

การเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มไคโตซานด้วยนาโนเซลลูโลสจาก  
เปลือกหน่อไม้

REINFORCEMENT OF CHITOSAN FILM WITH NANOCELLULOSE FROM  
BAMBOO SHOOT SHELL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2564

KMITL-2021-FI-M-053-399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REINFORCEMENT OF CHITOSAN FILM WITH NANOCELLULOSE FROM  
BAMBOO SHOOT SHELL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN FOOD SCIENCE  
FACULTY OF FOOD INDUSTRY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2021

KMITL-2021-FI-M-053-399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

FACULTY OF FOOD INDUSTRY

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มไคโตซานด้วยนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้
นักศึกษา	นางสาวกาญจนา มานะมุงมงคล
รหัสนักศึกษา	61608009
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เสริฐ ศรีพรหม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ดร.ระจิตร สุวพานิช

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มไคโตซานโดยการผสมนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้เข้าไป โดยทำการแยกเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้โดยใช้สารละลาย 5 %NaOH และสารละลาย 4 %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> แล้วผลิตเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางจุลภาคของเส้นใยที่ได้ จากนั้นนำนาโนเซลลูโลสที่ได้ไปผสมกับไคโตซาน ผลิตเป็นสารเคลือบแล้ววิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยี นำสารเคลือบที่ได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน แล้ววิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติการดูดซับน้ำ และการต้านทานแรงดึงของฟิล์ม รวมถึงทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ด้วยวิธี MIC/MBC จากการทดลองพบว่าเปลือกหน่อไม้สามารถผลิตเป็นนาโนเซลลูโลสชนิดนาโนไฟบริลได้ 32.56 % เมื่อนำนาโนเซลลูโลสมาผสมกับไคโตซานจะได้สารเคลือบที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลง สารเคลือบที่ได้สามารถคงคุณสมบัติของไคโตซานในการยับยั้งการเจริญของ *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* และรา *Fusarium oxysporum* ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคในอาหารและเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้ นอกจากนี้ฟิล์มไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v จะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบกว่า และมีรูพรุนน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลส เมื่อความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสในแผ่นฟิล์มเพิ่มมากขึ้น พบว่าฟิล์มทนต่อแรงดึงมากขึ้นและใช้เวลาในการขาดออกจากกันนานขึ้น การเติมนาโนเซลลูโลสมากจะทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำเข้าไปและมีค่ามอดุลัสลดลง จึงสรุปได้ว่าการเติมนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ในฟิล์มไคโตซานสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มได้ โดยไม่ทำให้เสื่อมเสียคุณสมบัติยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามการเติมนาโนเซลลูโลสลงในฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มไม่สามารถยับยั้งการซึมผ่านของน้ำ จึงควรใช้ฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแห้ง มีปริมาณการคายน้ำต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Reinforcement of Chitosan Film with Nanocellulose from Bamboo Shoot Shell
Student	Miss. Kanjana Manamoongmongkol
Student ID	61608009
Degree	Master of Science
Program	Food Science
Year	2021
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Pongsert Sriprom
Thesis Co-Advisor	Dr. Rachit Suwapanich

### ABSTRACT

This thesis is aimed to study the reinforcement of chitosan film with nanocellulose from bamboo shoot shell, to improve the strength of coating film. In this study, cellulose was extracted from bamboo shoot shell using 5 %NaOH and 4 %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Nanocellulose was produced using hydrothermal process, then the functional group and microstructure of fiber was measured. The coating was produced by incorporate nanocellulose with chitosan, and was measured by rheological test. The coating film was produced, and the surface analysis, water contact angle test and tensile test was performed. The antimicrobial ability was tested using MIC/MBC method. The result showed that bamboo shoot shell contained 32.56% of cellulose nanofibrils. When nanocellulose was applied to chitosan, it showed the shear thinning behavior. The antimicrobial ability indicated that the coating could inhibit *B. cereus*, *S. aureus*, *E. coli* and *Fusarium oxysporum*. The film incorporate 0.4 %w/v of nanocellulose had a relatively smooth surface and less porous than the non-nanocellulose coating film. The tensile strength was increased and the water contact angle was decreased with the increasing of nanocellulose. It can be concluded that the addition of nanocellulose from bamboo shoot shell could increase the strength of the coating film, without deterioration of the antimicrobial properties of chitosan. However, it cannot prevent the water absorption. Therefore, chitosan film incorporate nanocellulose from bamboo shoot shell should be used with dry product and have a low amount of dehydration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ ช่วยปรับปรุงแก้ไข ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะ และติดตามความก้าวหน้าในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธงชัย พุฒทองศิริ ผศ.ดร.โสธยา เกิดพิบูลย์ และรศ.ดร.วรรณมา ตั้งเจริญชัย เป็นอย่างสูง ที่ได้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ระจิตร สุวานิช และคุณลำพิ่ง พุ่มจันทร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี รวมถึงสอนวิธีการทำงานที่ดี ช่วยทำให้ผู้วิจัยพัฒนาตนเองในด้านการงานให้ดียิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะอุตสาหกรรมอาหารทุกท่าน ที่คอยสั่งสอนความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่ในคณะอุตสาหกรรมอาหาร จนกระทั่งประสบความสำเร็จในวันนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและนักวิทยาศาสตร์ประจำคณะอุตสาหกรรมอาหาร และเจ้าหน้าที่บัณฑิตทุกท่าน ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ จัดทำเอกสารต่างๆ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้รับการช่วยเหลือและกำลังใจจากเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในคณะอุตสาหกรรมอาหารมากมาย อนึ่ง ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีคุณประโยชน์ ข้าพเจ้าในฐานะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

กาญจนา มานะมั่งมงคล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หน่อไม้ฝรั่ง.....	4
2.2 เส้นใยธรรมชาติ.....	4
2.3 การเตรียมนาโนเซลลูโลส.....	7
2.4 ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลส.....	9
2.5 ไคติน-ไคโตซาน.....	10
2.6 ก्लीเซอรอล.....	11
2.7 ทวิน 80.....	12
2.8 กรดโอเลอิก.....	12
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	18
3.1 วัสดุดิบและสารเคมี.....	18
3.2 อุปกรณ์.....	18
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	26
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้.....	26
4.2 ผลของนาโนเซลลูโลสร่วมกับใช้โคโตซานต่อการผลิตสารเคลือบ.....	28
4.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์ม.....	30
4.4 ผลการศึกษาความคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์.....	33
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	40
บรรณานุกรม.....	41
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	49
ภาคผนวก ค.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการสกัดนาโนเซลลูโลส.....	15
2.2 ผลการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลส.....	16
2.3 ผลการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน.....	17
4.1 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน.....	31
4.2 ค่าแรงต้านทานการดึงและความยืดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน.....	32
4.3 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ <i>B. cereus</i> ได้.....	33
4.4 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ <i>S. aureus</i> .....	34
4.5 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i> ได้.....	34
4.6 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ <i>B. cereus</i> ได้.....	36
4.7 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ <i>S. aureus</i> .....	36
4.8 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ <i>E. coli</i> ได้.....	36
4.9 ผลเส้นผ่าศูนย์กลางของเชื้อรา <i>Fusarium oxysporum</i> บนอาหารผสมสารเคลือบ.....	38
4.10 เพอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อรา <i>Fusarium oxysporum</i> ที่เกิดขึ้น.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
2.1 หน่อไม้รวก.....	4
2.2 โครงสร้างทางลำดับชั้นของเส้นใยพืช.....	5
2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	6
2.4 ลักษณะโครงสร้างของ CNC และ CNF.....	7
2.5 Autoclave reactor.....	9
2.6 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน.....	11
2.7 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	11
3.1 เปลือกหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้ง.....	20
3.2 กระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้.....	21
3.3 กระบวนการผลิตสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน.....	22
3.4 ขั้นตอนการทดสอบหาค่า MIC และ MBC.....	25
4.1 ภาพของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส และ (ค) นาโนเซลลูโลส.....	26
4.2 FTIR spectra ในช่วงความยาวคลื่น $650-4000\text{ cm}^{-1}$ ของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส และ (ค) นาโนเซลลูโลส.....	27
4.3 ภาพถ่ายในระดับจุลภาคของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส, (ค) นาโนเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	28
4.4 สารเคลือบที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้น (ก) 0, (ข) 0.2 และ (ค) 0.4 %w/v.....	29
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของสารเคลือบ.....	29
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือนของสารเคลือบ.....	29
4.7 फिल्मที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้น (ก) 0, (ข) 0.2 และ (ค) 0.4 %w/v.....	30
4.8 ลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้น (ก) 0, (ข) 0.2 และ (ค) 0.4 %w/v ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....	30
4.9 ลักษณะของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้น (ก) 0, (ข) 0.2 และ (ค) 0.4 %w/v.....	31
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบแรงดึง.....	32
4.11 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อได้ (MIC).....	34
4.12 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อได้ (MBC).....	35
4.13 ผลโคโลนีของราที่เกิดขึ้นบนอาหาร PDA ที่ (ก) ไม่ผสมสารเคลือบ และที่ผสมสารเคลือบที่มีนาโนเซลลูโลส (ข) 0 %w/v, (ค) 0.2 %w/v และ (ง) 0.4 %w/v .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หน่อไม้เป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่ประกอบไปด้วยส่วนของเนื้อหน่อไม้และส่วนของเปลือก โดยทั่วไปคนมักจะนำเอาเพียงแค่ส่วนเนื้อมาใช้ประโยชน์ ทั้งการนำมาประกอบอาหารและการแปรรูปในกระบวนการต่างๆ ในปี 2561 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกหน่อไม้แปรรูปรวมทั้งสิ้น 416.6 ล้านบาท (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2562) ทำให้มีเปลือกหน่อไม้เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก คิดเป็น 60-70% ของหน่อทั้งหมด (Jia et al., 2011) เปลือกหน่อไม้มีองค์ประกอบภายในเป็นสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีคุณค่ามากมาย ได้แก่ เซลลูโลส 32.8%, เพนโตซาน 25.0%, ลิกนิน 13.9% และโปรตีน 12.3% (Liu et al., 1997) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ การที่เปลือกหน่อไม้มีเซลลูโลสจำนวนมาก เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช จึงทำให้เปลือกหน่อไม้เหมาะที่จะใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตนาโนเซลลูโลส

เซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยพืชชนิดคาร์โบไฮเดรตที่มีความน่าสนใจหลายประการ ทั้งมีปริมาณมาก และยังเป็นวัสดุทดแทน ที่สามารถย่อยสลายได้และมีราคาถูก โดยเซลลูโลสนั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมอบ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล และใช้เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต เป็นต้น ซึ่งการลดขนาดเส้นใยเซลลูโลสให้มีขนาดนาโน จะทำให้เส้นใยสามารถกระจายตัวในวัสดุต่างๆ ได้ดีขึ้น วัสดุจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น น้ำหนักเบา การนำนาโนเซลลูโลสไปประยุกต์ใช้ในฟิล์มหรือสารเคลือบผิว จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางประการอย่างได้ ทั้งลดการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน และช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทำให้ฟิล์มและสารเคลือบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Ferrer et al., 2017)

ปัจจุบันมีการนำไคโตซานมาประยุกต์เป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากไคตินที่พบในเปลือกกุ้ง กระจดงปู และแกนปลาหมึก เป็นต้น โดยมีหมู่อะมิโนที่แสดงสมบัติในการละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจาง สามารถจับกับไอออนของโลหะได้ดี (วรรณ ศรีนุตตระกูล, 2553) ไคโตซานมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ทำให้ไคโตซานเหมาะจะนำไปใช้ผลิตเป็นฟิล์มหรือสารเคลือบ ทั้งคุณสมบัติความเป็นสารยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย ไม่เป็นพิษ เข้ากับสารอื่นได้ดี และสามารถย่อยสลายได้ แต่อย่างไรก็ตาม ไคโตซานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี และมีคุณสมบัติทางความร้อนต่ำ จึงนำไปประยุกต์ใช้งานได้จำกัด การนำนาโนเซลลูโลสมาเสริมในฟิล์มไคโตซาน นอกจากจะสามารถลดข้อด้อยเหล่านี้ได้แล้ว ก็ยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ให้กับฟิล์มหรือได้อีกด้วย (Abdul Khalil et al., 2016) นอกจากนี้ ทั้งนาโนเซลลูโลสและไคโตซานต่างก็เป็นวัสดุจากธรรมชาติ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นอีกเรื่องที่ผู้คนให้ความสนใจกัน

มีนักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับผลไม้หรือบรรจุภัณฑ์อาหาร โดย Dong et al. (2016) ได้นำสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานมาใช้ในการเก็บรักษาแตงกวา และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายคนที่น่าสนใจศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติให้กับฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน โดย Deng et al. (2017a) เติมหิน 80 และสแปน 80 ซึ่งช่วยให้ฟิล์มมีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดีขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ นอกจากนี้ Deng et al. (2017b) ยังได้ทำการเติมกลีเซอรอลควบคู่ไปกับการเติมกรดโอเลอิกและทวิน 80 เพื่อเพิ่มความคงตัวและช่วยให้สารเคลือบเกาะติดกับผิวผลไม้ได้ดีขึ้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงศึกษาการนำนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้มาเสริมในฟิล์มโคโตซานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์ม โดยจะทำการผลิตนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ แล้วศึกษาความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของเปลือกหน่อไม้ และได้ฟิล์มเคลือบที่สามารถปกป้องและคงสภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ รวมถึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อตรวจสอบชนิดและคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของนาโนเซลลูโลสในการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มโคโตซาน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาชนิดของนาโนเซลลูโลสที่ผลิตจากเปลือกหน่อไม้ โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและลักษณะเส้นใยของเปลือกหน่อไม้ เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส ด้วย fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ scanning electron microscopy (SEM) จากนั้นนำนาโนเซลลูโลสมาผสมกับโคโตซานเพื่อผลิตเป็นสารเคลือบสำหรับการขึ้นรูปฟิล์ม โดยโคโตซานเป็นแกนสำหรับให้นาโนเซลลูโลสยึดเกาะ สารเคลือบที่ได้นำไปวิเคราะห์สมบัติการไหล (rheology) และทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรียที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในอาหาร และเชื้อราที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ *Fusarium oxysporum* ซึ่งเป็นเชื้อราสาเหตุของโรคพืช จากนั้นศึกษาความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์ม โดยการนำฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานที่ขึ้นรูป ไปวิเคราะห์ความต้านทานการดึงขาด (tensile strength) และการยืดตัว (elongation) ของฟิล์มด้วยการทดสอบแรงดึง (tensile test), วิเคราะห์การดูดซับน้ำของฟิล์มด้วยการทดสอบมุมสัมผัส

ของหยดน้ำ (water contact angle, °) และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวโดยวิธี SEM ปัจจุบัน  
 ทำการศึกษา มีดังนี้

ตัวแปรต้น

ฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน

ตัวแปรตาม

สมบัติการไหล (Rheology), ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile test), ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ  
 (Water contact angle, °), ลักษณะพื้นผิว และลักษณะการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

ตัวแปรควบคุม

ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส (%w/v), ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (%v/v), ความเข้มข้น  
 ของกรดโอเลอิก (%v/v), ความเข้มข้นของทรีน80 (%v/v) และความเข้มข้นของไคโตซาน (%w/v)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงชนิด ปริมาณผลผลิต และคุณลักษณะของนาโนเซลลูโลสที่ทำการสกัดออกมา  
 จากเปลือกหน่อไม้ด้วยเทคนิค hydrothermal ก่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการสกัดนาโน  
 เซลลูโลสมากยิ่งขึ้น

1.4.2 สามารถผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มไคโต  
 ซานโดยการผสมนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้

1.4.3 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกหน่อไม้ ซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยังไม่มี  
 การนำไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หน่อไม้ไผ่รวก

ไผ่รวก ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Thyrsostachys siamensis* อยู่ในวงศ์ Gramineae พบมากในประเทศไทย และประเทศพม่า รวมทั้งประเทศที่มีลักษณะเป็นเขตร้อน ไผ่รวกเป็นพืชที่มีความสำคัญเชิงพาณิชย์ของประเทศไทย แต่ละปีมีการนำไผ่รวกมาใช้ประโยชน์มากถึง 30-40 ล้านตัน (Plant Resources of South-East Asia, 2019)

ลักษณะทั่วไป คือ เป็นพืชล้มลุกอายุหลายปี ลำต้นตั้งตรง ทรงกระบอกกลวง ผิวเกลี้ยง สีเขียวอมเทา ไม่มีหนาม เนื้อแข็ง มีส่วนข้อปล้องชัดเจน ในบริเวณที่แห้ง ลำของไผ่รวกจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-4 ซม. และในบริเวณที่ชื้น ลำจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-7 ซม. ความสูงประมาณ 7-15 เมตร ผิวเกลี้ยง สีเขียวอมเทา ไม่มีหนาม เนื้อแข็ง และมีส่วนข้อปล้องชัดเจน ส่วนโคนมีเนื้อหน่อเกือบตัน ที่ปลายลำมีเนื้อบางกว่า (รูปที่ 2.1) ฤดูที่เหมาะสมแก่การเก็บเกี่ยวหน่อไม้ที่สุดคือฤดูฝน ขยายพันธุ์โดยการเพาะเมล็ดและการแยกเหง้า ในด้านการใช้ประโยชน์ ผู้คนนิยมนำลำไผ่มาปลูกเป็นแนวรั้วบ้าน ใช้ก่อสร้าง ทำไม้ค้ำยัน ในด้านอุตสาหกรรมเหมาะสำหรับใช้ทำเยื่อกระดาษ เนื่องจากมีเยื่อยาว เหมาะสำหรับทำกระดาษห่อของ กระดาษพิมพ์ และกระดาษเขียนหนังสือ ส่วนตัวหน่อไม้ ใช้รับประทาน ต้มกินกับน้ำพริก ใส่ในแกง และชุบหน่อไม้ เป็นต้น (สุทัศน์ เล้าสกุล และณัฐากร เสมสันทัต. 2561)



รูปที่ 2.1 หน่อไม้รวก

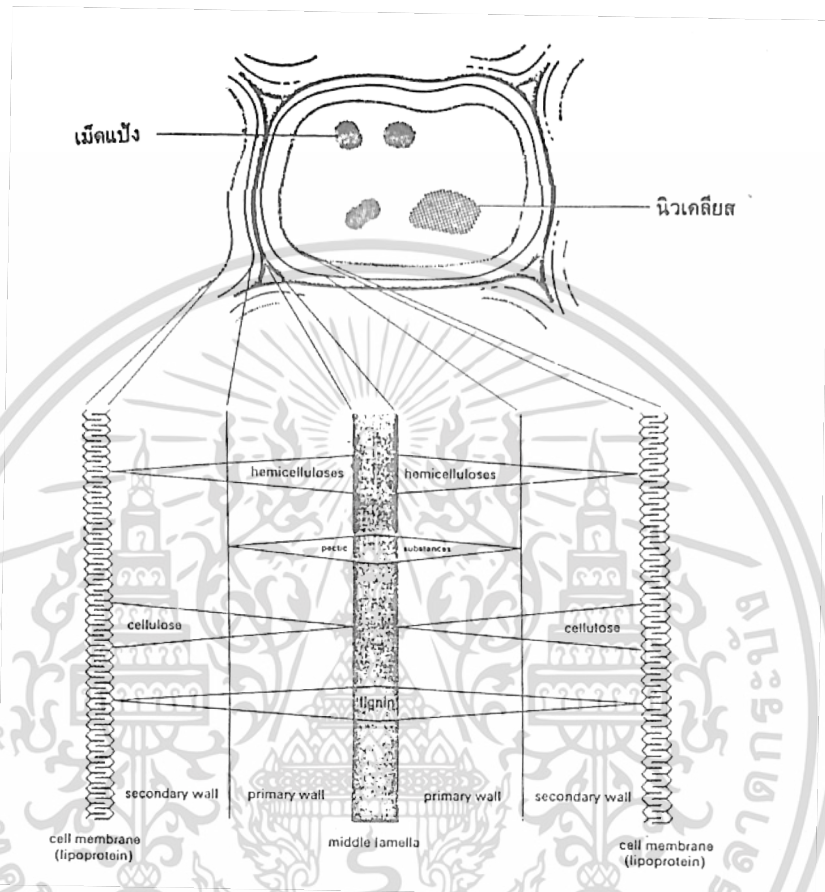
### 2.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยพืช ประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ โดยเส้นใยพืชจะมีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวที่มีความยาว 1-50 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-50 ไมโครเมตร เส้นใยเดี่ยวมีลักษณะคล้ายกับท่อกลวงขนาดเล็ก ผนังเซลล์ของเส้นใย ประกอบด้วยผนังชั้นนอกหรือผนังเซลล์ปฐมภูมิ (P-wall) และผนังชั้นในหรือผนังเซลล์ทุติยภูมิ (S-wall) ดังรูปที่ 2.2 ผนังเซลล์ P-wall จะมีลักษณะบาง (ประมาณ 100-200 นาโนเมตร) เต็มไปด้วยโครงข่ายของไมโครไฟบริลที่เรียงตัวกันอย่าง

หลวมๆ ผนังเซลล์ S-wall มีความหนา 3-6 ไมโครเมตร แบ่งออก 3 ชั้นย่อย (S1, S2, S3) โดยชั้น S1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ S3 จะมีขนาดระดับนาโน ส่วนชั้น S2 มีขนาดประมาณ 2-5 ไมโครเมตร ชั้น S2 เป็นชั้นที่สำคัญที่สุด มีการจัดเรียงตัวของขด cellulose microfibrils (CMF) ขนานไปกับแกนเส้นใย (Kargarzadeh et al., 2017)



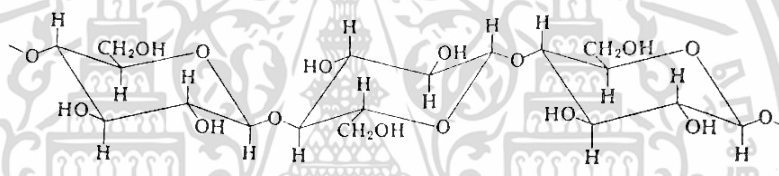
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางลำดับชั้นของเส้นใยพืช  
ที่มา: รัชณี ตัณฑะพานิชกุล (2547)

CMF มีอยู่ในผนังเซลล์ร่วมกับองค์ประกอบอื่นๆ อย่างลิกนิน เฮมิเซลลูโลส โปรตีน หรือ สารอินทรีย์ เป็นต้น CMF และเฮมิเซลลูโลสเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ เฮมิเซลลูโลสยังเชื่อมพันธะกับลิกนินด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแสดงว่า เฮมิเซลลูโลสจะอยู่ระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและโมเลกุลของลิกนิน เซลลูโลสและองค์ประกอบอื่นของผนังเซลล์จะอยู่รวมกันเป็นมัด เรียกว่า ไมโครไฟบริล ซึ่งมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนผลึก (crystalline) หรือส่วนที่โมเลกุลจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ และส่วนอสัณฐาน (amorphous) หรือส่วนที่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่า

### 2.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นสารชีวมวล (biomass) ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ในพืชชั้นสูง สาหร่ายสีเขียว รา แบคทีเรียบางชนิด (เช่น *Acetobacter xylinum*) รวมทั้งสัตว์ทะเลในกลุ่มเอกลีลาเป็นเยือกใสหรือที่สวมน้ำสำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้ทะเลเป็นเยือกใสในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Urochordata เช่น เพรียงลอย เพรียงสาย เพรียงหัวหอม ซึ่งเป็นสัตว์เพียงกลุ่มเดียวที่สร้างเซลลูโลสได้ เซลลูโลสเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของกลูโคส (glucose) ชนิด  $\beta$ -D-glucose มาเชื่อมกันต่อเป็นสายโซ่ตรง ด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 ของโมเลกุลกลูโคส โดยมีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  (ัญญ์ณลิน และคณะ, 2560) ดังรูปที่ 2.3 ขนาดโมเลกุลของเซลลูโลสที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จะแสดงโดยค่าอันดับการพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization, DP) หรือปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่อยู่ในสายพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลต่อความยาวของสายโซ่ และมีความเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของเซลลูโลสเป็นอย่างมาก เมื่อทำการสกัดแยกเซลลูโลสจากแหล่งวัตถุดิบเซลลูโลสที่บริสุทธิ์จะมีค่า DP และน้ำหนักโมเลกุลลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญต่อขั้นตอนการแยกหรือการทำให้เซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นอย่างมาก การกระจาย DP หรือน้ำหนักโมเลกุล จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติเกี่ยวกับการละลาย สมบัติทางชีววิทยา และสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส (พัชรลักษณ์ พรหมถาวร, 2551)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: รัชณี ตันตะพานิชกุล (2547)

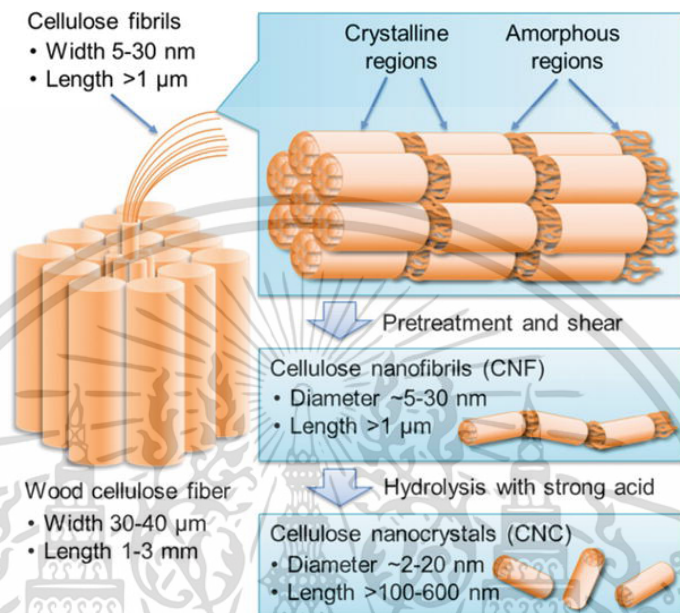
## 2.2.2 นาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 10-200 นาโนเมตร สกัดได้จากผนังเซลล์พืชโดยวิธีต่างๆ เช่น วิธีเชิงกล (mechanical) วิธีเคมีเชิงกล (chemo-mechanical) และการใช้เอนไซม์ (enzymatic) เป็นต้น ตามหลักของ TAPPI (technical association of the pulp and paper Industry) ได้มีการแบ่งนาโนเซลลูโลส ดังนี้

2.2.2.1 Cellulose nanocrystals (CNC) มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกรูปทรงเรียวยาวคล้ายแท่ง และมีความยืดหยุ่นที่จำกัดเมื่อเทียบกับ CNF เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบที่เป็นลักษณะอสัณฐาน CNC เป็นเซลลูโลสที่ได้จากการใช้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อทำการตัดสายโซ่โมเลกุลระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกและโครงสร้างอสัณฐาน โดยสารเคมีที่ใช้จะเป็นกรดหรือด่าง เช่น กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น CNC โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-20 นาโนเมตร ความยาวของเซลลูโลสมากกว่า 100-600 นาโนเมตร

2.2.2.2 Cellulose nanofibrils (CNF) หรือ nanofibrillated cellulose (NFC) จัดเป็นเส้นใยชนิดเดียวกัน ซึ่ง CNF เป็นหน่วยโครงสร้างที่เล็กสุดของเส้นใยพืช ประกอบด้วยกลุ่มของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซ่เซลลูโลสที่ยืดตัวได้ มีการจัดเรียงของส่วนที่เป็นผลึกสลับกับส่วนอสัณฐาน เป็นนาโนเซลลูโลสที่เกิดจากปฏิกิริยาเชิงกล (mechanical method) ในการทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหักระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกกับผลึก ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ CNF อยู่ที่ 5-30 นาโนเมตร ความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร (สถาบันพลาสติก, 2560)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของ CNC และ CNF

ที่มา: Tuukkanen and Rajala (2018)

## 2.3 การเตรียมนาโนเซลลูโลส

### 2.3.1 การเตรียม cellulose nanofibrils (CNF)

#### 2.3.1.1 High pressure homogenization

กระบวนการบดผสมเป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงนั้น (high pressure homogenization, HPH) รวมไปถึงการส่งเซลลูโลสชั้นเหลว (slurry) ไปสู่ท่อผ่านหัวฉีดเล็ก ๆ ที่ความดันสูง ความเร็วและความดันที่เกิดขึ้นจะสร้างแรงกระแทก (impact) และแรงเฉือน (shear force) ต่อเส้นใย ทำให้เกิดการตัดเฉือนและลดขนาดของเส้นใยเป็นระดับนาโน HPH เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพราะมีประสิทธิภาพสูงและไม่ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

#### 2.3.1.2 Grinding

การบด (grinding) เป็นอีกวิธีในการสลายเส้นใยเซลลูโลสให้มีขนาดระดับนาโน เครื่องมือที่ใช้ในการบดจะมี grind stone แบบนิ่งและแบบหมุน ซึ่งสารที่มีเนื้อชั้นเหลวนั้น (pulp slurry) จะไหลผ่านระหว่างหินทั้งสองนี้ โดยกลไกในการสร้างเส้นใย (fibrillation) ของ grinder คือการทำลายพันธะไฮโดรเจนและโครงสร้างผนังเซลล์ด้วยแรงเฉือน และทำให้ได้เป็นเส้นใยระดับนาโน (Abdul Khalil et al., 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.3 High-intensity ultrasonication

การใช้คลื่นความถี่สูง (high-intensity ultrasonication) เป็นกระบวนการเชิงกลที่ใช้พลังงานการสั่นแกว่ง (oscillating power) ในการแยกนาโนเซลลูโลส การสั่นแกว่งเกิดจากแรงไฮดรอดนามิกส์ (hydrodynamic forces) ของคลื่นอัลตราซาวด์ (ultrasound) กระทำต่อสารแขวนลอย เมื่อโมเลกุลดูดซับพลังงานอัลตราซาวด์จะทำให้พลังงานการสั่นแกว่งสูง และเกิดคลื่นความถี่ที่ก่อให้เกิดการสร้าง, การขยาย และการแตกตัวอย่างรุนแรงของฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า cavitation โดยการระเบิดของฟองอากาศแบบ cavitation จะทำให้เกิดแรงเฉือนซึ่งสามารถทำลายกลุ่มก้อนของอนุภาคให้กระจายตัว รวมถึงสามารถทำลายผนังโครงสร้างของเซลล์ได้อีกด้วย

### 2.3.2 การเตรียม cellulose nanocrystal (CNC)

ใช้สารเคมีในการสกัด โดยสารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาตรงส่วนอสัณฐาน เพื่อให้คงเหลือแต่ส่วนผลึก วิธีการทางเคมีที่นิยมใช้ในการแยกเส้นใย ได้แก่

#### 2.3.2.1 Acid hydrolysis

การย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis) กรดที่นิยมใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริก การย่อยสลายด้วยกรด แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- Homogenous process เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลกลูโคส แต่ข้อเสียคือ จะต้องมีการแยกกรดออกจากน้ำตาลก่อนนำไปใช้ รวมทั้งปัญหาการสูญเสียกรดไปกับส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลาย และการผุกร่อนของเครื่องมือจากการใช้กรดแก่

- Heterogenous process เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อน แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า  $180^{\circ}\text{C}$  ผลคือได้เส้นใยเซลลูโลส วิธีนี้ไม่สามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่ แต่จะถูกทำให้เป็นกลางด้วยปูนขาวหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )

#### 2.3.2.2 Alkaline hydrolysis

การย่อยด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง ทำให้สายของพอลิแซ็กคาไรด์สั้นลง โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $160\text{-}180^{\circ}\text{C}$  และต้องการออกซิเจนในปริมาณเล็กน้อยในการย่อย การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและใช้พลังงานน้อย เมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยกรด เพียงแต่ปริมาณส่วนผลึกของเซลลูโลสก็จะลดลงด้วย (สุภาพพร ชาตวิตรพงศ์, 2536)

### 2.3.3 Hydrothermal Synthesis

กระบวนการ hydrothermal เป็นปฏิกิริยา heterogenous ที่ใช้ตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง เพื่อทำการละลายและก่อผลึกในระบบปิด ถึงแม้ว่าจะไม่มีการกำหนดความดันและอุณหภูมิต่ำสุดสำหรับกระบวนการนี้ แต่โดยทั่วไปแล้ว hydrothermal synthesis จะเกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  และความดันมากกว่า 1 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาซึ่งโดยทั่วไปแล้วเกิดที่อุณหภูมิสูง เมื่ออยู่ภายใต้กระบวนการ Hydrothermal จะสามารถเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำลงมาได้ เนื่องจากคุณลักษณะบางประการของน้ำ เช่น ความหนาแน่น, pKw, ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และความหนืด สามารถเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะ hydrothermal จนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับของไหลวิกฤตยิ่งยวด (supercritical fluid) และทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น (Alves et al., 2013) โดยวิธีการนี้ สามารถใช้เพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง, ทำละลายสารและก่อเป็นผลึก รวมทั้งการแยกหรือการสร้างเป็นองค์ประกอบขึ้นมาใหม่ เป็นต้น

การก่อผลึกโดยวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า autoclave reactor ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยการสกัดหรือสังเคราะห์สารด้วยวิธี hydrothermal มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

- ข้อดี คือ สามารถสังเคราะห์ผลึกของสารที่ไม่มีเสถียรภาพที่จุดหลอมเหลว, สามารถควบคุมขนาดผลึกให้เล็กหรือใหญ่ได้ โดยการปรับอัตราส่วนของสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบ และผลึกที่ได้ยังมีคุณภาพดีอีกด้วย (Glassware Chemical, 2560)

- ข้อเสีย คือ ใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูง และ ไม่สามารถสังเกตเห็นกระบวนการเกิดผลึกในขณะที่ทำการทดลองได้



รูปที่ 2.5 Autoclave reactor

## 2.4 ประโยชน์ของนาโนเซลลูโลสในอุตสาหกรรมอาหาร

นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติหลากหลายและสามารถย่อยสลายได้ (biodegradable) ทำให้นาโนเซลลูโลสถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง สำหรับการประยุกต์ใช้นาโนเซลลูโลสในอุตสาหกรรมอาหาร ฉัญฉุนลิน และคณะ (2560) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลไว้ มีดังต่อไปนี้

### 2.4.1 สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และสารให้ความคงตัว (food stabilizer)

นาโนเซลลูโลสทำให้เกิดความคงตัวในอิมัลชันได้ เพราะโมเลกุลของนาโนเซลลูโลสมีความชอบน้ำมากกว่าน้ำมัน (hydrophilic) โดยโมเลกุลของนาโนเซลลูโลสจะดูดซับที่ชั้นระหว่างพื้นผิวของน้ำและน้ำมัน (oil-water interface) เกิดเป็นชั้นป้องกันขึ้นด้วยแรง Steric ซึ่งอิมัลชันชนิดนี้ เรียกว่า Pickering emulsion โมเลกุลของนาโนเซลลูโลสที่เหลือจากการดูดซับที่ชั้นระหว่างพื้นผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำและน้ำมัน จะอยู่ในส่วนต่อเนื่อง (continuous phase) และเกิดการสร้างโครงร่างตาข่ายสามมิติ มีผลช่วยตรึงและลดการเคลื่อนที่ของเม็ดไขมัน ส่งผลให้อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น

#### 2.4.2 สารทดแทนไขมัน (fat replacer)

มีนักวิจัยจำนวนมากที่ทดลองนำนาโนเซลลูโลสมาเป็นสารทดแทนไขมัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้นาโนเซลลูโลสเป็นสารทดแทนไขมันมีความคงตัว สามารถลดไขมันและปริมาณแคลอรีลงได้ แต่มีข้อจำกัดสำหรับการใช้นาโนเซลลูโลสคือ สารในกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง ทำให้ปริมาณน้ำในอาหารสูงขึ้น ซึ่งมีผลเพิ่มค่าแอกติวิตีของน้ำ (water activity) ในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาลดลง

#### 2.4.3 เส้นใยอาหาร (dietary fiber)

คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของนาโนเซลลูโลสคือเป็นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) ซึ่งร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ และนาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารและยาสำหรับผู้ป่วยที่มีความผิดปกติในระบบขับถ่าย

#### 2.4.4 บรรจุภัณฑ์อาหาร (food packaging)

วัตถุประสงค์หลักของบรรจุภัณฑ์อาหารคือเป็นสิ่งที่ห่อหุ้มอาหารเพื่อป้องกันระหว่างการขนส่งจากแหล่งผลิตไปยังผู้บริโภค นาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวในการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากนาโนเซลลูโลสสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซได้ (Fukuzumi et al., 2009)

## 2.5 ไคติน-ไคโตซาน

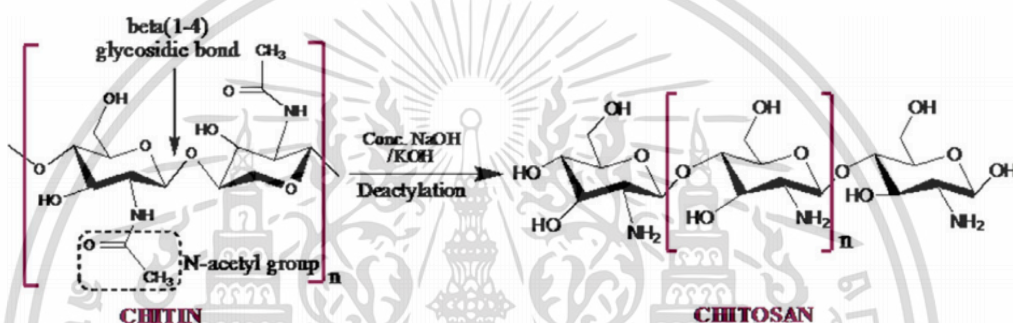
ไคติน-ไคโตซาน เป็นวัสดุชีวภาพเกิดในธรรมชาติ จัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตผสมที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนติดอยู่ด้วยทำให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น และหลากหลายมีประสิทธิภาพสูงในกิจกรรมชีวภาพ สมบัติพิเศษหลายประการของไคโตซาน ได้แก่ สารยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (antibacterial) ไม่เป็นพิษ (non-toxic) และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) นอกจากนี้ ไคโตซานยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) จึงเป็นสารที่มีความปลอดภัย ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต (Abdul Khalil et al., 2016)

ไคตินเป็นสารโพลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่พบมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกหอย ปู กุ้ง ปลาหมึก เปลือกของแมลง และพบได้ใน ผงเซลล์ของเห็ด รา และ สาหร่ายบางชนิด ไคตินเป็นสารคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับเซลลูโลส โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วย N-Acetyl-D-glucosamine ต่อกันเป็นสายยาว เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิกที่ปราศจากน้ำ (สุธิดา คงทอง, 2552)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน ที่ได้จากการดึงเอาหมู่อะซิโตนออกไปจากไคตินด้วยปฏิกิริยาที่เรียกว่า Deacetylation ทำให้เกิดโครงสร้างของ glucosamine ขึ้น ซึ่งโครงสร้างดังกล่าว ส่งผลให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไคโตซานสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและละลายได้ในกรดอ่อน คุณสมบัติของไคโตซานขึ้นอยู่กับระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลหรือค่า %Deacetylation ส่งผลให้ไคโตซานมีคุณสมบัติแตกต่างกัน นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานสามารถบอกได้ถึงความยาวของสายไคโตซาน และมีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีสายยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้น การนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้งเปอร์เซ็นต์การเกิด Deacetylation และน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน (ชาตรี จีราพันธ์, 2552) สารละลายของไคโตซานจะมีความข้นเหนียวแต่ใสคล้ายวุ้น หรือพลาสติกใส ยืดหยุ่นได้เล็กน้อยจึงมีคุณสมบัติที่พร้อมจะทำให้เป็นรูปแบบต่างๆได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าต้องการทำเป็นแผ่นหรือเยื่อบางๆเป็นเจล หรือรูปร่างเป็นเม็ด เกล็ด เส้นใย สารเคลือบและคอลลอยด์ เป็นต้น (กมลศิริ พันธนียะ, 2556)

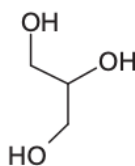


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน

ที่มา: Kumari and Kishor (2020)

## 2.6 กลีเซอรอล

กลีเซอรอล (glycerol) อาจเรียกว่า กลีเซอริน (glycerine หรือ glycerin) สูตรโครงสร้างคือ  $C_3H_5(OH)_3$  ดังรูปที่ 2.7 มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิออล (polyol) เป็นสารที่เป็นของเหลว ใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย (ความหวานสัมพัทธ์ 60) โมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี (hygroscopic) (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์, 2561ก) นอกจากนี้ กลีเซอรอล ยังมีคุณสมบัติเป็น plasticizer หรือสารเพิ่มสภาพพลาสติก ช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความยืดหยุ่นให้กับพลาสติกหรือฟิล์มได้ ส่งผลให้พลาสติกหรือฟิล์มมีความยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของกลีเซอรอล

ที่มา: Pagliaro (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ทวิน 80

ทวิน 80 (Tween 80) มีชื่อทางเคมีคือ Polyoxyethylene sorbitan monooleate สูตรโครงสร้างคือ  $C_{64}H_{124}O_{26}$  สารทวิน 80 เกิดจากการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของ ethylene oxide และ sorbitan fatty acid esters (Kinyanjui et al., 2003) ทวินมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลือง จัดเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็น emulsifier ช่วยให้ของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ทวิน 80 มีค่า HLB (hydrophilic/lipophilic Balance) ที่สูง (มากกว่า 10) จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ประเภท oil-in-water (Brandelero et al., 2010)

## 2.8 กรดโอเลอิก

กรดโอเลอิก (oleic acid) เป็นกรดไขมันที่มีสูตรเคมีคือ  $C_{18}H_{34}O_2$  อยู่ในกลุ่มไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวโอเมกา-9 เป็นไขมันที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่ในเชิงพาณิชย์อาจมีสีเหลือง คำว่า "โอเลอิก" มาจากน้ำมันมะกอก (olive oil) ซึ่งมีปริมาณกรดโอเลอิกสูง นอกจากนี้ยังพบในน้ำมันพีแคน คาโนลา น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันแมคาเดเมียและน้ำมันดอกทานตะวัน นอกจากนี้ยังพบในไขมันไก่และมันหมู

กรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันที่พบมากที่สุดในเรื่องไขมันของมนุษย์ และเป็นกรดไขมันที่พบมากที่สุดในเรื่องเนื้อเยื่อทั่วร่างกายมนุษย์เป็นอันดับ 2 รองจากกรดปาล์มิติก ซึ่งสังเคราะห์ของกรดโอเลอิกในร่างกายเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของเอนไซม์ Stearoyl-CoA 9-desaturase ในปฏิกิริยานี้กรดสเตียริกจะถูกกลายสภาพเป็นกรดโอเลอิก

กรดโอเลอิกพบในอาหารทั่วไป เกลีสโซเดียมของกรดโอเลอิกเป็นส่วนผสมในสบู่ เป็นตัวทำอิมัลชันและสารให้ความชุ่มชื้น กรดโอเลอิกปริมาณน้อยใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณในการทำยาและใช้เป็นตัวทำอิมัลชันและตัวช่วยละลายในผลิตภัณฑ์แเอโรซอล (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2559)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการสกัดเส้นใยนาโนเซลลูโลส Abdul Khalil et al. (2014) ได้รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตและการปรับปรุง nanofibrillated cellulose (NFC) ซึ่งจัดว่าเป็นนาโนเซลลูโลสประเภทหนึ่งที่เกิดด้วยกระบวนการเชิงกลต่างๆ เพื่อการนำมาประยุกต์ใช้ จากการศึกษาพบว่า NFC เป็นนาโนเซลลูโลสประเภทหนึ่งที่สกัดได้จากสารชีวมวลอย่างลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประสิทธิภาพของ NFC ที่ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เลือกใช้ในการแยกเส้นใย โดยทั่วไปกระบวนการเชิงกลที่ใช้ในการแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลส ได้แก่ high pressure homogenization, microfluidization, grinding, cryocrushing และ high-intensity ultrasonication

นอกจากนี้ ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการสกัดแยกเซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) ออกจากเปลือกส้ม โดยอาศัยการใช้คลื่นความถี่สูง (sonication) โดย Hiasa et al. (2014) ได้ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดแยกเซลลูโลสที่ต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ วิธี multistep ที่ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดสารอนินทรีย์ด้วย 0.98%  $C_2H_8O_2N_4$  ที่อุณหภูมิ 20°C, การแตกโมเลกุลเพกตินที่ไม่ละลายน้ำด้วย 0.18% HCl ที่อุณหภูมิ 80°C และขั้นตอนการกำจัดเพกตินออกด้วย 0.20% NaOH ที่อุณหภูมิ 5°C ส่วนวิธีสกัดเซลลูโลสอีกวิธีคือ วิธี hydrothermal ซึ่งอาศัยการทำปฏิกิริยากับ 0.18% HCl ที่อุณหภูมิ 120°C ความดัน 0.12 MPa ในถังปฏิกรณ์แรงดันสูง (autoclave) จากนั้นเซลลูโลสที่ได้จะถูกทำให้มีขนาดนาโนด้วยกระบวนการเชิงกลอย่างการใช้คลื่นความถี่สูงในการแยกเส้นใย จากการศึกษาพบว่า วิธีการสกัดแยกเซลลูโลสทั้ง 2 วิธี ส่งผลต่อสภาพนาโนเซลลูโลสหลังการใช้คลื่นความถี่สูง โดยเซลลูโลสจากวิธี hydrothermal จะมีค่าดัชนีความเป็นผลึก (CrI) สูงกว่าวิธี multistep เพียงเล็กน้อยคือ 58.0% และ 54.0% ตามลำดับ ซึ่งการใช้คลื่นความถี่สูงทำให้ได้เส้นใย CNF ที่หนา 2-3 นาโนเมตร โดยมีปริมาณผลผลิตของเส้นใยเท่ากับ 8.9%

ต่อมา ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาสกัดแยกผลึกนาโนเซลลูโลส (CNC) ออกจากเปลือกมะเขือเทศด้วยการไฮโดรไลซิสกรด โดย Jiang and Hsieh (2015) ได้ใช้วิธีการสกัดแยกเซลลูโลสต่างกัน 2 วิธี วิธีแรกคือการฟอกด้วย 1.4%  $NaClO_2$  แล้วทำปฏิกิริยากับ 5% KOH ซึ่งเป็นวิธีการปรับสภาพด้วยกรด ส่วนวิธีที่สองคือ การทำปฏิกิริยากับ 5% NaOH แล้วฟอกด้วย 4%  $H_2O_2$  ซึ่งเป็นวิธีการปรับสภาพด้วยด่าง จากนั้นจึงทำการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสที่ได้จากทั้งสองวิธีการด้วย 64%  $H_2SO_4$  ที่อุณหภูมิ 45°C แล้วใช้คลื่นความถี่สูง (sonication) เพื่อไม่ให้เส้นใยเกาะกัน จากการศึกษาพบว่า การสกัดแยกเซลลูโลสโดยใช้กรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลส ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตของเซลลูโลสเท่ากับ 13.1% ส่วนการปรับสภาพด้วยด่างทำให้ได้ปริมาณผลผลิตที่น้อยลงคือ 11.3% เมื่อนำเซลลูโลสมาทำการไฮโดรไลซิสกับกรดซัลฟิวริก ทำให้บริเวณอนันฐานถูกกำจัดและได้เป็นผลึกนาโนเซลลูโลส (CNC) หนา 7.2 นาโนเมตร และมีดัชนีความเป็นผลึก (CrI) สูงถึง 80.8%

Herrera (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติของสารเคลือบ (coating) ที่ผลิตจากผลึกนาโนเซลลูโลสจากการทดลองพบว่า การเพิ่มความหนาของสารเคลือบส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงขนาดมุมของหยดน้ำเมื่ออยู่บนแผ่นฟิล์ม จากการทดลองพบว่ายิ่งสารเคลือบหนามาก ค่ามุมสัมผัสที่ได้ก็จะยิ่งสูง เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านไปในฟิล์มได้น้อยลง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความหนาจะทำให้สารเคลือบทนต่อความชื้นได้มากขึ้น จากการศึกษาค่าการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 23 และ 50 พบว่า ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนต่ำสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 23 ในทางตรงกันข้าม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ตัวอย่างที่เคลือบบาง จะมีค่าการซึมผ่านของออกซิเจนสูงเกินกว่าช่วงที่ทำการตรวจวัด ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบหนา ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนยังสามารถตรวจวัดได้ แต่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบมีความไวต่อความชื้นมาก ทำให้สารเคลือบสูญเสียความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

ในการศึกษาการนำนาโนเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ โดยผลิตสารเคลือบที่ทำจากนาโนเซลลูโลส และไคโตซาน Dong et al. (2016) ได้นำนาโนเซลลูโลสผสมกับไคโตซานเพื่อผลิตเป็นสารเคลือบผิวผลไม้ จากการทดลองเคลือบผิวแตงกวา พบว่าสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานสามารถยืดอายุการเก็บรักษาแตงกวาไว้ได้นานกว่า 2 สัปดาห์ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นประมาณ 8.4% และมีค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ลดลงประมาณ 20.3%

นอกจากนี้ นักวิจัยยังได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานให้ดียิ่งขึ้น โดย Deng et al. (2017a) ได้เติมทวิน 80 และสแปน 80 ลงในสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน แล้วนำไปทดลองเคลือบลูกแพร์ ซึ่งจากการทดลองการเก็บรักษาลูกแพร์ที่อุณหภูมิ 20°C ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เป็นเวลา 3 สัปดาห์ และเก็บรักษาลูกแพร์ที่อุณหภูมิ -1°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 2.5 เดือน พบว่าที่ทั้งสองสภาวะในการเก็บรักษา ลูกแพร์ที่เคลือบสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานสามารถคงคุณภาพไว้ได้ โดยที่มีการเกิดรอยช้ำและสีอ่อนลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเติมทวิน 80 และสแปน 80 จะส่งผลให้สารเคลือบผิวผลไม้มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของสารต่างๆ ได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการเก็บรักษาลูกแพร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงเป็นระยะเวลานานขึ้น พบว่าลูกแพร์ที่เคลือบมีการผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจที่ไม่ต่างจากลูกแพร์ที่ไม่ได้เคลือบ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของสารเคลือบจะต่ำลงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

ในการเคลือบผิวผักและผลไม้ สิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญคือการยึดเกาะของสารเคลือบกับผิวผลไม้ ไม่ใช่ว่าผลไม้ทุกชนิดจะสามารถนำมาเคลือบเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพไว้ได้ ซึ่ง Deng et al. (2017b) ปรับปรุงคุณสมบัติของสารเคลือบผิวผลไม้ใช้นาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน โดยได้มีการเติมกลีเซอรอล ทวิน 80 และกรดโอเลอิกเพิ่มเข้าไป ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสารเคลือบที่ได้มีค่าแรงตึงผิว (surface tension) ที่ต่ำกว่าสารเคลือบจากการทดลองของ Deng et al. (2018) ที่เติมเพียงกรดโอเลอิกอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมกลีเซอรอลและทวิน 80 สามารถเพิ่มความคงตัวให้สารเคลือบผิวผักและผลไม้ได้ ทำให้สารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานสามารถยึดเกาะกับผิวผักและผลไม้ได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการสกัดนาโนเซลลูโลส

วัตถุดิบเริ่มต้น	สารเคมี	วิธีการสกัด	ผลการทดลอง	ผู้วิจัย
เปลือกมะนาว	-	Autoclaving และ High shear homogenizing	สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกนาโนเซลลูโลสคือ การ autoclave ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการ high shear homogenization ซึ่งได้ค่าดัชนีความเป็นผลึกเท่ากับ 55.33%	Jongaroon-taprangsee et al. (2018)
เซลลูโลส	-	Subcritical water	ปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยาวของนาโนเซลลูโลสลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลผลิตนาโนเซลลูโลสที่ได้จากวิธี subcritical water นี้มีปริมาณน้อยกว่าผลผลิตที่ได้จากการใช้สารอินทรีย์ในการสกัด	Novo et al. (2016)
ซังข้าวโพด	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (64 wt%)	Acid hydrolysis	วิธีการสกัดส่งผลต่อลักษณะสัณฐานและคุณสมบัติของนาโนเซลลูโลสที่ได้ โดยนาโนเซลลูโลสที่สกัดด้วยวิธี tempo oxidation มี aspect ratio สูงสุด (ความยาว:ความหนา) และมีขนาดเส้นใยสม่ำเสมอ วิธี acid hydrolysis ทำให้เส้นใยมีความเป็นผลึกและความคงตัวทางความร้อนสูงสุด แต่มี aspect ratio ต่ำที่สุดในขณะที่วิธี high intensity ultrasonication มีขนาดเส้นใยไม่สม่ำเสมอ ความเป็นผลึกต่ำ ความเสถียรในการกระจายตัวต่ำ	Yang et al. (2017)
	DMSO TEMPO NaBr	Tempo oxidation		
	-	High intensity ultrasonication		
เปลือกส้ม	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> N <sub>4</sub> (0.98 wt%) HCl (0.18 wt%) NaOH (0.20 wt%)	Multistep และ Sonication	วิธี hydrothermal เป็นวิธีที่ง่ายกว่าและมีประสิทธิภาพในการกำจัดเพคตินมากกว่าวิธี multistep โดยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกันคือหนา 2-3 นาโนเมตร	Hiasa et al. (2014)
	HCl (0.18 wt%)	Hydrothermal และ Sonication		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงผลการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลส	วัตถุดิบเริ่มต้น	วิธีผลิตนาโนเซลลูโลส	ผลการทดลอง	ผู้วิจัย
NFC	ไม้เนื้ออ่อน	Tempo-oxidation	ฟิล์มมีความใสและยืดหยุ่น รวมทั้งมีคุณสมบัติป้องกันออกซิเจนและ tensile strength ที่ดี ในขณะที่เดียวกันก็มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำและมีลักษณะที่ชอบน้ำ (hydrophilic)	Fukuzumi et al. (2009)
CNC	Microcrystalline cellulose (MCC)	Acid hydrolysis	CNC ที่ผลิตจากกากในกระบวนการผลิตเอทานอลและเศษวัสดุชีวมวล มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับ CNC ที่ผลิตจาก MCC โดยฟิล์ม CNC ที่ผลิตจากเศษวัสดุและกากเหลือ มีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า เนื่องจากมีประจุที่พื้นผิวต่ำกว่า แต่ในขณะที่เดียวกัน ประจุเหล่านี้ก็ส่งผลต่อการกระจายตัวของ CNC ในแผ่นฟิล์ม ทำให้ CNC ที่ผลิตจาก MCC มีการกระจายตัวที่ดีกว่า CNC ที่ผลิตจากเศษวัสดุกากเหลือ	Herrera (2015)
	กากจากกระบวนการผลิตเอทานอล	กรดอะซิติกและเกลือโซเดียม-คลอไรด์ ร่วมกับการให้ความร้อน		
	เศษวัสดุชีวมวล	Acid hydrolysis		
NFC	กากแครอท	Ball milling	NFC มีค่าดัชนีความเป็นผลึกเท่ากับ 69% ในขณะที่ CNC ค่าดัชนีความเป็นผลึกเท่ากับ 78% เมื่อผลิตเป็นฟิล์มพบว่าฟิล์ม CNC มีลักษณะใสมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์ม NFC มีความยืดหยุ่นมากกว่า และมีรูปพรุนน้อยกว่า	Rajinipriya et al. (2018)
CNC		Acid hydrolysis		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตน

Polymer Matrix	สารเติมแต่ง	สิ่งที่เคลือบ	ผลการทดลอง	ผู้วิจัย
โคโตน (1 wt%) นาโนเซลลูโลส (10, 20 และ 30 wt%, dry basis)	-	-	โคโตนที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 30% มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด การเพิ่มความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสจะทำให้ tensile strength และ Young's modulus เพิ่มขึ้น แต่ค่า elongation at break จะลดลง	Dong et al. (2014)
โคโตน (1 wt%) นาโนเซลลูโลส (5 wt%, dry basis)	-	แตงกวา	สารละลายนาโนเซลลูโลสผสมโคโตนสามารถคงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาแตงกวาได้	Dong et al. (2016)
โคโตน (2 wt%) CNC (0, 5 และ 10 wt%, dry basis)	ทวิน 80 (10 wt%) สแปน 80 (10 wt%)	ลูกแพร์	ที่อุณหภูมิห้อง สารละลายโคโตนผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 5% สามารถชะลอการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ลดการเกิดแผลและการเกิดสีน้ำตาลในลูกแพร์ ช่วยคงความแน่นเนื้อของลูกแพร์ไว้ได้	Deng et al. (2017a)
โคโตน (2 wt%) นาโนเซลลูโลส (0.2 wt%) กลีเซอรอล (0.4 wt%)	ทวิน 80 (0.2, 1 wt%) กรดโอเลอิก (1 wt%) ซูโครสเอสเทอร์ของกรดไขมัน (1 wt%)	กล้วย	การเติมกรดโอเลอิก 1% และซูโครสเอสเทอร์ของกรดไขมัน 1% จะช่วยเพิ่มความคงตัวและสามารถลดการซึมผ่านของน้ำได้ดีที่สุด ส่งผลให้สามารถลดการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ ลดการสูญเสียน้ำ และช่วยคงความแน่นเนื้อของกล้วยไว้ได้	Deng et al. (2017b)
CNF (0.1 wt%)	ทวิน 80 (0.03, 1 wt%) กรดโอเลอิก (1 wt%) ซูโครสเอสเทอร์ของกรดไขมัน (1 wt%)			
โคโตน (2 wt%) CNC (0.1 wt%)	กรดโอเลอิก (3 wt%)	ลูกแพร์	การเติมกรดโอเลอิกจะทำให้สารละลายโคโตนผสมนาโนเซลลูโลสมีความเสถียรมากขึ้น สามารถทนต่อความชื้นสัมพัทธ์สูงได้ ชะลอการสุกและลดแผลที่เกิดในลูกแพร์ได้ดี	Deng et al. (2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

#### 3.1.1 วัสดุดิบ

3.1.1.1 เปลือกหน่อไม้ (*Thyrsostachys siamensis*, จังหวัดกาญจนบุรี, ประเทศไทย)

#### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 กลีเซอรอล ( $C_3H_8O_3$ , 99.5% solution, AR grade, Leonid Chemicals, ประเทศอินเดีย)

3.1.2.2 กรดอะซิติก (Glacial  $CH_3COOH$ , 99.8% solution, AR grade, QRec, ประเทศนิวซีแลนด์)

3.1.2.3 กรดโอเลอิก ( $C_{18}H_{34}O_2$ , Extra Pure, QRec, ประเทศนิวซีแลนด์)

3.1.2.4 ทวิน 80 ( $C_{64}H_{124}O_{26}$ , Extra Pure, QRec, ประเทศนิวซีแลนด์)

3.1.2.5 เอทานอล ( $C_2H_5OH$ , 95% solution, AR grade, RCI Labscan, ประเทศไทย)

3.1.2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, beads, AR grade, RCI Labscan, ประเทศไทย)

3.1.2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ , 30% solution, AR grade, Merck, ประเทศเยอรมัน)

3.1.2.8 ไคโตซาน (MW  $1.14 \times 10^6$  ดาลตัน, Ta Ming enterprise Co., Ltd, ประเทศไทย)

3.1.2.9 อาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient Agar (NA, Himedia, ประเทศอินเดีย)

3.1.2.10 อาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller Hinton Agar (MHA, Himedia, ประเทศอินเดีย)

3.1.2.11 อาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller Hinton Broth (MHB, Himedia, ประเทศอินเดีย)

3.1.2.12 อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA, Himedia, ประเทศอินเดีย)

3.1.2.13 อาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA, Merck, ประเทศเยอรมัน)

### 3.2 อุปกรณ์

3.2.1 กระดาษกรอง Whatman No.1 (GE Healthcare, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3.2.2 ไมโครมิเตอร์ รุ่น 103-137 (Mitutoyo (Thailand) Co., Ltd., ประเทศไทย)

3.2.3 เครื่องปั่นอเนกประสงค์ รุ่น ErgoMixx (Bosch, ประเทศไทย)

3.2.4 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3.2.5 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (IKA Works (Thailand), ประเทศไทย)

3.2.6 เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ รุ่น Tomy (Es-315, ประเทศญี่ปุ่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.7 เครื่องบดกิ่งไม้ (Maejo AG Engineering, ประเทศไทย)
- 3.2.8 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 3.2.9 เครื่องวัดค่าพีเอช (Hanna instruments, USA)
- 3.2.10 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น TA.XT plus (Stable Micro system, ประเทศอังกฤษ)
- 3.2.11 เครื่องอบเจล (Shimadzu Corp., ประเทศออสเตรเลีย)
- 3.2.12 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Koyka Electronics, ประเทศอินเดีย)
- 3.2.13 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (EFL2000, Endecotts, ประเทศอังกฤษ)
- 3.2.14 เครื่องวัด Contact angle รุ่น OCA20 (DataPhysics Instruments, ประเทศเยอรมัน)
- 3.2.15 เครื่องวัด Digital dual-range mixer รุ่น RW20 (IKA Works (Thailand), ประเทศไทย)
- 3.2.16 เครื่อง FTIR Spectrometer รุ่น Invenio (Bruker (Thailand), ประเทศไทย)
- 3.2.17 เครื่อง Hammer mill (Jiangyin Baoli Machinery, China)
- 3.2.18 เครื่อง UV Visible spectrophotometer (Shimadzu, Bara Scientific Co., Ltd., ประเทศไทย)
- 3.2.19 เครื่อง Scanning electron microscopy รุ่น LEO1455VP (LEO, ประเทศเยอรมัน)
- 3.2.20 ตู้บ่มเชื้อ รุ่น Model 400 (Mettler, ประเทศเยอรมัน)
- 3.2.21 ตู้บ่มร้อน รุ่น UF55 (Mettler, ประเทศเยอรมัน)
- 3.2.22 ตู้ปลอดเชื้อ รุ่น HVB120S (Bosstech, ประเทศเยอรมัน)
- 3.2.23 ถังปฏิกรณ์แรงดันสูง รุ่น HYD-100 (Tefic Biotech, China)
- 3.2.24 ปีมสุญญากาศ รุ่น WJ-20 (Sibata, Japan)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสกัดแยกเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้

3.3.1.1 นำเปลือกหน่อไม้รวก มาสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องบดกิ่งไม้ (branch grinder) แล้วไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้เปลือกหน่อไม้แห้งดังรูปที่ 3.1 จากนั้น บดละเอียดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง hammer mill แล้วร่อนด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 80-mesh บรรจุใส่ถุง PP เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.1 เปลือกหน่อไม้แห้งที่ผ่านการอบแห้ง

3.3.1.2 นำผงเปลือกหน่อไม้ปริมาณ  $10 \pm 0.05$  กรัม ไปสกัดด้วยวิธี Alkaline Peroxide (Jiang and Hsieh, 2015) โดยเติมลงไปนสารละลาย 5 %NaOH ปริมาตร 300 มิลลิลิตร วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อย่อยองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลส จากนั้นกรองโดยใช้มัสสุญญากาศ แล้วนำส่วนตะกอนมาล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95 % นำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

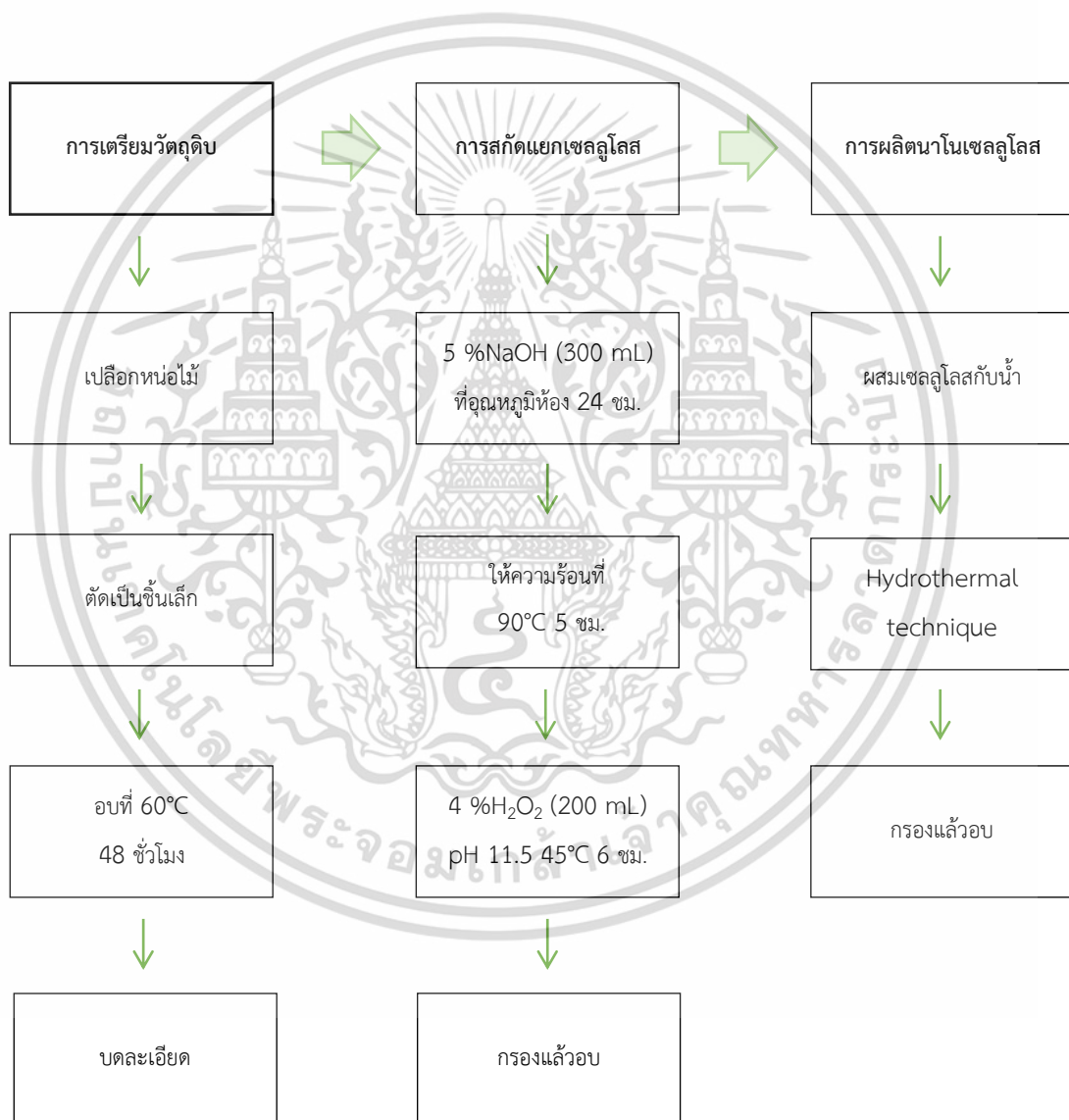
3.3.1.3 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.1.2 ไปฟอกขาวด้วยสารละลาย 4 %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 11.5 ด้วย 5 %NaOH แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดลิกนินและองค์ประกอบอื่นที่หลงเหลืออยู่ จากนั้นกรองล้างด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 400 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน จะได้เป็นเซลลูโลส นำไปเก็บในบริเวณที่ปราศจากความชื้น

#### 3.3.2 การผลิตเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วยวิธี hydrothermal

นำเซลลูโลสปริมาณ  $5 \pm 0.05$  กรัมจากข้อ 3.3.1.3 มาผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ในถังปฏิกรณ์แรงดันสูง (autoclave reactor) จากนั้นอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไป 1 บาร์ ให้ความความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Novo et al., 2016) เพื่อย่อยโมเลกุลเซลลูโลสจนมีขนาดเป็นนาโน จากนั้นนำไปกรองล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 400 มิลลิลิตร แล้วทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน เก็บในบริเวณที่ปราศจากความชื้น โดยคำนวณหาปริมาณนาโนเซลลูโลสได้ดังนี้

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{น้ำหนักนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักผงเปลือกหน่อไม้ที่ใช้ในการสกัด}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 กระบวนการสกัดนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 ศึกษาชนิดและลักษณะทางกายภาพของนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้

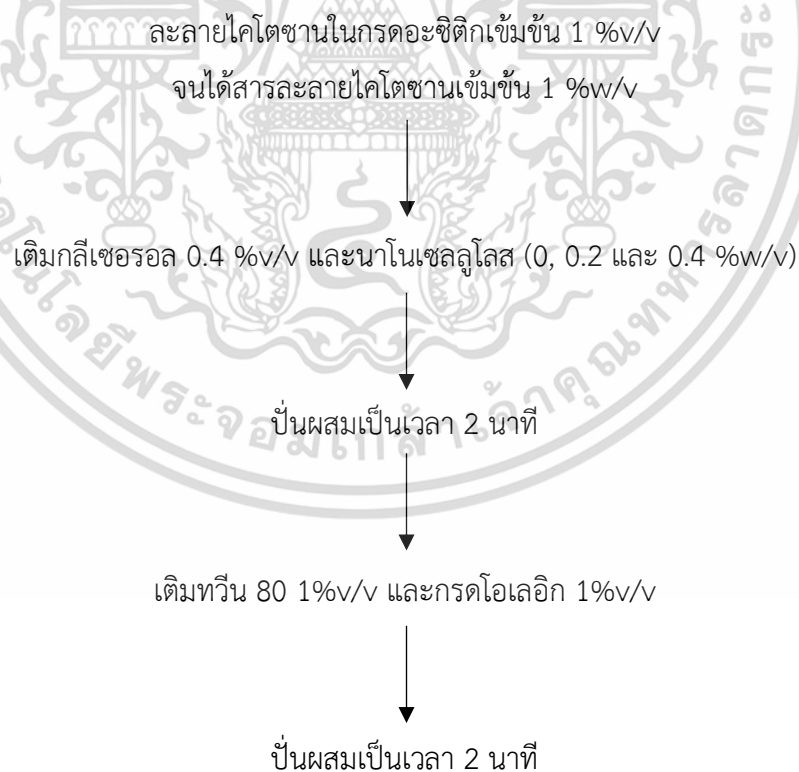
ศึกษาชนิดและลักษณะของนาโนเซลลูโลสที่ได้จากข้อ 3.3.2 ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

3.3.3.1 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเปลือกหน่อไม้ เซลลูโลสและนาโนเซลลูโลส โดยนำตัวอย่างแห้งมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR Spectrometer รุ่น Invenio ยี่ห้อ Bruker ประเทศไทย โดยใช้เทคนิค attenuated total reflection (ATR-FTIR) วิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น  $650-4000\text{ cm}^{-1}$

3.3.3.2 Scanning electron microscopy (SEM) ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานของเปลือกหน่อไม้ เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส โดยนำตัวอย่างแห้งมาเคลือบอนุภาคทองคำ (gold nanoparticle) และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง scanning electron microscopy รุ่น LEO1455VP ยี่ห้อ LEO ประเทศเยอรมัน โดยวิเคราะห์ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

### 3.3.4 การผลิตสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน

นำนาโนเซลลูโลสที่ได้จากข้อ 3.3.2 มาผสมกับสารละลายโคโตซาน แล้วเติมกลีเซอรอล, ทวิน 80 และกรดโอเลอิก (ดัดแปลงจาก Deng et al., 2017b) จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ บรรจุลงขวดดูแรม โดยศึกษานาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 0 %w/v, 0.2 %w/v, และ 0.4 %w/v และมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการผลิตสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน

ที่มา: Deng et al. (2017b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การตรวจวิเคราะห์สารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน

นำสารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้นต่างๆ จากข้อ 3.3.4 มาทำการทดสอบ ดังนี้

3.3.5.1 คุณสมบัติการไหล (Rheology) วัดโดยใช้จุ่มหัว spindle ที่ต่อกับเครื่อง Brookfield ลงในสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานที่ความเร็ว 140-240 รอบต่อนาที แล้วจดบันทึกค่าความหนืด (viscosity) มีหน่วยเป็น centipoises (cP), ค่าความเค้นเฉือน (shear stress) มีหน่วยเป็น dynes/square centimeter (D/cm<sup>2</sup>) และค่าอัตราการเฉือน (shear rate) มีหน่วยเป็น 1/seconds (sec<sup>-1</sup>) จากนั้นนำไปพลอตเป็นกราฟ เพื่อดูแนวโน้มและศึกษาพฤติกรรมของการไหลของสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน เมื่อผสมนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

### 3.3.6 การตรวจวิเคราะห์ฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน

นำสารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้นต่างๆ มาขึ้นรูปฟิล์ม โดยชั่งสารเคลือบ 150 กรัม เทลงบนแผ่นอะคริลิกขนาด 20×24 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำเข้าเครื่องอบเจล ที่อุณหภูมิ 37.5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก พรพฐ อัดแอ, 2562) แล้วลอกแผ่นฟิล์มออก เลือกแผ่นฟิล์มที่มีขนาดความหนาระหว่าง 0.090-0.093 มิลลิเมตร มาทำการทดสอบต่อไป เพื่อศึกษาผลของนาโนเซลลูโลสที่มีต่อฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน ดังนี้

3.3.6.1 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angle, °) วิเคราะห์โดยหยดน้ำลงบนแผ่นฟิล์ม แล้วใช้เครื่อง contact angle analyzer รุ่น OCA20 ยี่ห้อ DataPhysics Instruments ประเทศเยอรมัน ในการวัดขนาดของมุมหยดน้ำที่เกิดขึ้น เพื่อศึกษาความสามารถในการป้องกันน้ำ และดูดซับน้ำของฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสแตกต่างกัน

3.3.6.2 Scanning electron microscopy (SEM) ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน เมื่อผสมนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยนำฟิล์มมาเคลือบอนุภาคทองคำ (gold nanoparticle) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง scanning electron microscopy รุ่น LEO1455VP ยี่ห้อ LEO ประเทศเยอรมัน กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

3.3.6.3 ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test) นำฟิล์มขนาด 40×20×0.09 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มาวิเคราะห์ตามวิธี ASTM D882 โดยใช้ ใช้หัว tensile grip ในการยึดแผ่นฟิล์มทั้งสองด้านจนเหลือพื้นที่สำหรับทดสอบฟิล์มยาว 20 มิลลิเมตร จากนั้นดึงด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส รุ่น TA.XT plus ยี่ห้อ Stable Micro system ประเทศอังกฤษ จากนั้นศึกษาแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและเวลาที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มดึงยึดฟิล์มจนกระทั่งแผ่นฟิล์มขาด บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด และระยะทางที่ฟิล์มยืด นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการต้านแรงดึงขาด (tensile strength) และความสามารถในการยืดตัวของฟิล์ม (elongation) ของฟิล์ม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (นิวตัน)}}{\text{ความกว้าง} \times \text{ความหนาของแผ่นฟิล์ม (ตารางมิลลิเมตร)}} \quad (3.2)$$

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $L_0$  = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์มบริเวณที่ยึด (มิลลิเมตร)

$L$  = ระยะทางที่ฟิล์มยืดออก (มิลลิเมตร)

3.3.7 การศึกษาความสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial activity) ของสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน

#### 3.3.7.1 ทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย

ทำโดยนำเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในอาหาร ได้แก่ *Escherichia coli* (*E. coli*), *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Bacillus cereus* (*B. cereus*) มาเพาะเลี้ยงในอาหาร Mueller hinton broth (MHB) บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง จากนั้นปรับความเข้มข้นด้วย sterile sodium chloride 0.85 % โดยให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับสารละลาย McFarland No.0.85 % จะได้เชื้อความเข้มข้นของจำนวนเซลล์แบคทีเรียเท่ากับ  $1.5 \times 10^8$  CFU/mL นำเชื้อแบคทีเรียที่ปรับความเข้มข้นแล้วมาทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียตามวิธีของ CLSI (The Clinical and Laboratory Standards Institute) guidelines 2009 ดังนี้

- การทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อได้ (Minimum inhibitory concentration; MIC)

ใช้ไมโครปิเปตดูดอาหาร MHB มาปริมาณ 100  $\mu$ L ลงในแต่ละหลุมของถาดหลุมเพาะเชื้อ (96 well plate) จากนั้นเติมสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานจากข้อ 3.3.4 มาปริมาณ 100  $\mu$ L เติกลงไปในหลุมแรก คนให้สารในหลุมแรกผสมเข้ากันแล้วดูดขึ้นมา 100  $\mu$ L ทำการเติมลงไปในหลุมที่ 2 ต่อ ดังรูปที่ 3.4 ทำการเจือจางแบบนี้ไปจนถึงความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการทดสอบ จากนั้นให้เติมเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมไว้มาลงในแต่ละหลุม หลุมละ 50  $\mu$ L จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง กำหนดให้มีตัวควบคุม (control) 2 แบบ คือ positive control ที่เติมเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อและเชื้อจุลินทรีย์ และ negative control ที่เติมเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อและสารตัวอย่างที่ทดสอบ บันทึกผลโดยจดสังเกตความขุ่นใสของอาหารที่ไม่มีเชื้อเจริญ หากเจอเชื้อเจริญขึ้นในหลุมให้บันทึกผลเป็นบวก แต่หากไม่เจอเชื้อเจริญในหลุมให้บันทึกผลเป็นลบโดยเปรียบเทียบกับ positive control และ negative control ความเข้มข้นน้อยที่สุดของสารเคลือบที่ไม่มีการเจริญของเชื้อคือความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อได้

- การทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ (Minimum bactericidal concentration; MBC)



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้

จากการศึกษาการผลิตนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ โดยใช้วิธี alkaline peroxide และตามด้วยกระบวนการ hydrothermal ในรูปที่ 4.1(ก) เปลือกหน่อไม้หลังจากการอบแห้งมีสีน้ำตาลอมเขียว ใบค่อนข้างเหนียว สามารถตัดเป็นชิ้นๆ ได้ แต่ไม่อาจดึงขาดได้ด้วยมือเปล่า เมื่อนำไปบดเป็นผงแล้วผ่านการสกัดด้วยวิธี alkaline peroxide จะได้เซลลูโลสดังรูปที่ 4.1(ข) เซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กสีขาวขุ่นค่อนข้างโปร่งเหลืองอ่อนเล็กน้อย น้ำหนักเบาและอยู่เกาะกลุ่มกัน ปริมาณผลผลิตของเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้เท่ากับ 34.60 % เมื่อนำไปผ่านกระบวนการ hydrothermal จะได้นาโนเซลลูโลสที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1(ค) นาโนเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะขาวมากขึ้น น้ำหนักเบา เส้นใยมีลักษณะเกาะกันเองเป็นกลุ่ม ปริมาณผลผลิตของนาโนเซลลูโลสเท่ากับ 32.56%



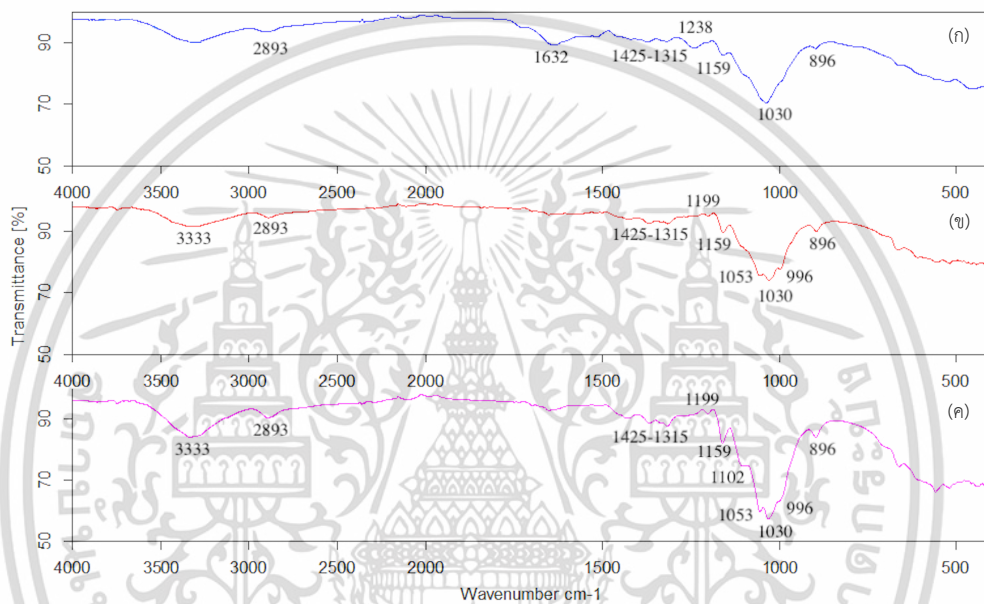
รูปที่ 4.1 ภาพของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส และ (ค) นาโนเซลลูโลส

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย

จากการศึกษาการสกัดนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างของเปลือกหน่อไม้ เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลส ในรูปที่ 4.2(ก) จะเห็นได้ว่าเปลือกหน่อไม้แสดงหมู่ฟังก์ชัน C=O ที่ช่วงความยาวคลื่น  $1632\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ที่ช่วงความยาวคลื่น  $1238\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบของลิกนิน (Morán et al., 2008) นอกจากนี้เปลือกหน่อไม้ยังแสดงพีคของนาโนเซลลูโลสบางส่วน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2015) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกหน่อไม้ นอกจากจะประกอบไปด้วยเซลลูโลสเป็นจำนวนมากแล้ว ยังมีลิกนินอยู่อีกประมาณ 5-11 % รูป 4.2(ข) แสดงสเปกตรัม FTIR ของเปลือกหน่อไม้หลังผ่านการสกัดด้วยวิธี Alkaline Peroxide จนได้เป็นเซลลูโลสออกมา จากรูปจะเห็นพีคที่สำคัญต่างๆ ของเซลลูโลส ทั้งหมู่ฟังก์ชัน O-H ที่ช่วงความยาวคลื่น  $3333\text{ cm}^{-1}$ , หมู่ฟังก์ชัน C-H ที่ช่วงความยาวคลื่น  $2893\text{ cm}^{-1}$ , หมู่ฟังก์ชัน  $\text{CH}_2$  ที่ช่วงความยาวคลื่น  $1425-1199\text{ cm}^{-1}$ , หมู่ฟังก์ชัน C-O ที่ช่วงความยาวคลื่น  $1053\text{ cm}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{cm}^{-1}$  และ  $1030 \text{ cm}^{-1}$  รวมทั้งพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) ที่ช่วงความยาวคลื่น  $996 \text{ cm}^{-1}$  (Hospodarova et al., 2018) ในรูป 4.2(ค) เป็นแสดงสเปกตรัมของเปลือกหน่อไม้หลังจากกระบวนการ hydrothermal ซึ่งพีคของเซลลูโลสถูกแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนมากขึ้น โดยทั้งเซลลูโลสและนาโนเซลลูโลสต่างแสดงพีคที่ช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khalil et al. (2014) ซึ่งอธิบายลักษณะของนาโนเซลลูโลสไว้ว่าเป็นเซลลูโลสที่ถูกลดขนาดผ่านกระบวนการทั้งเชิงกลและเชิงเคมีต่างๆ จนมีขนาดอยู่ในหน่วยนาโนเมตร ทำให้ทั้งเซลลูโลสและนาโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.2 FTIR spectra ในช่วงความยาวคลื่น  $650\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$  ของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส และ (ค) นาโนเซลลูโลส

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของเส้นใย

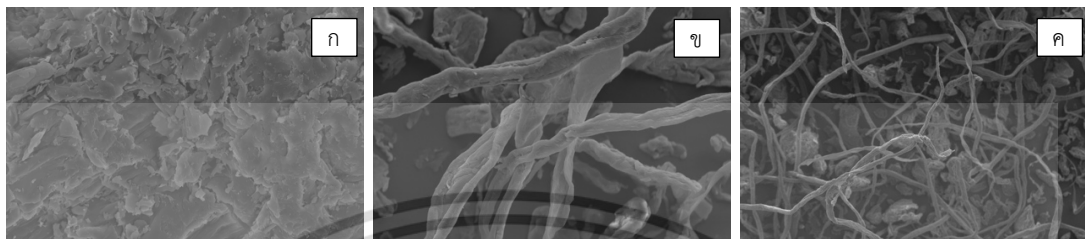
จากการศึกษาลักษณะทางภาพของเปลือกหน่อไม้ เซลลูโลส และนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี alkaline peroxide และกระบวนการ hydrothermal โดยใช้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5000 เท่า รูปที่ 4.3(ก) แสดงลักษณะพื้นฐานของเปลือกหน่อไม้ซึ่งมีชั้นที่เกิดจากองค์ประกอบต่างๆของเส้นใยพืช ทั้งลิกนิน เฮมิเซลลูโลส รวมถึงโปรตีนขนาดเล็กต่างๆ ปกคลุมอยู่ รูปที่ 4.3(ข) แสดงให้เห็นเส้นใยเซลลูโลสหลังจากองค์ประกอบอื่นถูกกำจัดออกไปหลังการสกัดด้วยวิธี alkaline peroxide ซึ่งแสดงว่ากระบวนการนี้สามารถกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiang และ Hsieh (2015) ซึ่งใช้วิธีดังกล่าวในการสกัดแยกเซลลูโลสออกจากเปลือกมะเขือเทศเช่นกัน รูปที่ 4.3(ค) แสดงลักษณะพื้นฐานของเส้นใยนาโนเซลลูโลสหลังจากกระบวนการ hydrothermal จากรูปจะเห็นว่าเส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจาก

กระบวนการ hydrothermal ส่งผลน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดขณะที่อยู่ในสถานะของเหลว ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤติ (subcritical water) ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงจนได้เป็นสายเส้นใยนาโนเซลลูโลส ชนิดนาโนไฟบริล (CNF) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sasaki et al. (2000) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการสกัดด้วยน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติ จะทำให้อนุภาคของเซลลูโลสมีขนาดเล็กลง โดยจะแปรผันตรงกับเวลา นั่นคือเซลลูโลสจะมีขนาดอนุภาคเล็กลง เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

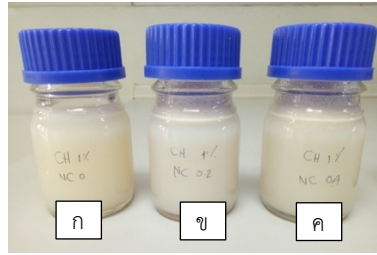


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายในระดับจุลภาคของ (ก) เปลือกหน่อไม้, (ข) เซลลูโลส, (ค) นาโนเซลลูโลส ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

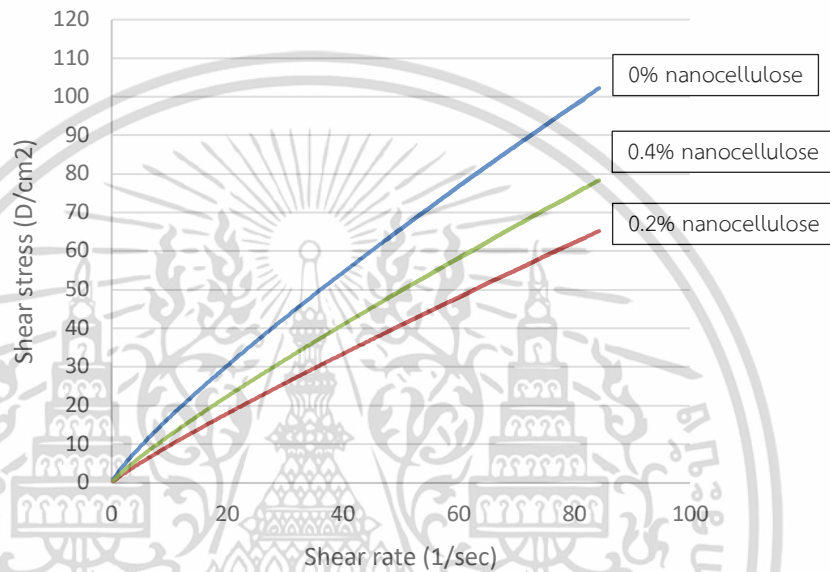
#### 4.2 ผลของนาโนเซลลูโลสร่วมกับไคโตซานที่มีต่อการผลิตสารเคลือบ

จากการศึกษาการผลิตสารเคลือบไคโตซานผสมนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ ที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสเท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 %w/v พบว่าสารเคลือบที่ได้มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น และมีความข้นหนืดเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงรีโอโลยี (rheology) พบว่าสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning ชนิด Pseudoplastic คือเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) ขึ้น จะส่งผลให้ความเค้นเฉือน (shear stress) เพิ่มขึ้น และความหนืด (viscosity) ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

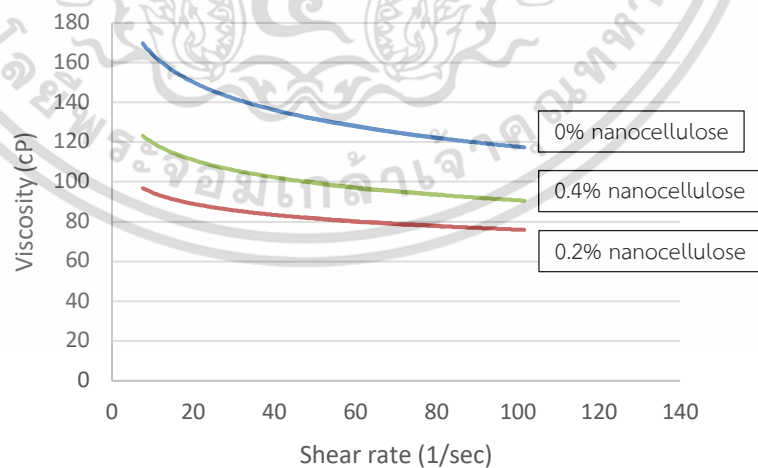
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบสารเคลือบไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสและไม่ผสมนาโนเซลลูโลส พบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสลงไป จะทำให้สารเคลือบมีความหนืดลดลง ดังจะเห็นได้จากเส้นแนวโน้มของสารเคลือบที่เติมนาโนเซลลูโลส 0.2 %w/v มีความหนืดต่ำสุด เนื่องจากไคโตซานเป็นส่วนประกอบที่ทำให้สารเคลือบมีความหนืด การเติมนาโนเซลลูโลสเข้าไปในปริมาณน้อย จะไปขัดขวางการเกี่ยวพันกันระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน (intermolecular entanglement) ส่งผลให้ความหนืดของสารเคลือบลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bodak (2000) ที่แสดงให้เห็นว่าการเติม microcrystalline cellulose ลงไปในไคโตซาน จะทำให้ไคโตซานมีความหนืดปรากฏลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเซลลูโลสในสารเคลือบไคโตซานมากขึ้น สารเคลือบจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากเส้นแนวโน้มของสารเคลือบไคโตซานที่เติมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v เนื่องจากเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสมีนามากเพียงพอ นาโนเซลลูโลสจะแสดงลักษณะของสารที่เชื่อมโยงกัน (cross linking agent) ส่งผลให้พอลิเมอร์ถูกเชื่อมเข้าหากัน ทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น (Hubbe et al., 2017)



รูปที่ 4.4 สารเคลือบที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น (ก) 0 %w/v, (ข) 0.2 %w/v และ (ค) 0.4 %w/v



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของสารเคลือบ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือนของสารเคลือบ

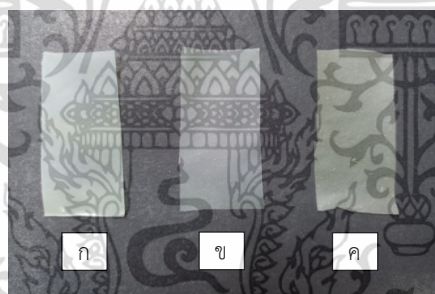
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์ม

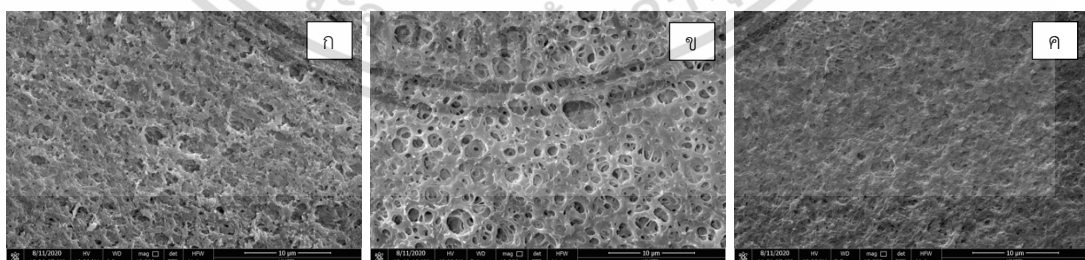
#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ Scanning electron microscopy (SEM) ของแผ่นฟิล์ม

ในการทดลองขึ้นรูปฟิล์มจากสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน จะได้แผ่นฟิล์มที่มีสีเหลืองอ่อน ลักษณะขุ่นเล็กน้อย ฟิล์มที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลสจะมีผิวสัมผัสเรียบ ในขณะที่ฟิล์มผสมนาโนเซลลูโลสจะมีผิวสัมผัสขรุขระเล็กน้อยจากนาโนเซลลูโลสที่เติมเข้าไป ดังรูปที่ 4.7

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสความเข้มข้นแตกต่างกัน ในรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่กำลังขยาย 10000 เท่า จะเห็นได้ว่าฟิล์มไคโตซานที่ไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส มีความขรุขระและปรากฏรูพรุนเล็กน้อยบนแผ่นฟิล์ม แต่เมื่อเติมนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 0.2 %w/v พบว่าแผ่นฟิล์มมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น และรูพรุนขยายใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบบรีโอบิลีซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมนาโนเซลลูโลสในปริมาณเล็กน้อยจะไปขัดขวางการยึดเกาะกันของโมเลกุลไคโตซาน ทำให้แผ่นฟิล์มปรากฏรูพรุนมากขึ้น ในขณะเดียวกัน แผ่นฟิล์มที่เติมนาโนเซลลูโลสเข้าไปมากขึ้นเป็น 0.4 %w/v มีรูพรุนน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส แสดงให้เห็นว่าปริมาณนาโนเซลลูโลสที่มากขึ้น จะช่วยเป็นตัวประสานในการยึดเกาะกันของไคโตซาน ทำให้โมเลกุลของไคโตซานเชื่อมเข้าหากันดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hubbe et al. (2017)



รูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น (ก) 0 %w/v, (ข) 0.2 %w/v และ (ค) 0.4 %w/v



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น (ก) 0 %w/v, (ข) 0.2 %w/v และ (ค) 0.4 %w/v ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle) บนแผ่นฟิล์ม

จากการศึกษามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์ม ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า แผ่นฟิล์มไคโตซานที่ไม่ได้เติมนานโนเซลลูโลสมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำสูงที่สุด โดยมีค่ามุมสัมผัสด้านซ้ายเท่ากับ  $68.5^\circ$  และด้านขวาเท่ากับ  $62.4^\circ$  ในทางตรงกันข้าม ฟิล์มไคโตซานที่เติมนานโนเซลลูโลสเข้มข้น  $0.4\% \text{ w/v}$  มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำที่สุด โดยมีค่ามุมสัมผัสด้านซ้ายเท่ากับ  $44.4^\circ$  และด้านขวาเท่ากับ  $41.8^\circ$  ในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าหยดน้ำที่เกาะบนแผ่นฟิล์ม มีขนาดและค่ามุมสัมผัสลดน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้เมื่อนำไปผสมลงในฟิล์มไคโตซาน จะทำให้แผ่นฟิล์มมีการดูดซับน้ำมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจึงลดน้อยลง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานไม่สามารถทนต่อความชื้นสูงได้ เพราะจะทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำในปริมาณมากและเสื่อมสภาพลงไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ Deng et al. (2017a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลูกแพรที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่างนาโนเซลลูโลสและไคโตซานมีประสิทธิภาพลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเก็บในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน

ฟิล์ม	ค่ามุมสัมผัส ( $^\circ$ )	
	ซ้าย	ขวา
0% nanocellulose	68.50	62.40
0.2% nanocellulose	52.00	49.80
0.4% nanocellulose	44.40	41.80



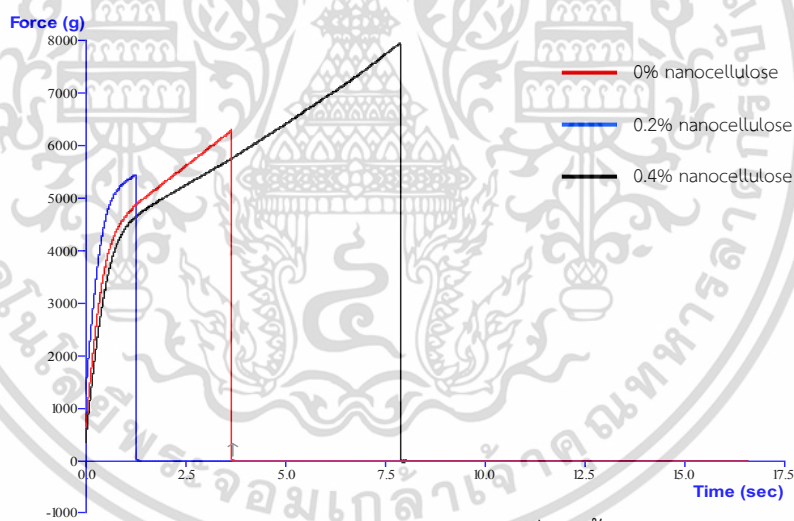
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น (ก)  $0\% \text{ w/v}$ , (ข)  $0.2\% \text{ w/v}$  และ (ค)  $0.4\% \text{ w/v}$

#### 4.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของแผ่นฟิล์ม

จากการทดสอบแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อแผ่นฟิล์มและเวลาในการทำให้แผ่นฟิล์มขาด โดยเส้นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นคือแรงที่ใช้ในการดึงยึดแผ่นฟิล์มซึ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มขาด เส้นแนวโน้มก็จะตัดลงมาตำแหน่งที่แรงกระทำเท่ากับ 0 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0.2 %w/v มีความคงทนต่อการดึงน้อยสุด โดยใช้แรงดึงน้อยที่สุดและเวลายาวนานที่สุดในการทำให้ฟิล์มขาด ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลส ทนต่อการดึงขาดมากกว่าฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.2 %w/v ส่วนฟิล์มที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v ทนต่อการดึงขาดมากที่สุด สังเกตจากการที่เส้นแนวโน้มของฟิล์มมีแรงกระทำมากที่สุดและใช้เวลานานที่สุดกว่าฟิล์มจะขาด โดยการต้านแรงดึงขาด (tensile strength) และความสามารถในการยืดตัวของฟิล์ม (elongation) มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส 0.2 %w/v ไม่เพียงพอต่อการทำให้ฟิล์มแข็งแรงและคงทนมากขึ้น และยังทำให้ฟิล์มขาดง่ายกว่าตอนที่ยังไม่เติมนาโนเซลลูโลส ในทางตรงกันข้าม การเติมนาโนเซลลูโลสลงในฟิล์มโดยให้ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสเป็น 0.4 %w/v จะส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและคงทนมากขึ้นกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลส เนื่องจากมีปริมาณของนาโนเซลลูโลสเพียงพอในการยึดโยงกับไคโตซาน ทำให้ฟิล์มทนต่อการดึงขาดได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่แสดงให้เห็นว่าฟิล์มไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v มีลักษณะแข็งแรง และมีรูพรุนน้อยที่สุด



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงต้านทานการดึงและความยืดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน

Film	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0.4% nanocellulose	43.50	39.40
0.2% nanocellulose	29.83	6.34
0% nanocellulose	34.47	18.27
Standard deviation	6.95	16.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

##### 4.4.1 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียของสารเคลือบ

##### 4.4.1.1 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อได้ (MIC)

ในการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน สามารถยับยั้งเชื้อได้ จะใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเคลือบ 10 ความเข้มข้นในการทดสอบ โดยสังเกตผลการทดสอบจากตะกอนของเชื้อที่เกิดขึ้น หากเชื้อเจริญจะเห็นตะกอนสีขาวขุ่นของเชื้ออยู่ที่ก้นหลุม แต่หากเชื้อไม่เจริญจะเห็นเพียงสีขาวขุ่นของสารเคลือบที่กระจายตัวในอาหารเลี้ยงเชื้อ ไม่มีตะกอนของเชื้อเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 จาก การทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *B. cereus* และ *S. aureus* พบว่า สารเคลือบทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0, 0.2 และ 0.4 %w/v มีความสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อเท่ากัน โดยปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ *B. cereus* ได้เท่ากับ 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้เท่ากับ 6.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แต่ในการทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* พบว่า สารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0 และ 0.4 %w/v สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* ที่ความเข้มข้นต่ำสุดเท่ากับ 6.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่การทดสอบยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของสารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0.2 %w/v พบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* ได้คือ 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการทำการทดลอง ทำให้ผลที่ได้มีค่าแตกต่างจากสารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสอีกสองความเข้มข้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสที่เติมลงในสารเคลือบไม่มีผลต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย เนื่องจากสารเคลือบโคโตซานที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลสแสดงความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียเท่ากับสารเคลือบที่เติมนาโนเซลลูโลส จึงสรุปได้ว่าความสามารถในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียมาจากส่วนประกอบรวมอย่างโคโตซาน สอดคล้องกับผลการวิจัยของ ฐิติมา สุขมาก และคณะ (2553) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโคโตซานมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี

##### ตารางที่ 4.3 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ *B. cereus* ได้

Coating suspension	Growth of <i>Bacillus cereus</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
0.2% nanocellulose	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
0.4% nanocellulose	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus*

Coating suspension	Growth of <i>Staphylococcus aureus</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
0.2% nanocellulose	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
0.4% nanocellulose	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)

ตารางที่ 4.5 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้

Coating suspension	Growth of <i>Escherichia coli</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
0.2% nanocellulose	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
0.4% nanocellulose	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)



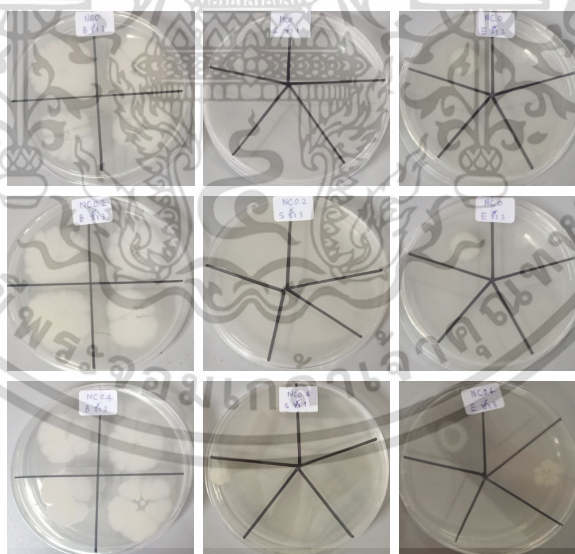
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถยับยั้งเชื้อได้ (MIC)

#### 4.4.1.2 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อได้ (MBC)

ในการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ ทำโดยนำตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ MIC มาหาผลลัพธ์ต่อ โดยนำตัวอย่างจากหลุมที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อได้มาเลี้ยงลงบนอาหาร nutrient agar ต่อ เพื่อทดสอบว่าเชื้อดังกล่าว ถูกทำลายไปแล้วหรือไม่ ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ในการทดสอบพบว่า สารเคลือบทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สารเคลือบไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0, 0.2 และ 0.4 %w/v มีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียเท่ากัน จากการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* พบว่าเกิดโคโลนีของเชื้อขึ้นในทุกจุดที่หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างลงไป แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบไม่สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* ได้ ทำได้เพียงยับยั้งการเจริญของเชื้อเท่านั้น สำหรับการทดสอบความสามารถในการฆ่าเชื้อ *S. aureus* ของสารเคลือบ พบว่าสามารถฆ่าเชื้อได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุดเท่ากับ 6.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบมีความสามารถทั้งยับยั้งและฆ่าเชื้อ *S. aureus* ได้เป็นอย่างดี ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการฆ่าเชื้อ *E. coli* ของสารเคลือบ พบว่าสารโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0 และ 0.4 %w/v มีความสามารถในการฆ่าเชื้อเท่ากัน โดยความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้เท่ากับ 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ขณะที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบโคโตซานผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0.2 %w/v ที่สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้เท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการทำการทดสอบ MIC ส่งผลให้ตัวอย่างที่นำมาทดลองต่อมีค่าที่แตกต่างจากสารเคลือบโคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลสอีกสองความเข้มข้นเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน สามารถฆ่าเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* ได้ แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* ได้ เนื่องจากเชื้อ *B. cereus* เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ได้ จึงทนต่อสภาวะต่างๆ ได้ดีและสามารถเจริญต่อไปได้โดยไม่ถูกสารเคลือบทำลาย ในขณะที่ *S. aureus* และ *E. coli* ไม่สามารถสร้างสปอร์ได้ จึงถูกทำลายได้ง่ายกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2014) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า *B. cereus* ทนต่อสภาวะอันตรายต่างๆ ได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิดอื่น



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อได้ (MIC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* ได้

Coating suspension	Growth of <i>Bacillus cereus</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	+	+	+	+	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0.2% nanocellulose	+	+	+	+	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0.4% nanocellulose	+	+	+	+	ND	ND	ND	ND	ND	ND

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)

ตารางที่ 4.7 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ *S. aureus*

Coating suspension	Growth of <i>Staphylococcus aureus</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	-	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND
0.2% nanocellulose	-	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND
0.4% nanocellulose	-	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)

ตารางที่ 4.8 ผลความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้

Coating suspension	Growth of <i>Escherichia coli</i>									
	Concentration of coating suspension (mg/mL)									
	100	50	25	12.5	6.25	3.12	1.56	0.78	0.39	0.19
0% nanocellulose	-	-	-	-	+	ND	ND	ND	ND	ND
0.2% nanocellulose	-	-	-	+	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0.4% nanocellulose	-	-	-	-	+	ND	ND	ND	ND	ND

\* + = เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, - = ไม่เกิดการเจริญของเชื้อขึ้น, ND = ไม่พบผลการทดลอง (Not detected)

#### 4.4.2 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราของสารเคลือบ

ในการทดสอบความสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราของสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซาน จะใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเคลือบ 5 ความเข้มข้นในการทดสอบ ได้แก่ 10000, 20000, 30000 และ 40000 ppm ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 โดยสามารถวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อรา *Fusarium oxysporum* ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากการทดลองพบว่า สารเคลือบโคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลสสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ดีที่สุด โดยที่ความเข้มข้น 40000 ppm สารเคลือบสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ 100% ในขณะที่สารเคลือบไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.2 %w/v สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้น้อยลง แต่ที่ความเข้มข้น 40000 ppm สารเคลือบก็ยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ 100% เช่นเดียวกัน ในส่วนของสารเคลือบไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v จากการทดลองพบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้น้อยที่สุด แต่ที่ความเข้มข้น 40000 ppm สารเคลือบยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้มากถึง 68.67% แสดงให้เห็นว่าปริมาณนาโนเซลลูโลสมีผลต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราของสารเคลือบ เนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติชอบน้ำ และเชื้อราก็เจริญได้ดีในบริเวณที่มีความชื้นสูง เมื่อผสมนาโนเซลลูโลสมากขึ้น จึงทำให้สารเคลือบมีการดูดซึมน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การเจริญของเชื้อรา ส่งผลให้สารเคลือบไคโตซานที่มีนาโนเซลลูโลสมาก สามารถยับยั้งเชื้อราได้น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Azmin et al. (2020) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มไบโอพลาสติกที่ผสมนาโนเซลลูโลสมากจะมีปริมาณความชื้นสูง ส่งผลให้อาจเกิดการเจริญของเชื้อราบนแผ่นฟิล์มได้

ตารางที่ 4.9 ผลเส้นผ่าศูนย์กลางของเชื้อรา *Fusarium oxysporum* บนอาหารผสมสารเคลือบ

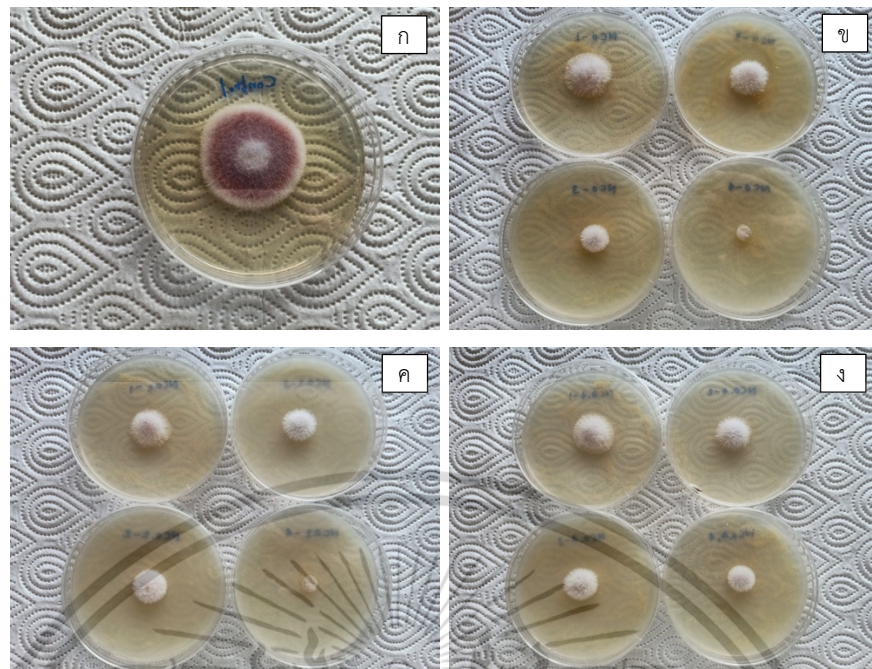
Coating suspension	Diameter of <i>Fusarium oxysporum</i> (cm)			
	Concentration of coating suspension (ppm)			
	10000	20000	30000	40000
0% nanocellulose	1.97	1.76	1.31	0
0.2% nanocellulose	2.18	1.67	1.45	0
0.4% nanocellulose	2.31	1.69	1.53	1.25
Standard deviation	0.17	0.05	0.11	0.72

Control = 3.990 cm

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Fusarium oxysporum* ที่เกิดขึ้น

Coating suspension	Inhibition of <i>Fusarium oxysporum</i> (%)			
	Concentration of coating suspension (ppm)			
	10000	20000	30000	40000
0% nanocellulose	50.75	56.02	67.29	100.00
0.2% nanocellulose	45.36	58.27	63.78	100.00
0.4% nanocellulose	42.11	57.77	61.78	68.67
Standard deviation	4.36	1.18	2.79	18.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลโคโลนีของราที่เกิดขึ้นบนอาหาร PDA ที่ (ก) ไม่ผสมสารเคลือบ และที่ผสมสารเคลือบ ที่มีนาโนเซลลูโลส (ข) 0 %w/v, (ค) 0.2 %w/v และ (ง) 0.4 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในศึกษาการผลิตนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ด้วยวิธี Alkaline Peroxide ตามด้วยกระบวนการ Hydrothermal จะได้เป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสชนิดนาโนไฟบริล เส้นใยมีขนาดเล็ก ลักษณะสีขาวขุ่น น้ำหนักเบา ปริมาณผลผลิตนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้เท่ากับ 32.56 %

เมื่อนำนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้มาผลิตเป็นสารเคลือบโดยผสมกับไคโตซาน เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงคงทนเมื่อทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ในสภาวะของเหลวพบว่าสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning ชนิด Pseudoplastic หลังจากทดสอบความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์พบว่า สารเคลือบสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *B. cereus*, *S. aureus* และ *E. coli* ได้ โดยมีค่าปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบเท่ากับ 12.5, 6.25 และ 6.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานไม่สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* แต่สามารถฆ่าเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* โดยค่าปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารเคลือบที่สามารถฆ่าเชื้อได้เท่ากับ 6.25 และ 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ สารเคลือบยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Fusarium oxysporum* ได้ โดยที่ความเข้มข้นของสารเคลือบ 40000 ppm สารเคลือบไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v สามารถยับยั้งเชื้อราได้ 68.67 %

ในการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน พบว่าความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์ม เมื่อความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสในฟิล์มไคโตซานน้อย ฟิล์มมีความแข็งแรงคงทนน้อยลง ด้านทานการดึงขาดได้น้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลส ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสในฟิล์มไคโตซานมากเพียงพอ จะส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงคงทนมากขึ้น จากการทดสอบพบว่าฟิล์มไคโตซานที่ผสมนาโนเซลลูโลส 0.4 %w/v สามารถทนต่อการดึงยึดได้มากกว่าและใช้เวลากว่าที่ฟิล์มจะขาดออกจากกัน นานกว่าฟิล์มไคโตซานที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลส

จากคุณสมบัติที่กล่าวมา จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มไคโตซานคือ 0.4 %w/v เนื่องจากความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสระดับนี้สามารถเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มได้ ทั้งยังคงคุณสมบัติของไคโตซานในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียได้ เพียงแต่ฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ จึงควรเก็บในบริเวณที่มีลักษณะแห้ง ความชื้นต่ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารหลังจากเคลือบหรือห่อบรรจุด้วยฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน ว่าฟิล์มมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

5.2.2 ผลิตภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานนี้ ควรเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการคายน้ำน้อย นอกจากนี้ยังควรเก็บรักษาไว้ในบริเวณที่แห้ง และมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เพราะนาโนเซลลูโลสในฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้ การเก็บที่ไม่ระวังอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพแย่ลง

5.2.3 ควรมีการศึกษาการนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเปลือกหน่อไม้ไปพัฒนาต่อยอดใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กมลศิริ พันธนียะ. 2556. **โคติน-โคโตซาน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://guru.sanook.com/2511/>. 1 พฤษภาคม 2562.
- ฐิติมา สุขมาก, พรชัย ราชตะนะพันธุ์ และ จิตศิริ ราชตะนะพันธุ์. 2553. “ประสิทธิภาพของโคโตซานออลิโกเมอร์และพอลิเมอร์จากแหล่งต่างๆ ในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคที่พบในอาหาร.” หน้า 646. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ฉัญญ์ นลิน วิญญู ประสิทธิ์, ยุราพร สหัทสกุล และน้ำผึ้ง รุ่งเรือง. 2560. “นาโนเซลลูโลส: การประยุกต์ใช้ในอาหารและความปลอดภัยอาหาร.” *วารสารพิษวิทยาไทย*. 32 : 67-79.
- ชาติรี จีราพันธุ์. 2551. **ผลของการใช้โคโตซานที่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิตสุกรขุน**. นครสวรรค์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ.
- เนตรนภิส เขียวขำ, เนตรณพิศ นาคอ่วมคำ, บงกช นิลกาญจน์ และ สมศิริ แสงโชติ. 2557. “ผลของสารสกัดหยาบเมทานอลจากตะไคร้และมะขามต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Lasiodiplodia theobromae* และ *Colletotrichum gloeosporioides* จากมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*. 45 : 3/1 : 73-76
- พรพฐ อัดแอ. 2562. “การศึกษากระบวนการผลิตและคุณสมบัติบางประการของฟิล์มคีแตม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พัชรลักษณ์ พรหมถาวร. 2551. “นวัตกรรมการผลิตเซลลูโลสรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากเยื่อฟางข้าวและซังข้าวโพด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2561ก. **Glycerol/กลีเซอรอล**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycerol-กลีเซอรอล](http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycerol-กลีเซอรอล). 1 ตุลาคม 2562.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2561ข. **Triglyceride / ไตรกลีเซอไรด์**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1001/triglyceride-ไตรกลีเซอไรด์](http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1001/triglyceride-ไตรกลีเซอไรด์). 1 ตุลาคม 2562.
- มณฑล วิสุทธิ. 2560. “ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียกลุ่ม Staphylococci ของสารสกัดจากพืชท้องถิ่นบางชนิดในจังหวัดนครราชสีมา.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*. 45(4) : 805-816
- รัชณี ตัณฑะพานิชกุล. 2547. **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วรรณิ ศรีนุตตระกูล. 2553. **จากเปลือกกุ้งและกระดองปูสู่ไคโตซาน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-062.html>. 1 พฤษภาคม 2562.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. **กรดโอเลอิก**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/กรดโอเลอิก>. 1 ตุลาคม 2562.
- ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. 2562. **ตลาดส่งออกของไทยรายสินค้า หน่อไม้กระป๋องแปรรูป**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://tradereport.moc.go.th/Report/Default.aspx?Report=MenucomTopNRecode&Option=3&Lang=Th&lmExType=1&comcode=204030000>. 2 พฤศจิกายน 2562.
- สถาบันพลาสติก. 2560. **การผลิตเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://rubber.oie.go.th/Elibrary.aspx?cid=72>. 2 พฤศจิกายน 2562.
- สุทัศน์ เล้าสกุล และณัฐกร เสมสันทัต. 2561. **การขยายพันธุ์ การปลูก และการจัดการสวนไม้เศรษฐกิจ**. โครงการฟื้นฟูด้านป่าไม้ในพื้นที่ประสบภัยสึนามิ : กรมป่าไม้.
- สุธิดา คงทอง. 2552. “ไคติน-ไคโตซาน (chitin-chitosan).” **วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา**. 3(1): 1-7.
- สุภาพร ชาติวรพงศา. 2536. “การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับผลิตเดกซ์แทรนเนสโดย *Penicillium sp.* สายพันธุ์ 61” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ASTM D3985-17. 2017. **Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor**. Pennsylvania : ASTM International.
- Abdul Khalil, H. P. S., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., Dungani, R. and Jawaid, M. 2014. “Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: a review.” **Carbohydrate polymers**. 99 : 649-665.
- Abdul Khalil, H. P. S., Saurabh, C. K., Adnan, A. S., Nurul Fazita, M. R., Syakir, M. I., Davoudpour, Y., Rafatullah, M., Abdullah, C. K., M. Haafiz, M. K. and Dungani, R. 2016. "A Review on Chitosan-Cellulose Blends and Nanocellulose Reinforced Chitosan Biocomposites: Properties and Their Applications." **Carbohydrate Polymers**. 150 : 216-226.
- Alves, A., Bergmann, C. P. and Berutti, F. A. 2013. “Hydrothermal synthesis.” 61-76. in **Novel Synthesis and Characterization of Nanostructured Materials**. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ASTM International. 2018. "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting." **ASTM D882-18**. West Conshohocken. PA.
- Azmin, S. N. H. M., Hayat, N. A. binti M. and Nor, M. S. M. 2020. "Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre." **Journal of Bioresources and Bioproducts**. 5(4) : 248-255.
- Bodek, K. H. 2000. "Study on the rheological properties of microcrystalline chitosan hydrogels used as drug carriers." **Polimery**. 45 : 818-825.
- Brandelero, R. P. H., Yamashita, F. and Grossmann, M. V. E. 2010. "The Effect of Surfactant Tween 80 on the Hydrophilicity, Water Vapor Permeation, and the Mechanical Properties of Cassava Starch and Poly( Butylene Adipate- Co-Terephthalate) (Pbat) Blend Films." **Carbohydrate Polymers**. 82(4) : 1102-1109.
- Chicatur, F., Griffanti, G., McKee, M. D. and Nazhat, S. N. 2017. "Collagen/chitosan composite scaffolds for bone and cartilage tissue engineering." 163-198. in Ambrosio, L. (ed.). **Biomedical Composites (Second Edition)**. Cambridge : Woodhead Publishing.
- Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). (2009). "Methods for dilution antimicrobial susceptibility test for bacteria that grow aerobically; approved standard-eighth edition." **CLSI documents M07-A8**. Wayne, Pa.
- Deng, Z., Jung, J., Simonsen, J., Wang, Y. and Zhao, Y. 2017a. "Cellulose Nanocrystal Reinforced Chitosan Coatings for Improving the Storability of Postharvest Pears Under Both Ambient and Cold Storages." **Journal of Food Science**. 82(2) : 453-462.
- Deng, Z., Jung, J., Simonsen, J. and Zhao, Y. 2017b. "Cellulose nanomaterials emulsion coatings for controlling physiological activity, modifying surface morphology, and enhancing storability of postharvest bananas (*Musa acuminata*)." **Food Chemistry**. 232 : 359-368.
- Deng, Z., Jung, J., Simonsen, J. and Zhao, Y. 2018. "Cellulose nanocrystals Pickering emulsion incorporated chitosan coatings for improving storability of postharvest Bartlett pears (*Pyrus communis*) during long-term cold storage." **Food Hydrocolloids**. 84 : 229-237.

- Dong, F., Li, S., Jin, C., Liu, Z., Zhu, K., Zou, H. and Wang, X. 2016. "Effect of nanocellulose/chitosan composite coatings on cucumber quality and shelf life." **Toxicological & Environmental Chemistry**. 98(3-4) : 450-461.
- Dong, F., Li, S., Yan, M. and Li, C. 2014. "Preparation and Properties of Chitosan/Nanocrystalline Cellulose Composite Films for Food Packaging." **Asian Journal of Chemistry**. 26 : 5895-5898.
- Ferrer, A., Pal, L. and Hubbe, M. 2017. "Nanocellulose in packaging: Advances in barrier layer technologies." **Industrial Crops and Products**. 95 : 574-582.
- Fukuzumi, H., Saito, T., Iwata, T., Kumamoto, Y. and Isogai, A. 2009. "Transparent and High Gas Barrier Films of Cellulose Nanofibers Prepared by TEMPO-Mediated Oxidation." **Biomacromolecules**. 10(1) : 162-165.
- Glassware Chemical. 2560. การสังเคราะห์สาร โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal synthesis). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://glasswarechemical.com/scientific-equipment/ไฮโดรเทอร์มัล/>. 3 พฤศจิกายน 2562.
- He, M., Li, Q., Liu, X., Hu, Q., Hu, G., Pan, K., Zhu, Q. and Wu, J. 2013. "Bio-ethanol Production from Bamboo Residues with Lignocellulose Fractionation Technology (LFT) and Separate Hydrolysis Fermentation (SHF) by *Zymomonas Mobilis*." **American Journal of Biomass and Bioenergy**. 2(1) : 15-24.
- Herrera, M. 2015. "Preparation and Characterization of Nanocellulose Films and Coatings from Industrial Bio-Residues." in Doctoral thesis, Luleå University of Technology.
- Hiasa, S., Iwamoto, S., Endo, T. and Edashige, Y. 2014. "Isolation of Cellulose Nanofibrils from Mandarin (Citrus Unshiu) Peel Waste." **Industrial Crops and Products**. 62 : 280-285.
- Hospodarova, V., Singovszka, E. and Stevulova, N. 2018. "Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials." **American Journal of Analytical Chemistry**. 9 : 303-310.
- Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K. and Pal, L. 2017. "Rheology of nanocellulose-rich aqueous suspensions: A Review." **BioRes**. 12(4) : 9556-9661.
- Jia, Y. F., Shi, W. Y., Wu, L. H. and Wang, H. L. 2011. "Effects of Ensilage on the Preservation of Bamboo Shoot Shells and Their Fibre Characteristics." **Journal of Tropical Forest Science**. 23(4) : 396-403.

- Jiang, F. and Hsieh, Y. L. 2015. "Cellulose Nanocrystal Isolation from Tomato Peels and Assembled Nanofibers." **Carbohydrate Polymers**. 122 : 60-68.
- Jongaroontaprangsee, S., Chiewchan, N. and Devahastin, S. 2018. "Production of nanocellulose from lime residues using chemical-free technology." **Materials Today: Proceedings**. 5(5) : 11095–11100.
- Kargarzadeh, H., loelovich, M., Ahmad, I., Thomas, S. and Dufresne, A. 2017. "Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources." 1-49. in **Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites**. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Khalil, H. A., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., Dungani, R. and Jawaid, M. 2014. "Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: a review." **Carbohydrate polymers**, 99, 649–665.
- Kim, S. A., Kim, N. H., Lee, S. H., Hwang, I. G. and Rhee, M. S. 2014. "Survival of Foodborne Pathogenic Bacteria (Bacillus cereus, Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica Serovar Typhimurium, Staphylococcus aureus, and Listeria monocytogenes) and Bacillus cereus Spores in Fermented Alcoholic Beverages (Beer and Refined)." **Journal of Food Protection**. 77(3) : 419–426.
- Kinyanjui, T., Artz, W. E. and Mahungu, S. 2003. "Emulsifiers | Organic Emulsifiers." 2070-2077. in Caballero, B. (ed.). **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)**. Oxford: Academic Press.
- Kumari, S., and Kishor, R. 2020. "Chapter 1 - Chitin and chitosan: origin, properties, and applications." 1-33. in Gopi, S., Thomas, S. and Pius, A. **Handbook of Chitin and Chitosan**. Elsevier.
- Li, K., Wang, X., Wang, J. and Zhang, J. 2015. "Benefits from additives and xylanase during enzymatic hydrolysis of bamboo shoot and mature bamboo." **Bioresource Technology**, 192 : 424–431.
- Liu, L., Zhou, J., Yu, S., Shan, G. 1997. "Enzymatic Hydrolysis and Feed Exploitation of Canned Bamboo Shoot Residues of Phyllostachys prominens." **Journal of Zhejiang A&F University**. 14(3) : 262-266.
- Mhd Haniffa, M. A. C., Ching, Y. C., Abdullah, L. C., Poh, S. C. and Chuah, C. H. 2016. "Review of Bionanocomposite Coating Films and Their Applications." **Polymers**. 8 : 246.

- Morán, J. I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P. and Vázquez, A. 2008. “Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers.” **Cellulose**, 15(1) : 149–159.
- Novo, L. P., Bras, J., García, A., Belgacem, N. and Curvelo, A. A. da S. 2016. “A study of the production of cellulose nanocrystals through subcritical water hydrolysis.” **Industrial Crops and Products**. 93 : 88–95.
- Pagliaro, M. 2017. “Chapter 1 - Properties, Applications, History, and Market.” In **Glycerol: The Renewable Platform Chemical**. Elsevier.
- Plant Resources of South-East Asia. 2019. **Thyrsostachys siamensis (PROSEA)**. [Online]. Available: [http://uses.plantnetproject.org/en/Thyrsostachys\\_siamensis\\_\(PROSEA\)](http://uses.plantnetproject.org/en/Thyrsostachys_siamensis_(PROSEA)). 20 November 2019.
- Rahimi Kord Sofla, M., Brown, R. J., Tsuzuki, T. and 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(3) : 1-9.
- Rajinipriya, M., Nagalakshmaiah, M., Robert, M. and Elkoun, S. 2018. “Homogenous and transparent nanocellulosic films from carrot.” **Industrial Crops and Products**. 118 : 53-64.
- Sasaki, M., Fang, Z., Fukushima, Y., Adschiri, T. and Arai, K. (2000). “Dissolution and Hydrolysis of Cellulose in Subcritical and Supercritical Water.” **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 39(8) : 2883–2890.
- Turbak, A.F., Snyder F.W. and Sandberg K.R. 1983. Washington DC: U.S: Patent and Trademark Office.
- Tuukkanen, S., and Rajala, S. 2018. “Nanocellulose as a Piezoelectric Material.” In Vassiliadis, S. G, and Matsouka, D. **Piezoelectricity - Organic and Inorganic Materials and Applications**. IntechOpen.
- Yang, X., Han, F., Xu, C., Jiang, S., Huang, L., Liu, L. and Xia, Z. 2017. “Effects of preparation methods on the morphology and properties of nanocellulose (NC) extracted from corn husk.” **Industrial Crops and Products**. 109 : 241–247.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Brookfield

Coating	0% nanocellulose			0.2% nanocellulose			0.4% nanocellulose		
	Torque (%)	Viscosity (cP)	Shear stress (D/cm <sup>2</sup> )	Torque (%)	Viscosity (cP)	Shear stress (D/cm <sup>2</sup> )	Torque (%)	Viscosity (cP)	Shear stress (D/cm <sup>2</sup> )
81.60	97.50	121.70	99.20	62.10	77.60	63.30	74.90	93.60	76.40
78.20	94.00	122.60	96.00	60.00	78.20	61.10	71.90	93.80	73.30
74.80	90.70	123.50	92.40	57.60	78.50	58.70	69.40	94.60	70.80
71.40	87.40	124.50	88.90	55.00	78.60	56.10	66.50	95.00	67.80
68.00	83.70	125.50	85.40	52.80	79.20	53.80	63.80	95.70	65.10
64.60	80.30	126.60	81.80	50.50	79.70	51.50	60.80	96.00	62.00
61.20	76.70	127.80	78.20	47.90	79.80	48.80	58.00	96.60	59.10
57.80	73.30	129.00	74.40	45.60	80.50	46.50	55.30	97.60	56.40
54.40	69.30	129.90	70.60	43.10	80.80	44.00	52.40	98.20	53.40
51.00	65.80	131.40	66.90	40.80	81.60	41.60	49.70	99.40	50.70
47.60	62.00	132.40	63.00	38.30	82.10	39.10	46.90	100.50	47.80

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

	Resistance to Extension	Extensibility
	แรง (g)	ระยะทาง (mm)
0.4% nanocellulose	7984.52	27.88
0.2% nanocellulose	5475.14	21.27
0% nanocellulose	6327.24	23.65
Average	6595.63	24.27
Standard deviation	1041.88	2.73
Coefficient of variation	15.80	11.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### ข.1 การคำนวณหาปริมาณผลผลิตของเส้นใยนาโนเซลลูโลส

การคำนวณหาปริมาณผลผลิตของเส้นใยนาโนเซลลูโลส หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{น้ำหนักนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักผงเปลือกหน่อไม้ที่ใช้ในการสกัด}} \times 100$$

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ซึ่งเปลือกหน่อไม้มา  $10 \pm 0.05$  กรัม ทำการผลิตนาโนเซลลูโลสออกมาได้ น้ำหนักหลังการอบแห้งเท่ากับ 3.2560 กรัม

$$\% \text{ Yield} = \frac{3.2560}{10} \times 100 = 32.56 \%$$

ดังนั้น ปริมาณผลผลิตของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเท่ากับ 32.56 %

#### ข.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม

การคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (นิวตัน)}}{\text{ความกว้าง} \times \text{ความหนาของแผ่นฟิล์ม (ตารางมิลลิเมตร)}}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบการดึงยึดฟิล์มขนาด  $40 \times 20 \times 0.09$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาดเท่ากับ 78.30 นิวตัน

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{78.30}{20 \times 0.09} = 43.50 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ค่า tensile strength ของฟิล์มเท่ากับ 43.50 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.3 การคำนวณหาความสามารถในการยืดของฟิล์ม

การคำนวณหาความสามารถในการยืดของฟิล์ม หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

เมื่อ  $L_0$  = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์มบริเวณที่ยืด (มิลลิเมตร)

$L$  = ระยะทางที่ฟิล์มยืดออก (มิลลิเมตร)

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบการดึงยึดฟิล์มขนาด  $40 \times 20 \times 0.09$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ใช้อุปกรณ์ tensile grip ในการยึดจับสองข้างของแผ่นฟิล์มจนความยาวของฟิล์มบริเวณที่สามารถทดสอบคงยึดได้เหลือ 20 มิลลิเมตร หลังการทดสอบได้ค่าระยะทางที่ฟิล์มยืดออกเท่ากับ 27.879 มิลลิเมตร

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{27.879 - 20}{20} \times 100 = 39.395 \%$$

ดังนั้น ค่า Elongation at break ของฟิล์มเท่ากับ 39.395 %

### ข.4 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อราของสารเคลือบ

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\% \text{ inhibition} = \frac{(R_1 - R_2)}{R_1} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $R_1$  = รัศมีโคโลนีของเชื้อราในเพลทควบคุม (เซนติเมตร)

$R_2$  = รัศมีโคโลนีของเชื้อราในเพลทชุดทดลอง (เซนติเมตร)

### ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา หลังจากการบ่มเป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าเพลทที่เติมสารเคลือบโคโตซานผสมนาโนเซลลูโลสเข้มข้น 0.4 %w/v ไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราเท่ากับ 1.25 เซนติเมตร ในขณะที่เพลทควบคุมซึ่งไม่ได้ผสมเชื้อรา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโคโลนีเท่ากับ 3.99 เซนติเมตร

$$\text{Inhibition (\%)} = \frac{3.99 - 1.25}{3.99} \times 100 = 68.67 \%$$

ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราของสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมโคโตซานเท่ากับ 68.67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน



รูปที่ ค.2 การคนละลายไคโตซานโดยใช้เครื่อง Digital dual-range mixer รุ่น RW20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 การขึ้นรูปฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน โดยเทสารเคลือบลงบนแผ่นอะคริลิก



รูปที่ ค.4 การอบสารเคลือบนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซานให้เป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอบเจล

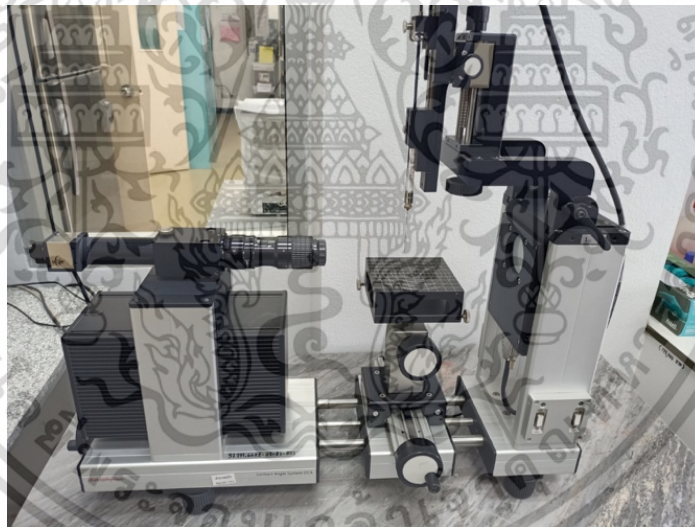


รูปที่ ค.5 ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดขนาดแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสผสมไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

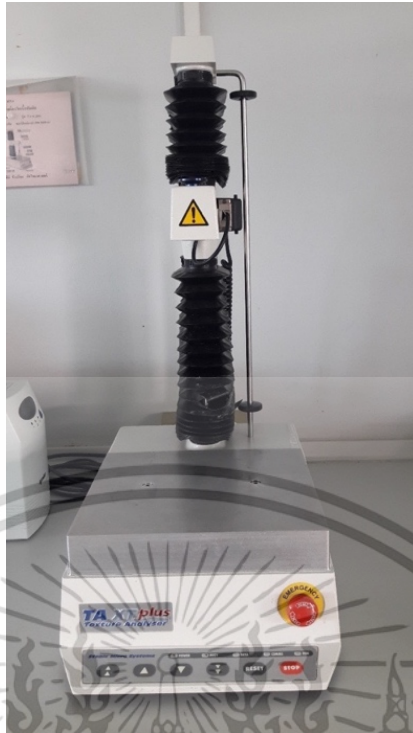


รูปที่ ค.6 เครื่อง Brookfield สำหรับทดสอบเชิงรีโอโลยี



รูปที่ ค.7 เครื่องวัด Contact angle รุ่น OCA20 สำหรับการวัดค่ามุมสัมผัสหยดน้ำบนแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.8 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น TA.XT plus สำหรับทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม



รูปที่ ค.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่า MIC ของสารเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล ภาณุจนา มานะมุงมงคล

วัน เดือน ปีเกิด 24 พฤษภาคม 2539

### ประวัติการศึกษา

- 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเซนต์เทเรซา
- 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา สุวินทวงศ์, สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
- 2557 ปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การทำงาน

- 2560 ฝึกงานที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

### ผลงานวิจัย

- 2563 ตีพิมพ์บทความลงรายงานการประชุมวิชาการ (proceedings) ในงาน The 22<sup>nd</sup> Food Innovation Asia Conference 2020 (FIAC 2020) เรื่อง Optimization of Hydrothermal Technique for the Production of Nanocellulose from Bamboo Shoot Shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้