในการกำจัดซิลิกา โดยเริ่มจากการนำแกลบข้าวมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้งที่อุณหภูมิห้องภายใต้การกวนปั่นที่เร็วเพื่อกำจัดดินและสิ่งปนเปื้อน แล้วนำไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่มีลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100 \pm 2$  องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำแกลบที่ผ่านการทำความสะอาดและทำให้แห้งแล้วมาผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตรที่สกัดส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 12 และต้มเป็นเวลา 30 นาที พักของผสมไว้ 1 คืน จากนั้นนำของผสมมากรองล้างด้วยน้ำกลั่น และเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อให้ซิลิกาเกิดการตกตะกอน แล้วนำเยื่อมาต้มด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaClO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยสัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย 1 ต่อ 50 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเยื่อที่เหลืออยู่ผสมกับสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ ( $\text{NaHSO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยสัดส่วนเยื่อต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 50 ภายใต้การปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งเยื่อมีน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยมวลต่อน้ำหนักที่สกัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย 1 ต่อ 50 แช่ไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงล้าง และทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100 \pm 2$  องศาเซลเซียส การเตรียมเยื่อให้ได้เป็นนาโนเซลลูโลสใช้วิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรด โดยเติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยมวล แล้วกวนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเป็นกลาง นำสารละลายของนาโนเซลลูโลสที่ได้เข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำ แล้วจึงทำให้แห้งด้วยเครื่อง liophilizator นำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาทดสอบด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy, X-ray diffractometer, Thermogravimetric analyzer, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope) ผลการศึกษาพบว่านาโน

เซลลูโลสที่เตรียมจากแกลบข้าวมีสีเหลืองอ่อน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $12.4 \pm 4.6$  นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่านาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฝ้ายและป่านศรนารายณ์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $200 \pm 80$  นาโนเมตร และ  $30.9 \pm 12.5$  นาโนเมตร ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy พบว่านาโนเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างคือหมู่ C-H และมีวงอะโรแมติกหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างด้วย นอกจากนี้นาโนเซลลูโลสยังมีความคงทนต่อความร้อนได้ลดลง มีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากการเกิดหมู่ซัลเฟตในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ทำให้ความคงทนต่อความร้อนของผลิตภัณฑ์เซลลูโลสลดน้อยลง [34]

Al-Sabah และคณะ ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูกอ่อน จากนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและการฆ่าเชื้อ



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลจากนาโนเซลลูโลสโดยใช้สารละลายโซเดียมอัลจิเนต และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ [35]

การเตรียมไฮโดรเจลเริ่มจากการนำนาโนเซลลูโลสไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1500 G เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเทน้ำส่วนเกินออกแล้วเติมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ( $C_6H_7NaO_6$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวลต่อปริมาตรในน้ำบริสุทธิ์สูง ด้วยอัตราส่วนเยื่อต่อสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 4 ต่อ 1 ของผสมถูกใส่ลงในภาดหลุมแบบ 24 ช่อง โดยใช้เข็มฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร และหยดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลาร์ ในน้ำบริสุทธิ์สูง เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่ำ และเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจล ไฮโดรเจลจากนาโนเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์จะถูกนำไปฆ่าเชื้อด้วย 3 วิธีที่แตกต่างกันเพื่อทดสอบผลของวิธีการฆ่าเชื้อที่มีต่อโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจล ได้แก่ การใช้เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 126 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที รังสียูวีซีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในตู้ปลอดเชื้อ (laminar flow hood) เป็นเวลา 1

ชั่วโมง และวิธีการแช่แผ่นไฮโดรเจลในเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70 เป็นเวลา 20 นาที กระบวนการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลแสดงในรูปที่ 2.13 จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลที่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ต่างกันมาศึกษาลักษณะพื้นผิว ลักษณะการกระจายตัวของสารเชื่อมขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวมีรูพรุน และการเชื่อมขวางภายในเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสที่ยังไม่ได้เตรียมเป็นไฮโดรเจล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะมีปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดเจลเพิ่มขึ้น ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น และการบวมตัวลดลง จากความแข็งตึงของแผ่นไฮโดรเจลที่เปรียบเทียบโดยใช้ค่างโมดูลัส พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ค่างโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การศึกษาผลของวิธีการฆ่าเชื้อที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่อง ElectroForce 3200 ตามลำดับ พบว่าการฆ่าเชื้อโดยใช้เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อซึ่งมีการแทนที่อากาศก่อให้เกิดความดันทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น ส่วนการฆ่าเชื้อโดยใช้แสงยูวีซีและเอทานอล พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลงซึ่งมีสาเหตุมาจากการจัดเรียง และการแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ของโครงสร้าง รูพรุนที่มีขนาดเล็กลงทำให้สมบัติการบวมตัวของไฮโดรเจลมากขึ้นด้วย โดยที่การฆ่าเชื้อโดยใช้แสงยูวีซีจะได้รูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุด ส่วนสมบัติเชิงกลพบว่าค่างโมดูลัสของแผ่นไฮโดรเจลที่ฆ่าเชื้อด้วยเอทานอลมีค่าสูงสุด เนื่องจากเอทานอลส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำของแผ่นไฮโดรเจลทำให้โครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจลเข้ามาชิดกันมากขึ้นจึงมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบการคงอยู่ของแบคทีเรียพบว่าวิธีการฆ่าเชื้อโดยใช้เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อให้ผลที่ดีที่สุด [35]

Amnuakit และคณะ ได้ศึกษาการนำเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียชนิด *Acetobacter xylinum* มาใช้ในการทำเป็นแผ่นมาร์ก แผ่นมาร์กที่ได้นี้นอกจากจะให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวแล้วยังมีความเป็นพิษต่ำ และเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ การเตรียมเซลลูโลสจากแบคทีเรียทำโดยการให้แบคทีเรียอาศัยอยู่ในอาหารเหลว โดยให้ปลายข้าวเป็นอาหารซึ่งเป็นแหล่งที่มีกลูโคสที่แบคทีเรียจะใช้ในการสังเคราะห์เซลลูโลสออกมา เซลลูโลสที่ได้จะดูดซึมน้ำเอาไว้ และถูกตัดให้เป็นรูปใบหน้าที่มีรูบริเวณดวงตา, จมูก และปากเพื่อนำมาใช้เป็นมาร์ก โดยจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยการนึ่งในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แผ่นมาร์กที่ได้มีความโปร่งแสง และมีปริมาณน้ำอยู่มาก เมื่อทำการทดสอบกับกลุ่มอาสาสมัครคนไทยที่มีสุขภาพดีในช่วงอายุ 21 ถึง 30 ปี จำนวน 30 คน เพื่อทดสอบผลของมาร์กที่มีต่อลักษณะของผิวหนังของกลุ่มอาสาสมัคร โดยก่อนการทดสอบจริงมีการทดสอบการแพ้โดยติดแผ่นมาร์กไว้ที่ท้องแขนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และไม่พบการแพ้ในกลุ่มอาสาสมัครทั้ง 30 คน หลังจากนั้นทดสอบผลของมาร์กโดยใช้แผ่นมาร์กที่ผลิตได้แปะไว้ที่หน้าเป็นเวลา 25 นาที ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบผิวหนังหลังการใช้แผ่นมาร์กพบว่า กลุ่มอาสาสมัครมีความชุ่มชื้นของผิวหนังเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 7-28 [36]

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุ วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แกลบข้าวพันธุ์ข้าวหอมปทุม จากโรงสีชุมชนเสงเจริญทรัพย์ กรุงเทพมหานคร
2. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaClO}_2$ )
5. สารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ ( $\text{NaHSO}_3$ )
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
7. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
8. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ )
9. สารละลายโซเดียมอัลจีเนต ( $\text{C}_6\text{H}_7\text{NaO}_6$ )
10. น้ำ DI (Deionized water)
11. น้ำกลั่น (Distilled water)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ปีกเกอร์ (beaker)
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. จานเพาะเชื้อ (petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร
4. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance)
5. เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
6. หลอดเซนติฟิว (centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิเมตร

7. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave)
8. ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
9. เครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใช้ความดันสูง (microfluidizer)
10. เครื่องปั่นความเร็วสูง (high speed blender)
11. โถดูดความชื้น (desiccator)

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การทดสอบ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) (JSM-6480LV; JEOL, Tokyo, Japan)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) (JEM-2100; JEOL, Tokyo, Japan)
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) (AXS-D8; Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany)
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) (Nicolet 6700; Thermo Fisher Scientific, MA)
5. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA) (TGA/DSC 3+ STAR<sup>e</sup> System; Mettler Toledo GmbH, Greifensee)
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) (5ST; Tinius Olsen TMC, PA)
7. เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (AccuSpin 400; Thermal Fisher Scientific, MA)



### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมนานโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว

##### 3.4.1.1 การเตรียมแกลบ

นำแกลบที่ผ่านการแยกขนาดด้วยตะแกรงที่มีขนาด 20x20 ช่องต่อตารางนิ้ว (เบอร์ 20) มาล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้งที่อุณหภูมิห้องภายใต้การกวนปั่นเพื่อกำจัดดินและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60±2 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาด้วยโถดูดความชื้น

##### 3.4.1.2 การกำจัดซัลฟิคาและเฮมิเซลลูโลส (alkaline Treatment)

นำแกลบที่ผ่านการทำความสะอาดมาต้มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อสารละลาย (liquor ratio) เท่ากับ 1 ต่อ 12 ในบีกเกอร์ขนาด 2000 ml และให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 500 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และพักของผสมไว้ 1 คืน จากนั้นนำของผสมมาล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้งจนค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นกลาง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลส

นำแกลบที่ผ่านการกำจัดเฮมิเซลลูโลส เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อให้ซัลฟิคาเกิดการตกตะกอน จากนั้นนำมากรองล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้งจนค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นกลาง

##### 3.4.1.3 การกำจัดลิกนิน (delignification)

นำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.4.1.2 มาผสมกับสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ ( $\text{NaHSO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ที่สัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 20 ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกรองล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง จนค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นกลาง

##### 3.4.1.4 การฟอกขาว (bleaching treatment)

เตรียมสารละลายสำหรับฟอกขาวโดยการผสมสารละลายโซเดียมคลอไรต์ ( $\text{NaClO}_2$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยมวลต่อปริมาตร และกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เพื่อให้สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 3-4

นำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.4.1.3 มาฟอกขาวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยสัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย 1 ต่อ 20 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และกรองล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นกลาง โดยทำขั้นตอนการฟอกขาวซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

### 3.4.1.5 การปั่นเยื่อเซลลูโลสแกลบด้วยความเร็วสูง (High Speed Agitation)

ใช้เครื่องปั่นความเร็วสูงเพื่อใช้ในการกระจายเยื่อเซลลูโลสจากแกลบที่ได้มีการกำจัดลิกนินออกไปแล้ว โดยเตรียมความเข้มข้นของเยื่อเซลลูโลสจากแกลบร้อยละ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นทำการปั่นในเครื่องปั่นความเร็วสูง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 38,000 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 10 นาที

### 3.4.1.6 การผลิตเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสโดยใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใช้ความดันสูง (microfluidizer)

นำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.4.1.5 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ผ่านเข้าสู่เครื่องลดขนาดอนุภาคที่ความดัน 20,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เป็นเวลา 60 นาที ในระหว่างลดขนาดอนุภาคของระบบจะถูกควบคุมที่ 25 องศาเซลเซียส เก็บสารแขวนลอยเส้นใยนาโนเซลลูโลสไว้ในตู้เย็น (4-8 องศาเซลเซียส) เพื่อใช้ในการทดลอง และการทดสอบในขั้นต่อไป

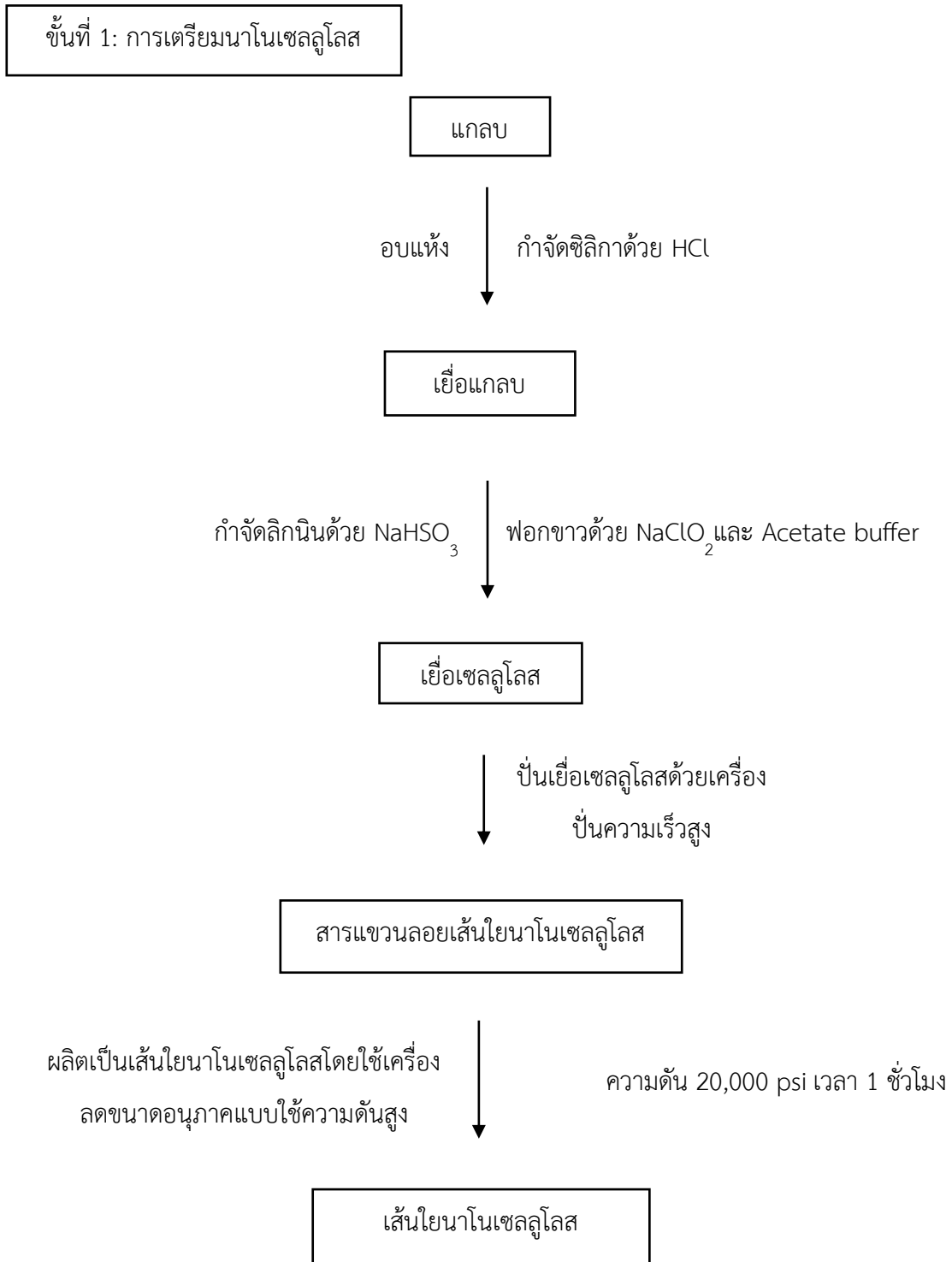
### 3.4.2 การเตรียมแผ่นมาร์กจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว

นำสารแขวนลอยของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ใส่ในหลอดเซนติฟิวขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 4 หลอด แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง ด้วยอัตราเร็ว 4000 rpm เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นเหวี่ยงส่วนเกินออกจะได้สารแขวนลอยของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมอัลจินเตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับสารแขวนลอยของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่สัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 ตามลำดับ

เทสารละลายผสมในข้างต้น ลงในงานเพาะเชื้อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร 5 งาน แต่ละงานหยดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.20, 0.40 และ 0.80 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยกระจายทั่วทั้งงานเพาะเชื้อ จากนั้นตั้งงานเพาะเชื้อแก้ว ไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางของนาโนเซลลูโลสเกิดเป็นแผ่นไฮโดรเจล แล้วเทสารละลายส่วนเกินออก นำแผ่นไฮโดรเจลแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ส่วนเกินออก

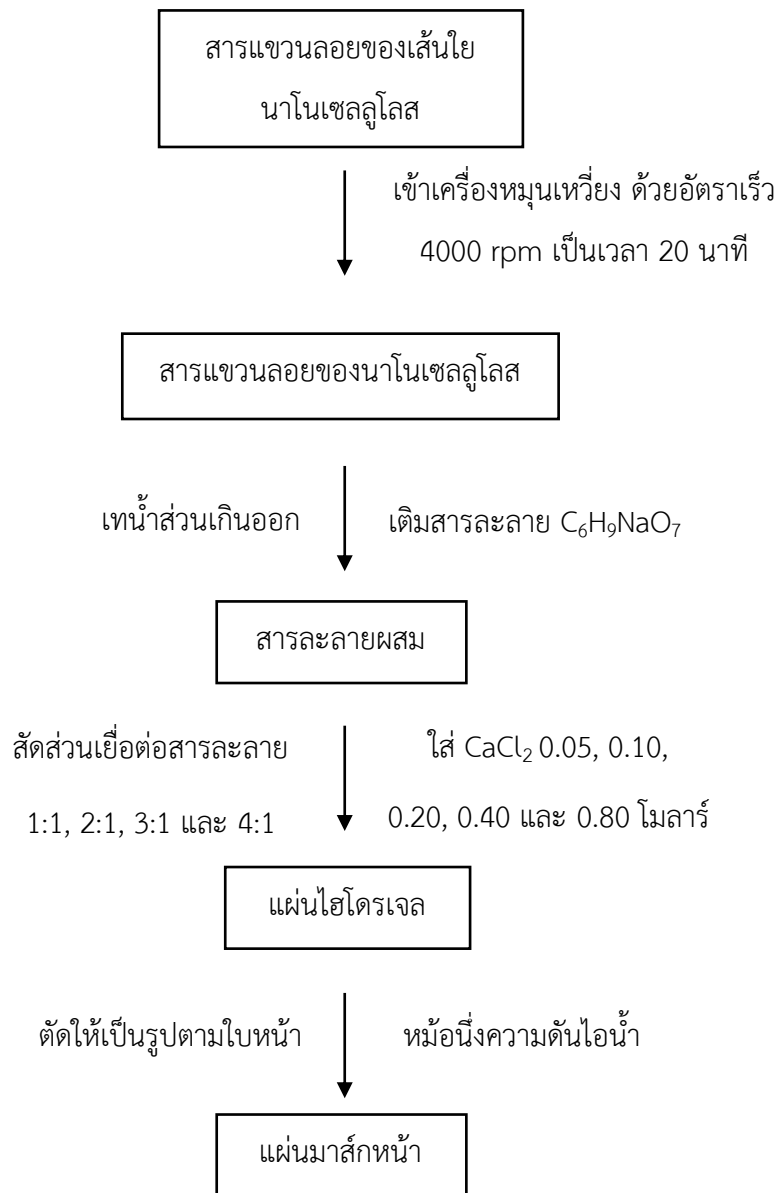
### 3.4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1. ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.05, 0.10, 0.20, 0.40 และ 0.80 โมลาร์
2. สัดส่วนของสารแขวนลอยของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจินเต 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการเตรียมนาโนเซลลูโลส

ขั้นที่ 2: การเตรียมแผ่นมาสก์จากเส้นใยนาโนเซลลูโลส



รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการเตรียมแผ่นมาสก์จากเส้นใยนาโนเซลลูโลส

### 3.4.4 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว

#### 3.4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เคลือบตัวอย่างด้วยทองผสมด้วยพลาสมาเดิมก่อนทำการวิเคราะห์ ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน (accelerating voltage) คือ 5 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยาย 50X 200X และ 2,000X เท่าตามลำดับ

#### 3.4.4.2 ความเป็นผลึก

ศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) โดยใช้วิเคราะห์ด้วยความยาวคลื่น 1.54 นาโนเมตร โดยใช้ค่า  $\text{CuK}\alpha$  ที่มุม  $2\theta$  ในช่วง 5 ถึง 40 องศา ความต่างศักย์และกระแสที่ใช้คือ 40 กิโลโวลต์ และ 15 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ

ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย (Crystallinity Index, CrI) คำนวณได้จากสมการของ Segal ดังนี้

$$\text{CrI} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}}$$

โดย  $I_{002}$  คือค่า Intensity ที่สูงที่สุดซึ่งอยู่ในช่วงที่  $2\theta$  มีค่าประมาณ 22.0 ถึง 22.5 องศา และ  $I_{am}$  คือค่า Intensity ที่ต่ำที่สุดซึ่งอยู่ในช่วงที่  $2\theta$  มีค่าประมาณ 18.0 ถึง 18.5 องศา ค่าที่คำนวณได้คูณ 100 จะได้ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในหน่วยร้อยละ

#### 3.4.4.3 หมู่ฟังก์ชัน

ใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry: FT-IR) โดยนำสารตัวอย่างที่แห้งบดผสมกับโปแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) และกดอัดให้เป็นแผ่นโปร่งแสง แล้วนำไปวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $400 \text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4,000 \text{ cm}^{-1}$  ที่มีความละเอียด  $16 \text{ cm}^{-1}$  และจำนวนการสแกนเท่ากับ 64

#### 3.4.4.4 เสถียรภาพทางความร้อน

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือพฤติกรรมความร้อนของตัวอย่าง ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA) ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

### 3.4.5 การวิเคราะห์ และการทดสอบสมบัติแผ่นมาร์กจากนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว

#### 3.4.5.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความเป็นพิษ (biocompatibility and toxicity)

ศึกษาความเข้ากันได้ของแผ่นมาร์กด้วยวิธีการ MTT assay ทำการทดสอบนำตัวอย่างแผ่นมาร์กตัดเป็นชิ้นเล็กๆและวางลงบนจานเพาะเชื้อโดยนำมาเลี้ยงกับเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของหนู (mouse fibroblast cell line L929) ในการทดสอบสังเกตการเปลี่ยนสีของสารละลาย MTT กลายเป็นสารละลาย purple formazan ที่มีสีม่วง วัดค่าความทึบแสง (opacity density, OD) ที่ค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงในช่วง 540 ถึง 570 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ผลที่ได้สามารถหาเปอร์เซ็นต์ของสิ่งมีชีวิตได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ Viability cell} = \frac{OD_{\text{sample}}}{OD_{\text{control}}} \times 100$$

โดย % Viability cell คือร้อยละของเซลล์ที่มีชีวิตอยู่

$OD_{\text{sample}}$  คือค่าความทึบแสงของตัวอย่าง

$OD_{\text{control}}$  คือค่าความทึบแสงของชุดควบคุม

#### 3.4.5.2 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water retention)

ศึกษาความสามารถในการดูดซับความชื้น ทำการทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน TAPPI UM 256 วัดค่าปริมาณความชื้น (moisture content) ตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจล ซึ่งมีขั้นตอนในการหา 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกการหาน้ำตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจลที่ได้แช่ในน้ำแล้วชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง บันทึกค่าน้ำหนักแผ่นไฮโดรเจลที่ขณะเปียก หลังจากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนทำให้มวลคงที่ และชั่งน้ำหนักบันทึกค่าน้ำหนักแผ่นไฮโดรเจลที่แห้ง คำนวณหาค่าการอุ้มน้ำของแผ่นไฮโดรเจล (water retention value, WRV) ตามสมการดังนี้

$$WRV = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{wet}}} \times 100\%$$

$W_{\text{wet}}$  คือ น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (กรัม)

$W_{\text{dry}}$  คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังการอบ (กรัม)

### 3.5 ตารางการดำเนินการ

การดำเนินงานมีระยะเวลาศึกษาเดือนกุมภาพันธ์ 2563 ถึง เดือนพฤษภาคม 2564 รวมเป็นระยะเวลา 16 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัยในช่วงเวลาต่าง ๆ

| รายละเอียด   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 1. ค้นคว้าข้อมูลเพื่อเลือกหัวข้อที่สนใจศึกษา         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 3. จัดทำรายงานและนำเสนอความก้าวหน้า                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 4. เตรียมอุปกรณ์ วัสดุ และสารเคมี                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 5. ทดลองสกัดเซลล์โลสจากแกลบข้าว                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 6. ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเซลล์โลสจากแกลบข้าว |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 7. นำเสนอความก้าวหน้า                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 8. ทดลองเตรียมเส้นใยนาโนเซลล์โลสจากแกลบข้าว          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 9. ทดสอบสมบัติเคมีและกายภาพของเส้นใยนาโนเซลล์โลส     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 10. ทดลองเตรียมแผ่นไฮโดรเจลจากเส้นใยนาโนเซลล์โลส     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |

| รายละเอียด   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 11. ทดสอบสมบัติเคมี<br>กายภาพ และเชิงกลของ<br>แผ่นไฮโดรเจล |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 12. สรุปผลและจัดทำ<br>รายงานฉบับสมบูรณ์                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| 13. นำเสนอ   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการเตรียมเซลล์ูโลสจากแกลบข้าว

##### 4.1.1 การกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลล์ูโลส

จากการเตรียมแกลบข้าวที่ผ่านการแยกขนาดด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาด 20 ช่องต่อตารางนิ้ว จากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส จะได้แกลบข้าว แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แกลบข้าวที่ผ่านการแยกด้วยตะแกรงร้อน

จากการเตรียมเซลล์ูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านการคัดแยกขนาด โดยการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลล์ูโลส ด้วยวิธีการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลล์ูโลส (alkaline treatment) ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 12 และให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 500 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร พบว่า แกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลล์ูโลส แล้วมีสีน้ำตาลเข้ม แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยสีที่เข้มขึ้นเกิดจากการที่องค์ประกอบของเซลล์ูโลสมีลิกนินอยู่ [34]



รูปที่ 4.2 แกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลล์ูโลส

#### 4.1.2 การกำจัดลิกนิน

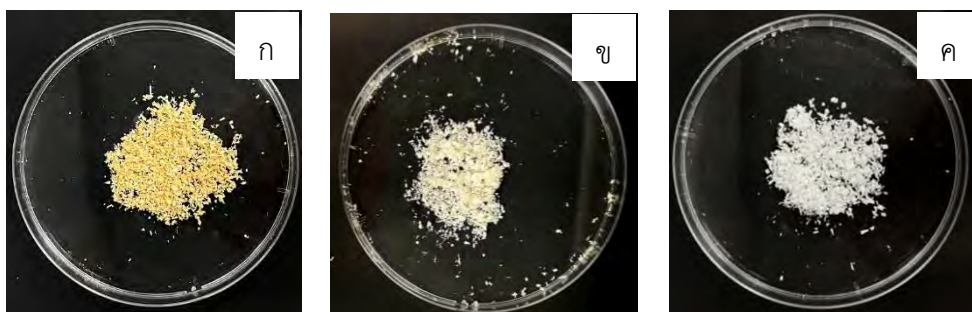
การกำจัดลิกนินจากเยื่อแกลบที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่สัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 20 โดยทำการกำจัดลิกนินที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเยื่อแกลบที่ผ่านการกำจัดลิกนินมีสีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 4.3 โดยสีที่อ่อนลงของเยื่อแกลบเมื่อเปรียบเทียบกับแกลบที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส เกิดจากการที่องค์ประกอบลิกนินได้ถูกกำจัดออกไป [34]



รูปที่ 4.3 แกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดลิกนิน

#### 4.1.3 การฟอกขาว

จากการฟอกขาวแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการกำจัดซิลิกา เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการเติมกรดอะซิติกเพื่อให้สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 3-4 ในการฟอกจะทำการกำหนดสัดส่วนเยื่อต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 20 โดยทำการฟอกขาวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จำนวน 3 รอบ พบว่าเส้นใยไมโครเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการฟอกมีสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยสีของเส้นใยไมโครเซลลูโลสที่เปลี่ยนเป็นสีขาว เกิดจากการที่ไฮโปคลอไรต์ไอออน (hypochlorite ion) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของโซเดียมคลอไรต์ ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารที่มีหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งเป็นสารที่มีสี ได้แก่ วงแหวนฟีนอลิก และหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้างของลิกนิน เปลี่ยนให้ลิกนินกลายเป็นสารที่ไม่มีสี [37]



รูปที่ 4.4 เส้นใยไมโครเซลลูโลสจากแกลบที่ผ่านการฟอกขาว จำนวน 1 รอบ (ก) 2 รอบ (ข) และ 3 รอบ (ค)

## 4.2 ผลการเตรียมนาโนเซลลูโลส

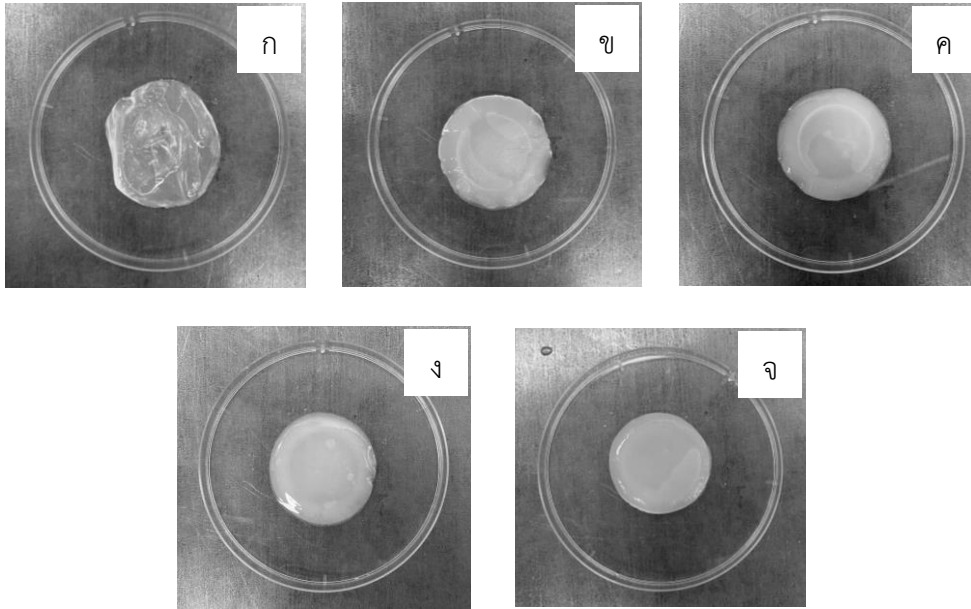
จากการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากสารละลายไมโครเซลลูโลสแขวนลอยความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ที่ความดัน 20,000 psi เป็นเวลา 60 นาที พบว่านาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้ มีลักษณะคล้ายเจลที่มีสีขาวขุ่น และไม่สามารถมองเห็นเป็นเส้นใยได้ด้วยตาเปล่า แสดงดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสถูกลดขนาดด้วยแรงเชิงกลให้มีระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นระดับที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 4.5 นาโนเซลลูโลส

## 4.3 ผลการขึ้นรูปแผ่นไฮโดรเจล

จากการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.05 0.10 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์ ตามลำดับ และสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีลักษณะคือ ผิวเรียบสีขาว โปร่งแสง และมีความเย็น โดยแผ่นไฮโดรเจลจะมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น และแผ่นไฮโดรเจลจะสามารถขึ้นรูปให้เรียบได้ง่ายขึ้น และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6

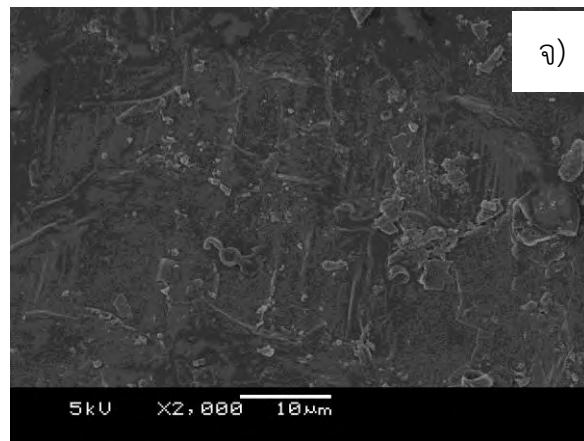
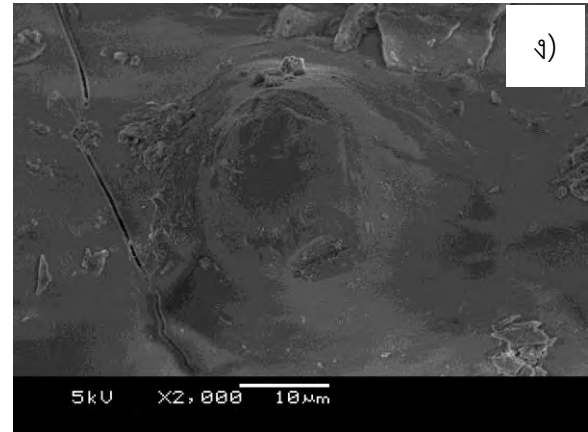
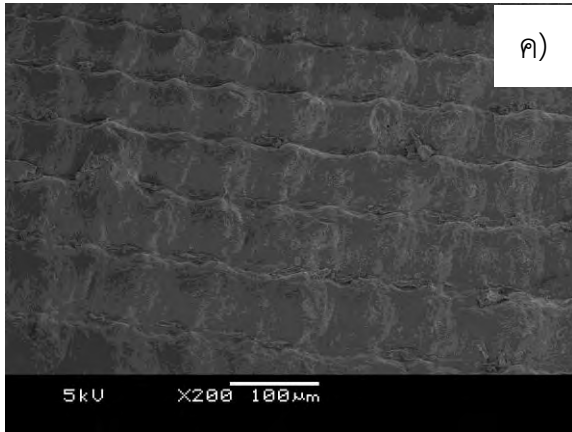
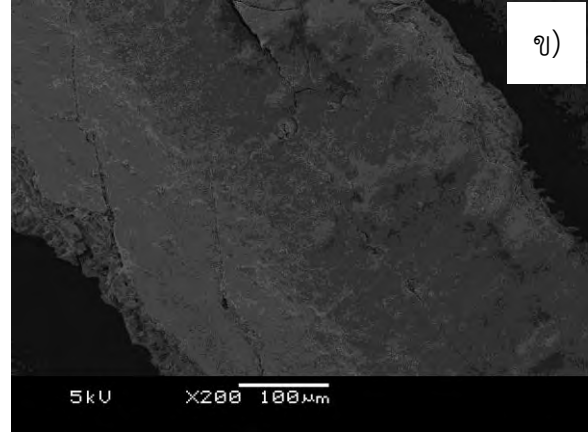
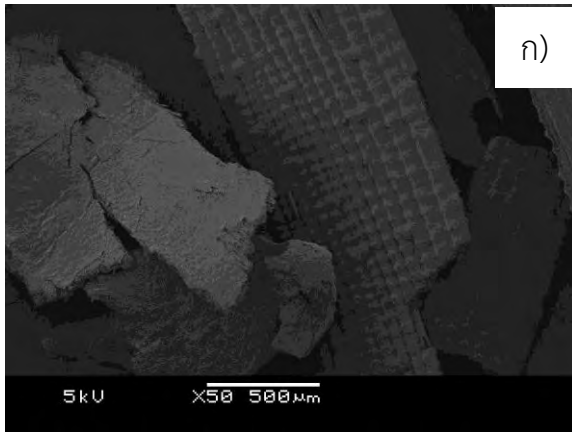


รูปที่ 4.6 แผ่นไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (ก) และแผ่นไฮโดรเจลผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต โดยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 (ข) 2:1 (ค) 3:1 (ง) และ 4:1 (จ) โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์

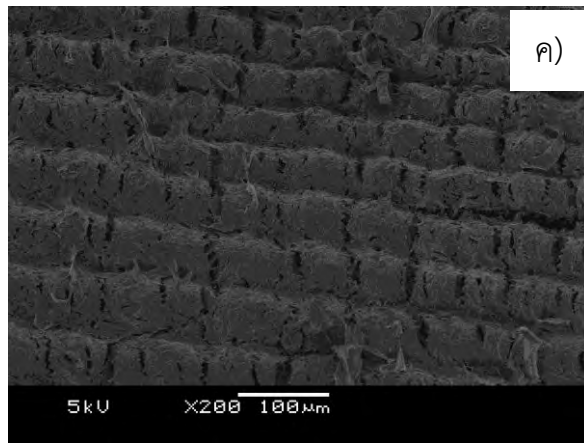
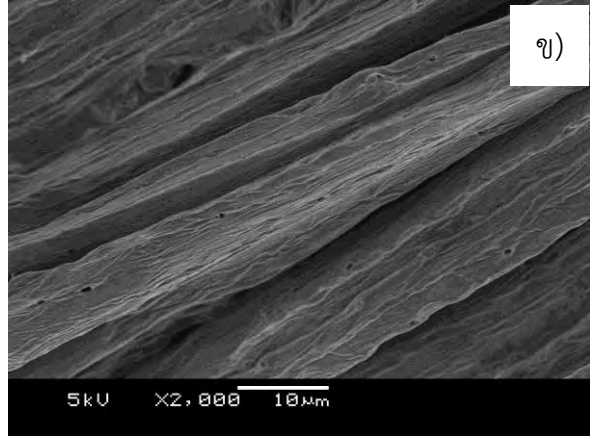
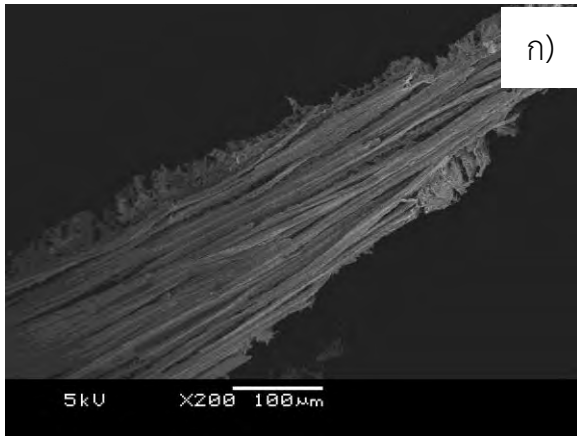
#### 4.4 การวิเคราะห์สมบัตินาโนเซลลูโลส

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา

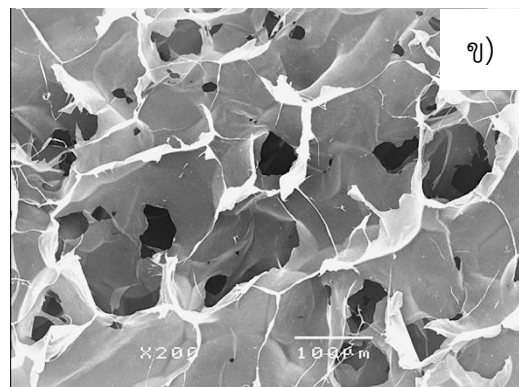
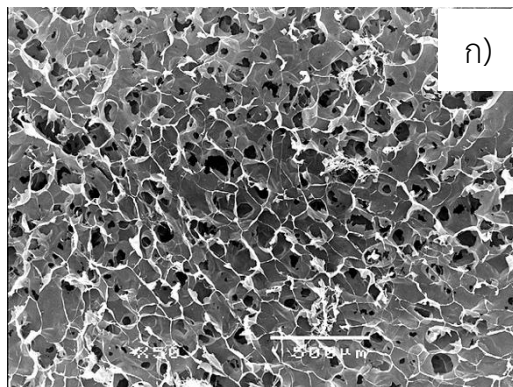
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการฟอกขาวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวด้านในของเกลบข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ มีลักษณะเรียบ ในขณะที่พื้นผิวด้านนอก มีความขรุขระสังเกตเห็นเป็นพื้นผิวที่นูนขึ้นมาเป็นสันเรียงเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งประกอบด้วยยอดที่มีลักษณะเป็นโดมเรียงเว้นระยะห่างกัน โดยพบซิลิกาที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกมากกว่าบริเวณอื่น ๆ สังเกตได้จากผลึกกลมสีขาวที่พบบริเวณพื้นผิวด้านนอก ส่งผลให้เกลบข้าวมีความแข็ง ในขณะที่พื้นผิวของเส้นใยไมโครเซลลูโลสจากเกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการฟอกขาว มีลักษณะที่แตกออกเป็นเส้น รวมถึงบริเวณแนวสันและยอดโดมถูกทำให้แตกออกจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ซิลิกา และลิกนิน และเมื่อสกัดเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเกลบข้าวทำให้ขนาดเล็กลง [34]



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของแกลบข้าว พื้นผิวด้านในและด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก), พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข), พื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค) และพื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ง-จ)



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการฟอกขาว: พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ก), พื้นผิวด้านในของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 2000 เท่า (ข) และพื้นผิวด้านนอกของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค)



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว: พื้นผิวของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) และพื้นผิวของแกลบข้าวที่กำลังขยาย 200 เท่า (ข)

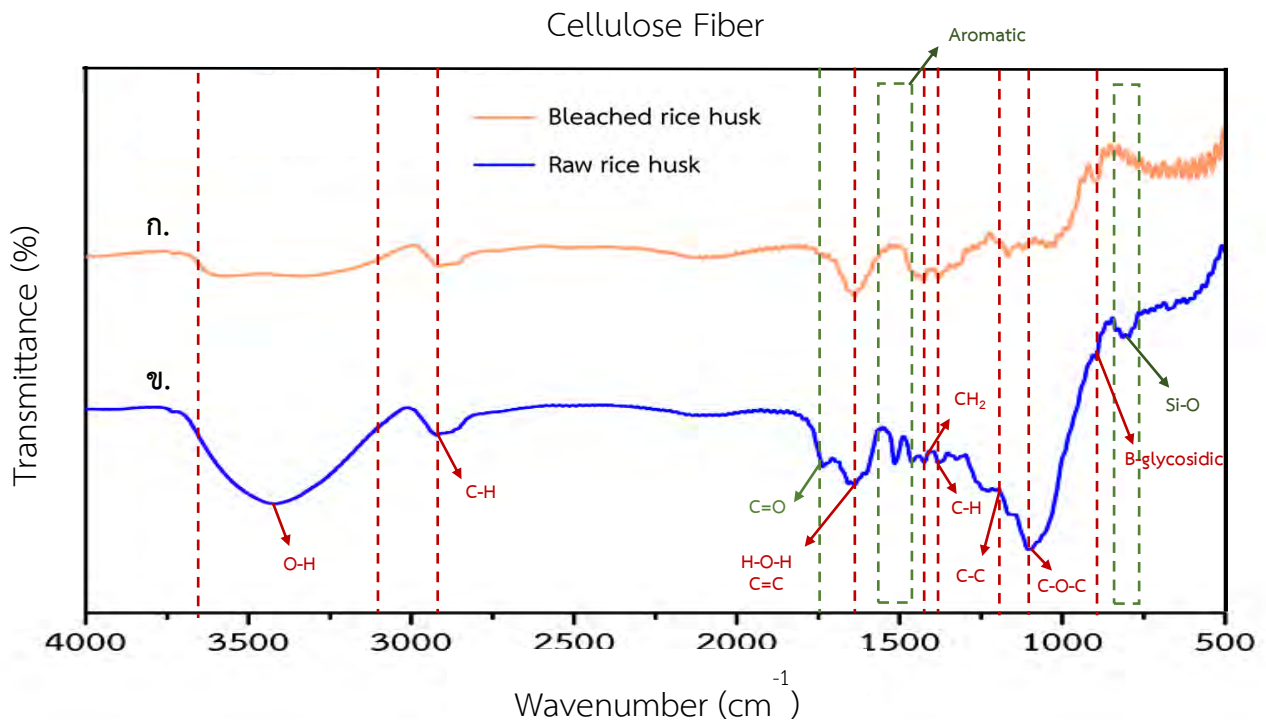
#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ได้ผลสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยสเปกตรัมของแอลบข้าว และเซลลูโลสจากแอลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนินและการฟอกขาว ในเส้น ก. และ เส้น ข. โดยที่เลขคลื่นที่ประมาณ 3700 ถึง 3200  $\text{cm}^{-1}$  มีพีคที่มีลักษณะกว้างแสดงถึงการสั่นของหมู่ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส และเลขคลื่นที่ประมาณ 2900  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-H ของหมู่เมทิลในเซลลูโลส เนื่องจากการดูดความชื้นแสดงให้เห็นถึงน้ำที่ถูกดูดซับในเซลลูโลสจากการสั่นของหมู่ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลที่พีคประมาณ 1600  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งในบริเวณเลขคลื่นที่ประมาณ 1300 ถึง 1400  $\text{cm}^{-1}$  จะแสดงพีคของ  $\text{CH}_2$  และ C-H ตามลำดับ และการสั่นของหมู่ C-O-C ของวงแหวนพาราโนสและพันธะปีตาไกลโคซิดิก (b-glycosidic) ของโครงสร้างเซลลูโลสแสดงที่เลขคลื่นประมาณ 1030 ถึง 1160  $\text{cm}^{-1}$  และ 890  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ [38]

โดยผลอินฟราเรดสเปกตรัมของแอลบข้าว ในเส้น ก. ที่เลขคลื่นประมาณ 1700  $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงการสั่นแบบยืดของ C=O ของหมู่เอสเทอร์ที่พบได้ในเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และที่บริเวณเลขคลื่นที่ 800  $\text{cm}^{-1}$  แสดงพีคของหมู่ Si-O ของหมู่ไซลานอลที่พบได้ในซิลิกา จึงสรุปได้ว่าในแอลบมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกา ซึ่งในกระบวนการเตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสจะต้องกำจัดในลำดับถัดไป

สำหรับเซลลูโลสจากแอลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนิน และการฟอกขาว ในเส้น ข. ผลอินฟราเรดสเปกตรัมผลคล้ายคลึงกับแอลบข้าว แต่จุดเด่นคือการทำเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกาได้ถูกกำจัดออกไป นั่นคือบริเวณคลื่นที่ประมาณ 1700 และ 800  $\text{cm}^{-1}$  หมู่เอสเทอร์ที่พบได้ในเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและหมู่ไซลานอลที่พบได้ในซิลิกาได้ถูกกำจัดออกไป และพีคที่ประมาณ 1500  $\text{cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงวงอะโรมาติกของลิกนินได้หายไป แต่จะแสดงเพียงพีคของ  $\text{CH}_2$  และ C-H ที่ประมาณเลขคลื่นที่ 1300 ถึง 1400  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งจะสื่อถึงโครงสร้างผลึกและอสัณฐานของเซลลูโลส [39]





รูปที่ 4.10 ผลสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแกลบข้าว (ก.) และ เส้นใยไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนิน และการฟอกขาว (ข.)

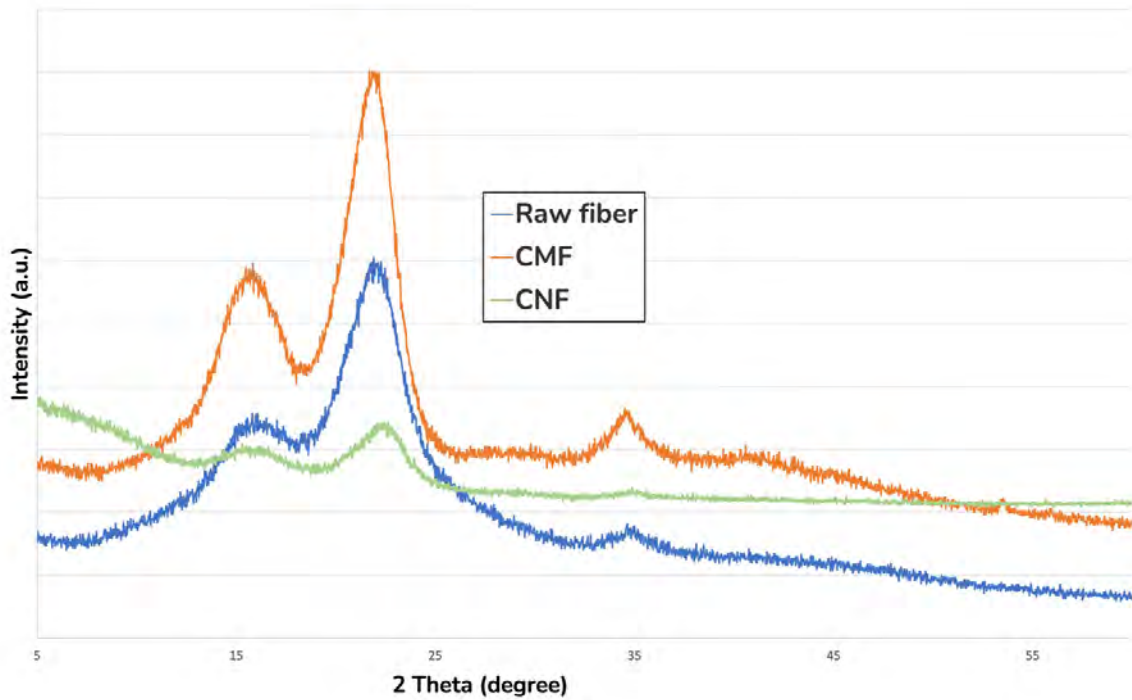
#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลส จากแกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนินและการฟอกขาว ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับค่าความเป็นผลึกของแกลบข้าวและเซลลูโลสดังกล่าวคำนวณจากสมการของ Segal แสดงในตารางที่ 4.1

แกลบข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี มีความเป็นผลึกประมาณ 52% ส่วนเส้นใยไมโครเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนินและการฟอกขาว มีความเป็นผลึกประมาณ 62% และเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีความเป็นผลึกประมาณ 57%

เส้นใยไมโครเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทางเคมีมีค่าความเป็นผลึกสูงกว่าแกลบข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี เนื่องจากกระบวนการทางเคมีทำให้มีการกำจัดส่วนประกอบที่เป็นอสัณฐาน ได้แก่ ซิลิกา ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ออกจากเส้นใย แต่เส้นใยนาโนเซลลูโลสมีค่าความเป็นผลึกต่ำกว่าเส้นใยไมโครเซลลูโลส เนื่องจากกระบวนการสกัดในระดับนาโนด้วยวิธีเชิงกลโดยใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใช้ความดันสูงทำให้เกิดแรงเฉือนสูงทำลายผลึกบางส่วนของเซลลูโลส [40]





รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านการกำจัดซิลิกาและเฮมิเซลลูโลส การกำจัดลิกนินและการฟอกขาว

ตารางที่ 4.1 ความเป็นผลึกของแกลบข้าว เส้นใยไมโครเซลลูโลส และเส้นใยนาโนเซลลูโลส

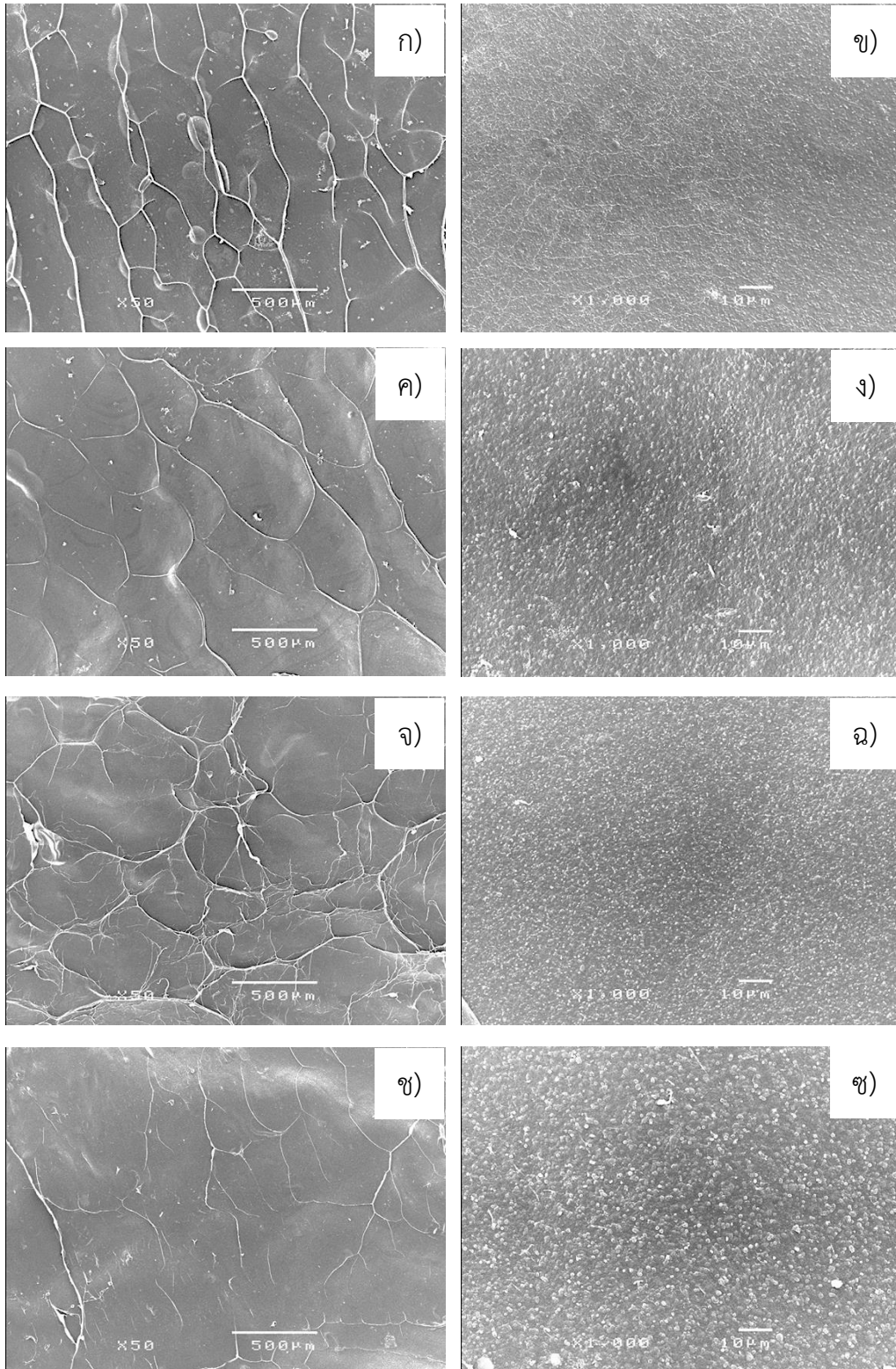
| ตัวอย่าง      | Intensity (count) |           | ค่าความเป็นผลึก(%) |
|---------------|-------------------|-----------|--------------------|
|               | $I_{am}$          | $I_{002}$ |                    |
| Raw rice husk | 1458              | 3024      | 51.8               |
| CMF           | 1519              | 4012      | 62.1               |
| CNF           | 303               | 711       | 57.4               |

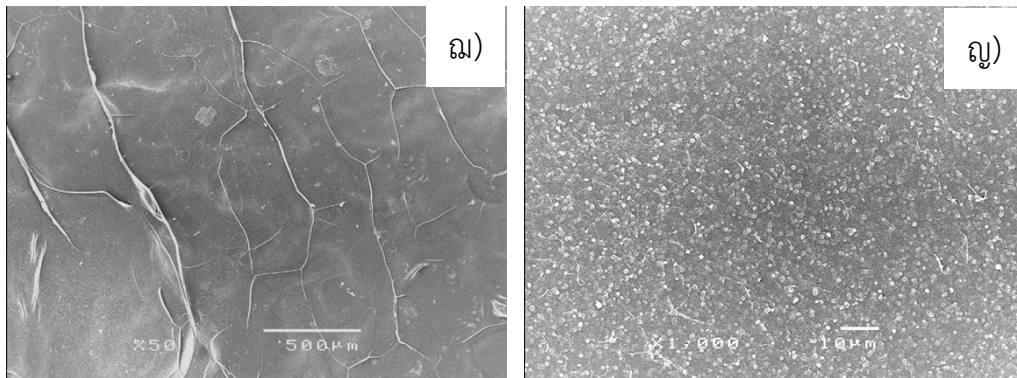
#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติแผ่นไฮโดรเจล

##### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

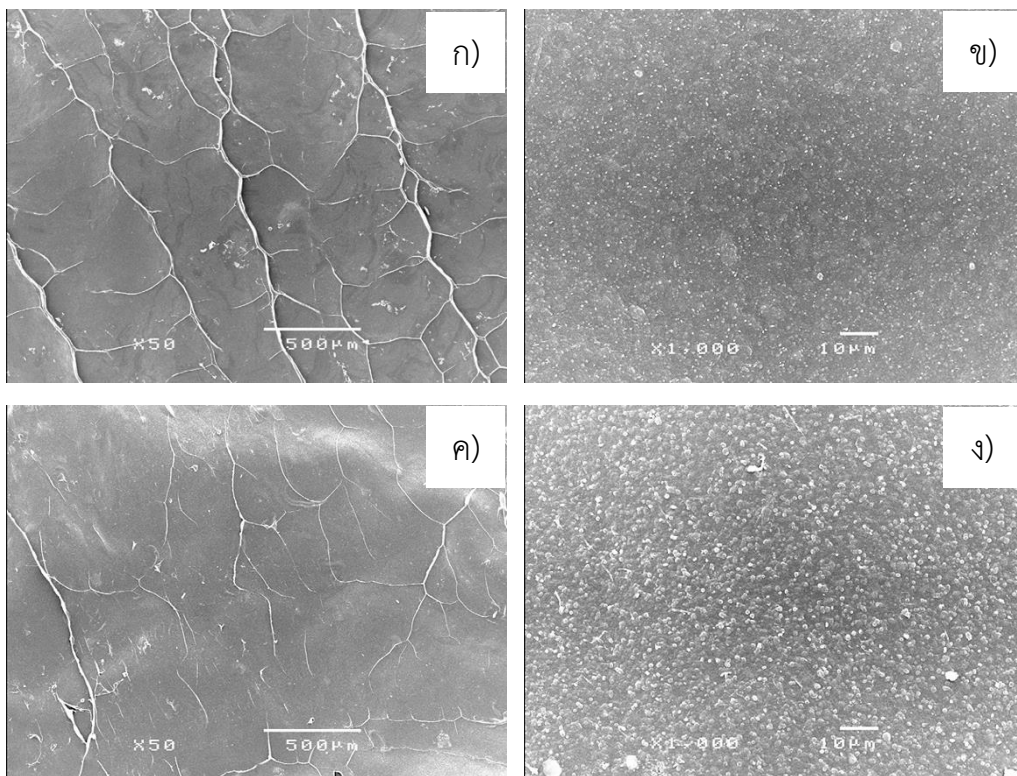
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสและสารละลายโซเดียมอัลจิเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 พบว่าพื้นผิวมีรูพรุนจำนวนมาก และขนาดของรูพรุนเล็กลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโซเดียมอัลจิเนตที่หนาแน่นขึ้น

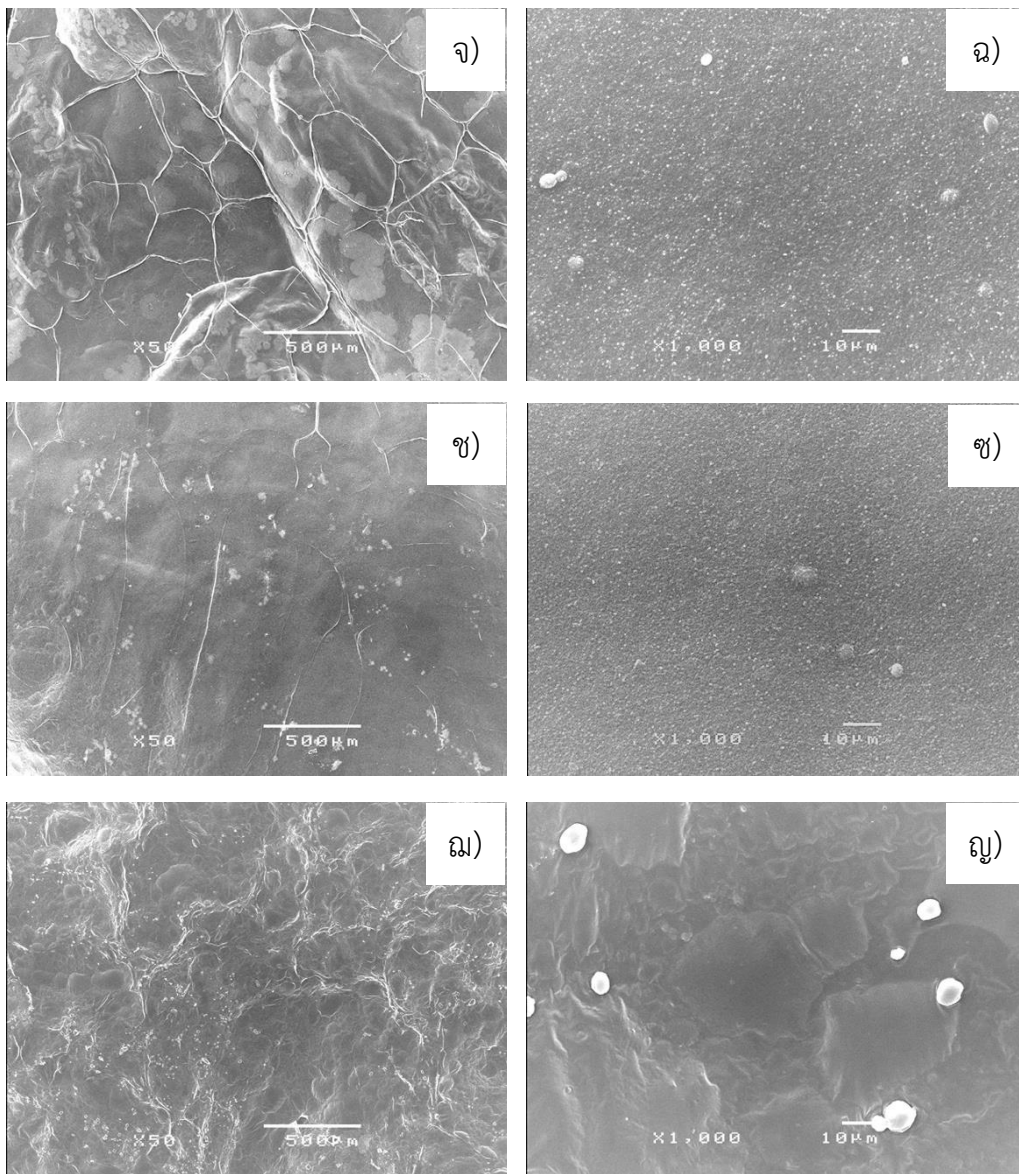
และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตพบว่าเมื่อสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น รูปทรงมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสเข้าไปแทรกกระหว่างช่องว่างของโครงร่างตาข่ายของโซเดียมอัลจิเนต ทำให้ช่องว่างระหว่างโครงข่ายมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น





รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ก-ข) และสัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ค-ง), สัดส่วน 2:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (จ-ฉ), สัดส่วน 3:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ-ซ) และสัดส่วน 4:1 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ฉ-ญ) ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์





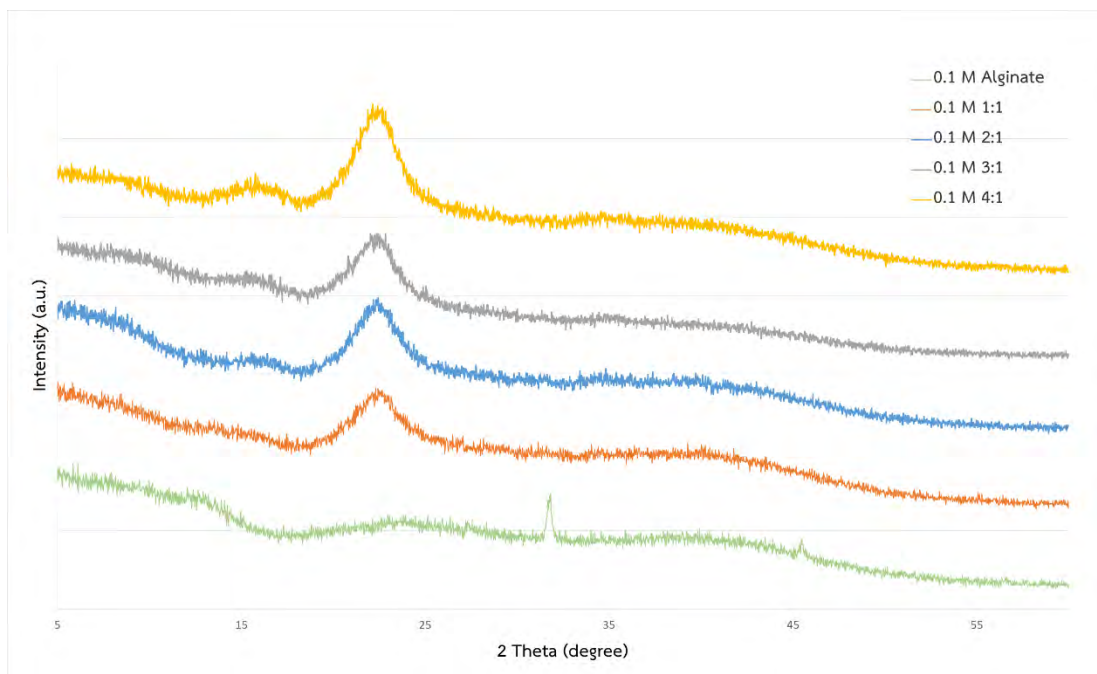
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 3:1 ที่ความเข้มข้นของสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์คือ 0.05 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ก-ข), ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ค-ง), ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (จ-ฉ), ความเข้มข้น 0.40 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ช-ช), และความเข้มข้น 0.80 โมลาร์ ที่กำลังขยาย 50 เท่า และกำลังขยาย 1000 เท่า (ฉ-ญ) ตามลำดับ

#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสและสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 สำหรับค่าความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลดังกล่าวคำนวณจากสมการของ Segal แสดงในตารางที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.3

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต พบว่าสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสต่อโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเป็นผลึกมากที่สุดคือ 4:1 โดยมีค่าความเป็นผลึกประมาณ 56% และค่าความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจะลดลงเมื่อสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสลดลง เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีความเป็นอสัณฐานที่มาก ส่วนเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นผลึกสูงจากการที่ได้ถูกกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐานในกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน พบว่าที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ แผ่นไฮโดรเจลมีค่าความเป็นผลึกสูงที่สุดประมาณ 61% และค่าความเป็นผลึกลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโซเดียมอัลจิเนตที่รวดเร็ว ทำให้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น



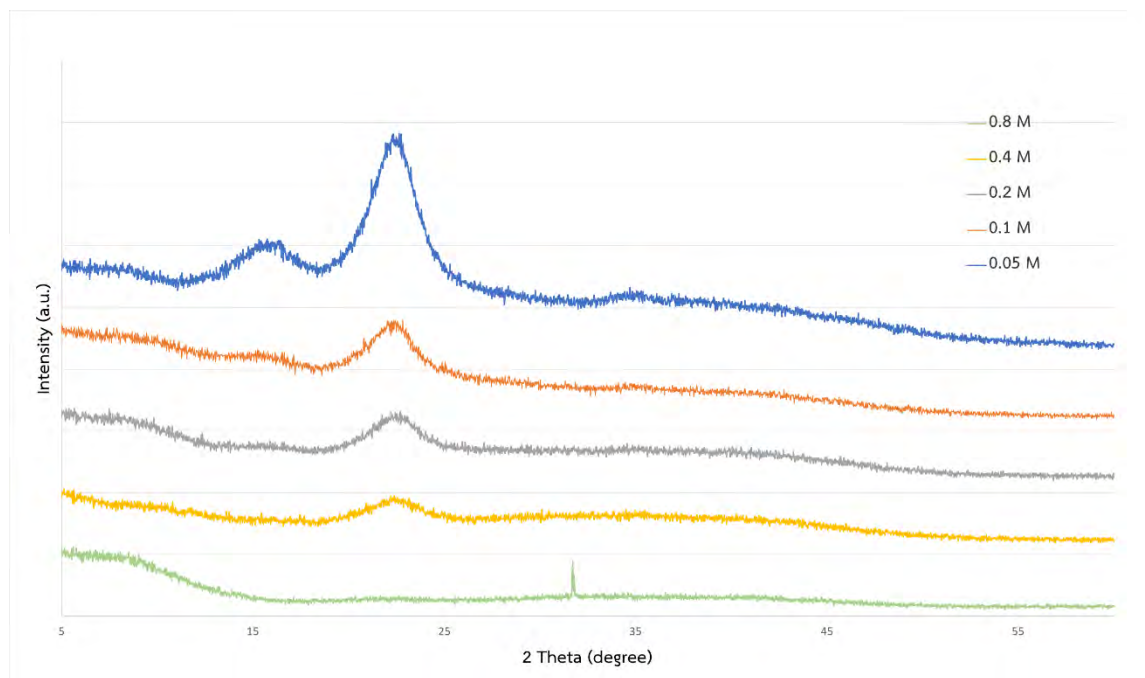
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนตและแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ

โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์



ตารางที่ 4.2 ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต และแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 โดยความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์

| ตัวอย่าง  | Intensity (count) |           | ค่าความเป็นผลึก(%) |
|-----------|-------------------|-----------|--------------------|
|           | $I_{am}$          | $I_{002}$ |                    |
| 0.1 M 1:0 | 417               | 606       | 31.2               |
| 0.1 M 1:1 | 485               | 912       | 46.8               |
| 0.1 M 2:1 | 458               | 987       | 53.6               |
| 0.1 M 3:1 | 459               | 898       | 48.9               |
| 0.1 M 4:1 | 537               | 1221      | 56.0               |



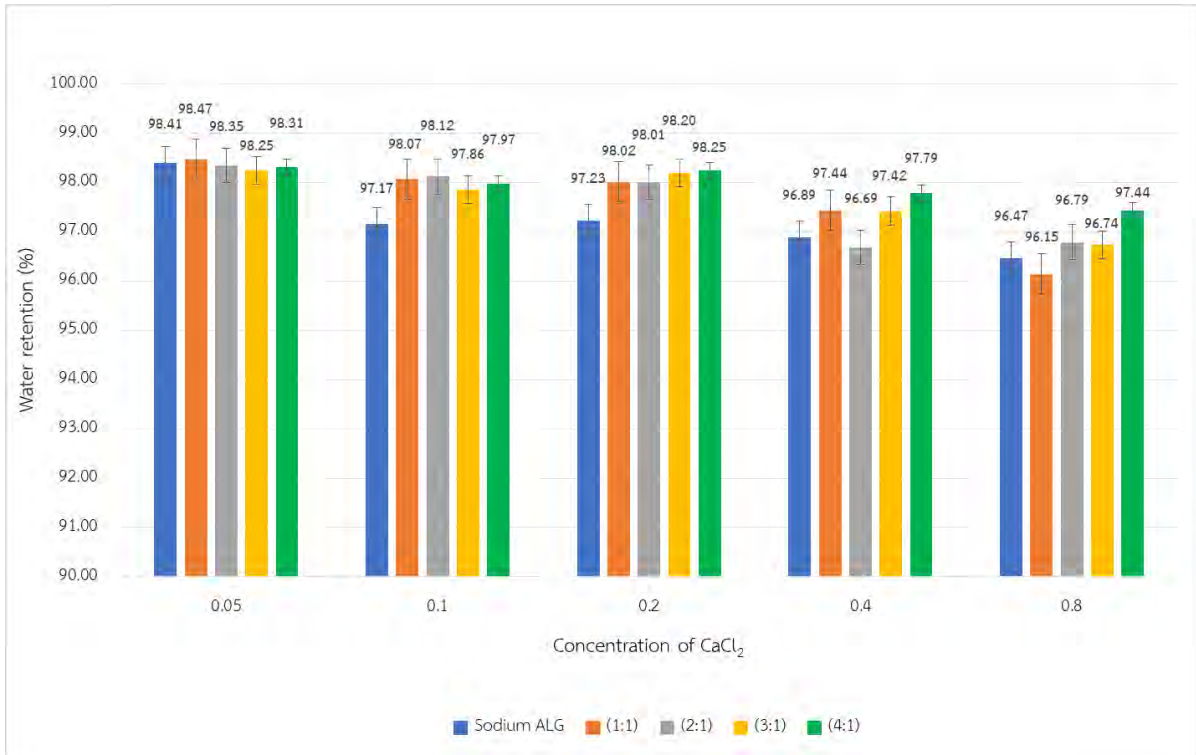
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโน-เซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตในสัดส่วน 3:1 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 3:1 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์คือ 0.05 0.10 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์

| ตัวอย่าง | Intensity (count) |                  | ค่าความเป็นผลึก(%) |
|----------|-------------------|------------------|--------------------|
|          | I <sub>am</sub>   | I <sub>002</sub> |                    |
| 0.05 M   | 746               | 1908             | 60.9               |
| 0.1 M    | 459               | 898              | 48.9               |
| 0.2 M    | 314               | 652              | 51.8               |
| 0.4 M    | 222               | 476              | 53.4               |
| 0.8 M    | 162               | 89               | 45.1               |

#### 4.5.3 ผลความสามารถในการอุ้มน้ำ

จากการทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำของแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต และแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ด้วยสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตคือ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์คือ 0.05 0.10 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์ ตามลำดับ และได้คำนวณปริมาณร้อยละของน้ำที่อยู่ในแผ่นไฮโดรเจลทุกส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟปริมาณร้อยละของน้ำที่อยู่ในแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (ฟ้า) และแผ่นไฮโดรเจลผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่สัดส่วน 1:1 (ส้ม) 2:1 (เทา) 3:1 (เหลือง) และ 4:1 (เขียว) ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.05 0.10 0.20 0.40 และ 0.80 โมลาร์

จากการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาณร้อยละของน้ำที่อยู่ในแผ่นไฮโดรเจลจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโซเดียมอัลจิเนตมากขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลงและมีโครงสร้างที่หนาแน่นมากยิ่งขึ้น และแผ่นไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต จะมีปริมาณร้อยละของน้ำมากกว่าแผ่นไฮโดรเจลจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสจะเข้าไปแทรกกระหว่างโมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนตด้วยขนาดของเส้นใยที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้มาก และการแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนตทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นมีการดูดซับน้ำมากยิ่งขึ้น สำหรับผลของการเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในแผ่นไฮโดรเจลที่มีต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.40 และ 0.80 โมลาร์ที่การเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในแผ่นไฮโดรเจลมากขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น [35]



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัยในอนาคต

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นมาสก์หน้านาโนเซลลูโลสจากแกลบข้าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแกลบข้าว และเตรียมมาสก์หน้าไฮโดรเจล โดยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเส้นใยนาโนเซลลูโลส

###### 5.1.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าแกลบข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ พื้นผิวภายนอกจะมีสันนูนเป็นโดมและขรุขระ ส่วนพื้นผิวภายในมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ เมื่อเทียบกับเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการทางเคมี สันนูนบนพื้นผิวภายนอกมีรอยปริแตก และพื้นผิวภายในมีลักษณะแตกออกเป็นเส้น เนื่องจากการกำจัดซิลิกา เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้กระบวนการทางเคมี

###### 5.1.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเซลลูโลสจากแกลบข้าวด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy พบว่าเซลลูโลสจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ จะสามารถกำจัดองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ นอกเหนือจากเซลลูโลส ได้แก่ ซิลิกา เฮมิเซลลูโลส และลิกนินให้มีปริมาณลดลง

###### 5.1.1.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแกลบข้าวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า เซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทางเคมีมีค่าความเป็นผลึกสูงกว่าแกลบข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีทำให้มีการกำจัดส่วนประกอบที่เป็นอสัณฐาน ได้แก่ ซิลิกา ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ออกจากเส้นใย โดยเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีความเป็นผลึกต่ำกว่าเส้นใยไมโครเซลลูโลสจากการที่ได้รับแรงเชิงกลในขั้นตอนการสกัดนาโนเซลลูโลสโดยใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใช้ความดันสูง

## 5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติแผ่นไฮโดรเจล

### 5.1.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าแผ่นไฮโดรเจลจากเส้นใยนาโนเซลลูโลส และสารละลายโซเดียมอัลจิเนต มีรูพรุนที่พื้นผิวจำนวนมาก โดยรูพรุนจะมีขนาดเล็กถึงกลาง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แต่เมื่อสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น รูพรุนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น

### 5.1.2.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแผ่นไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า ค่าความเป็นผลึกแปรผันตรงกับปริมาณของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในแผ่นไฮโดรเจล และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นผลึกจะลดลง จากการที่เกิดการเชื่อมขวางอย่างรวดเร็วมีการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบน้อยลง

### 5.1.2.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ

ความสามารถในการอุ้มน้ำของแผ่นไฮโดรเจลจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตสูงขึ้นไป เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และเมื่อสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะและการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลสและแผ่นไฮโดรเจล ควรใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชัน (FESEM) ซึ่งสามารถใช้กำลังขยายได้สูงขึ้น สามารถวัดขนาดของโมเลกุลที่สกัดได้ และได้ความชัดเจนของภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถศึกษาความแตกต่างของแผ่นไฮโดรเจลแต่ละสูตรได้

### 5.2.2 การต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

จากสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 ทำให้การทดลองไม่สามารถดำเนินการได้ตามแผนกำหนดการที่ได้กำหนดไว้ ในงานวิจัยนี้จึงดำเนินการสำเร็จไปเพียงบางส่วน ทั้งนี้ในอนาคตจะมีการดำเนินการและพัฒนาต่อจากผลงานที่ได้ทำสำเร็จไปก่อนหน้านี้ โดยจะมีการนำแผ่นไฮโดรเจล

ที่ได้ไปทำการนั่งฆ่าเชื้อ วิเคราะห์หมูฟงก์ชันทางเคมี และทดสอบสมบัติความเป็นพิษและความเข้ากันได้ทางชีวภาพต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. Rashid S., Dutta H., (2020). Characterization of nanocellulose extracted from short, medium and long grain rice husks. *Industrial Crops & Products*, 154, 112627.
2. Ngah W. S., Hanafiah M. A. K. M., (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3935–3948.
3. Richards H. L., Baker P. G. L., Iwuoha E., (2012). Metal Nanoparticle Modified Polysulfone Membranes for Use in Wastewater Treatment: A Critical Review. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 02(03), 183–193.
4. Bhattacharya D., Germinario L.T., Winter W.T., (2008). Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibrils obtained from bagasse. *Carbohydrate Polymers*, 73(3), 371-377.
5. Hansen N. M. L., Plackett D., (2008). Sustainable Films and Coatings from Hemicelluloses: A Review. *Biomacromolecules*, 9(6), 1493–1505.
6. Li L., Rowbotham J. S., Greenwell C. H., Dyer P. W., (2013). An Introduction to Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis: Versatile Techniques for Biomass Conversion. *New and Future Developments in Catalysis*, 173–208.
7. Faruk O., Sain M., (2016). Sources of Lignin. *Lignin in Polymer Composites*, 1-6.
8. Bledzki A., (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274.
9. Liu X., Jiang J., Zhang H., Li M., (2020). Thermal stability and microstructure of metakaolin-based geopolymer blended with rice husk ash. *Applied Clay Science*, 196, 1-12.
10. Elimbinzi E., Nyandoro S. S., Mubofu E. B., Manayil J. C., Lee A. F., (2019). Valorisation of rice husk silica waste: Organo-amine functionalized castor oil templated mesoporous silicas for biofuels synthesis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 294, 1-7.

11. Laufer G., Carosio F., Martinez R., Camino G., Grunlan J. C., (2011). Growth and fire resistance of colloidal silica-polyelectrolyte thin film assemblies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356, 69-77.
12. Sumran M., Kongkachuichay P., (2003). Synthesis of silica from rice husk ash by onestep combustion, fluidized bed combustion, and alkaline extraction. *KKU Engineering Journal*, 30 (2), 165-172.
13. Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Rattanasak U., (2009). Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate. *Fuel*, 88(1), 158-162.
14. Mishra R. K., Sabu A., Tiwari S. K., (2018). Materials chemistry and the futurist eco-friendly applications of nanocellulose: Status and prospect. *Journal of Saudi Chemical Society*, 22(8), 949-978.
15. Abitbol T., Rivkin A., Cao Y., Nevo Y., Abraham E., Ben-Shalom T., Shoseyov O., (2016). Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 39, 76–88.
16. Sofla M. R. K., Brown R. J., Tsuzuki T., Rainey T. J., (2016). A comparison of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibres extracted from bagasse using acid and ball milling methods. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7, 1-9.
17. Portela R., Leal C. R., Almeida P. L., Sobral R. G., (2019). Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing application. *Microbial Biotechnology*, 0(0), 1-25.
18. He Y., Boluk Y., Pan J., Ahniyaz A., Deltin T., Claesson P. M., (2019). Comparative study of CNC and CNF as additives in waterborne acrylate-based anti-corrosion coatings. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1–11.
19. Klemm D. O., Lindström T., Abitbol T., Kralisch D., (2021). Nanocellulose Based Composites for Electronics. Chapter 1 - The nanocellulose family, 1-14.
20. Sutherland I.W., (2007). Bacterial Exopolysaccharides. *Comprehensive Glycoscience*, 2, 521-558.

21. Torres F. G., Commeaux S., Troncoso O. P., (2012). Biocompatibility of Bacterial Cellulose Based Biomaterials. *Functional Biomaterials*, 3, 864-878.
22. Eartrakulpaiboon S., (2015). Preparation of nanocrystalline cellulose from dissolving cellulose by acid hydrolysis and thermal shock cracking, 20-23.
23. Sharma A., Thakur M., Bhattacharya M., Mandal T., Goswami S. (2019). Commercial Application of Cellulose Nano-composites - A review. *Biotechnology Reports*, 1-15.
24. Habibi Y., Lucia L. A., Rojas O. J. (2010). Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500.
25. Cheaburu-Yilmaz C. N., Karasulu H. Y., Yilmaz O. (2019). Nanoscaled Dispersed Systems Used in Drug-Delivery Applications. *Polymeric Nanomaterials in Nanotherapeutics*, 437–468.
26. Abdul Khalil H. P. S., Bhat A. H., Ireana Yusra A. F., (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 963–979.
27. Fan Z., (2014). Consolidated Bioprocessing for Ethanol Production. *Biorefineries*, 141–160.
28. Paakko M., Ankerfors M., Kosonen H., Nykanen A., Aholaa S., (2007). Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules*, 8, 1934-1941.
29. Curvello R., Raghuwanshi V. S., Garnier G., (2019). Engineering nanocellulose hydrogels for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 267, 47-61.
30. ยะสารวรรณ ญัฐวิศิษฐ์, (2014). Temperature-Responsive Polymers for Biomedical Applications. *KKU Science Journal*, 42(3), 499–513.
31. Chirani N., Yahia L. H., Gritsch L., Motta F. L., Chirani S., Faré S., (2015). History and Applications of Hydrogels. *Journal of Biomedical Sciences*, 4(2), 1-23.
32. Li J., Wei X., Wang Q., Chen J., Chang G., Kong L., Su J., Liu Y., (2012). Homogeneous isolation of nanocellulose from sugarcane bagasse by high pressure homogenization. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 1609-1613.

33. Kaur M., Kumari S., Sharma P., (2018). Chemically Modified Nanocellulose from Rice Husk: Synthesis and Characterisation, 13(3), 1-11.
34. Ludueña L.N., Fasce D.P., Alvarez V.A., Stefani P.M., (2011). Nanocellulose from rice husk following alkaline treatment to remove silica. *Bioresources*, 6(2), 1440-1453.
35. Al-Sabah A., Burnell S. E. A., Simoes I. N., Jessop Z., Badiei N., Blain E., Whitaker I. S., (2019). Structural and mechanical characterization of crosslinked and sterilised nanocellulose-based hydrogels for cartilage tissue engineering. *Carbohydrate Polymers*, 212, 242–251.
36. Amnuait T., Chusuit T., Raknam P., Boonme P., (2011). Effects of a cellulose mask synthesized by a bacterium on facial skin characteristics and user satisfaction. *Medical Devices: Evidence and Research*, 4, 77-81.
37. Bajpai P., (2018). Pulp Bleaching. *Biermann's Handbook of Pulp and Paper*, 1, 465–491.
38. Boukir A., Fellak S., Doumenq P., (2019). Structural characterization of *Argania spinosa* Moroccan wooden artifacts during natural degradation progress using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-Ray diffraction (XRD). *Heliyon*, 5(9), e02477.
39. Nurhajawarsi, Rafi M., Syafitri U. D., Rohaeti E., (2018). L-Histidine-Modified Silica from Rice Husk and Optimization of Adsorption Condition for Extractive Concentration of Pb (II). *J. Pure App. Chem. Res.*, 7(2), 198-208.
40. Rashid, S., & Dutta, H. (2020). Characterization of nanocellulose extracted from short, medium and long grain rice husks. *Industrial Crops and Products*.