

การผลิตฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน



นางสาว ทิพย์วัลย์ วัชรอาภาณุกร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-711-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FILM PRODUCTION AND PHYSICAL PROPERTIES OF BACTERIAL CELLULOSE-  
CHITOSAN FILM



Miss Tippawan Watcharaarpanugon

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-711-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์                    การผลิตฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซน  
โดย    นางสาว ทิพวัลย์ วัชรอาภาอนุกร  
ภาควิชา                                        เทคโนโลยีทางอาหาร  
อาจารย์ที่ปรึกษา                        อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม                    ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเชียร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิสิทธิ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. พันธิพา จันทร์วัฒน์ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเชียร )

.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน )

.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธิศักดิ์ สุขไโนศิลป์ )

ทิพวัลย์ วัชรอภาณกร : การผลิตฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซน. (Film Production and Physical Properties of Bacterial Cellulose-Chitosan Film) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : : ผศ.ดร. สุเมธ ตันตระเกียรติ (ถ้ำมี), 122 หน้า. ISBN 974-346-711-4.

ไคโตแซนเป็นพอลิแซคคาไรด์ในธรรมชาติเพียงชนิดเดียวที่มีประจุบวก ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมากมาย มีงานวิจัยพบว่าการเติมไคโตแซนลงในสารแขวนลอยเยื่อทั้งจากเยื่อใยขาวหรือเยื่อใยสีน้ำตาลในกระบวนการผลิตกระดาษนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพด้านต่างๆ ของกระดาษได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของไคโตแซนที่มีต่อเซลลูโลสในระดับไมโครไฟบริลเช่น เซลลูโลสจากแบคทีเรีย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาการผลิตฟิล์ม และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ผลิตได้ ซึ่งจากการศึกษาโดยกำหนดน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนคงที่ 30 กรัมต่อตารางเมตร และแปรปริมาณไคโตแซนในสารแขวนลอยผสมระหว่างไคโตแซนและเซลลูโลสจากแบคทีเรียในช่วงร้อยละ 0 ถึง 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 7.0 และ 10.0 พบว่าที่ระดับการผสมไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ให้สมบัติทางกายภาพโดยรวมของฟิล์มดีที่สุด โดยจากการขึ้นฟิล์มในสภาวะนี้ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 27 ดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 42 ความยืดของฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 35 และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ไม่ได้รับการเติมไคโตแซน อย่างไรก็ตามดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มลดลงร้อยละ 32 จากฟิล์มซึ่งไม่ได้รับการเติมไคโตแซน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##4072266623 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : BACTERIAL CELLULOSE / NATA DE COCO / CHITOSAN / FILM  
CHARACTERIZATION

TIPPAWAN WATCHARAARPANUGON : FILM PRODUCTION AND PHYSICAL  
PROPERTIES OF BACTERIAL CELLULOSE-CHITOSAN FILM. THESIS ADVISOR :  
CHIDPONG PRADITSUWAN , Ph.D. THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. SUMATE  
TANTRATIAN, Ph.D. 122 pp. ISBN

Chitosan is the only of natural cationic polysaccharide which can be utilized in numbers of commercial applications. It was found that the adding of chitosan into aqueous cellulosic pulp suspension obtained either from hard wood or soft wood can improve the overall properties of the paper. However, there is no research studying on the effects of applying chitosan to microfibril cellulose such as bacterial cellulose. The objectives of this study is to synthesize bacterial cellulose-chitosan film and characterize its properties. In this study, at a constant basis weight ( $30 \text{ g/m}^2$ ), the mass of chitosan in the mixture of bacterial cellulose-chitosan were varied between 0 and 30 percent of dry bacterial cellulose and pH of the suspension were varied at 4.5, 7.0 and 10.0. It was found that at 10 percent chitosan and pH 10, the film with the best properties. (of (at) 27 percent increased in dry tensile index, 42 percent increased in burst index, 35 percent increased in elongation, and 18 percent increased in water permeability, as compared to the chitosan-free film) However, the tear index of this film was found to be 32 percent poorer than that of the chitosan-free film.

Department.....Food Technology..... Student 's signature.....  
Field of study .....Food Technology..... Advisor 's signature.....  
Academic year .....2000..... Co-advisor 's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเธียร อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. พันธิพา จันทวัฒน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธิศักดิ์ สุขในศิลป์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณดร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ไลโคโตแซน คุณสุเทพ ยาดี และบริษัทพาหุอุตสาหกรรมจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เซลล์โลสจากแบคทีเรีย สำหรับเป็นวัตถุดิบในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัย อาจารย์ ดร. รัช พิชญางกูร ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์นำปราศจากอ็อกซิเจน คุณวีระเดช รัตนเต็มย์ บริษัทสตรองแพ็ค ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างพลาสติกเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผลิตได้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ คุณธีระชัย รัตนโรจน์มงคล และเจ้าหน้าที่ท่านอื่นๆ ของงานเยื่อ และกระดาษ กองการวิจัย และกองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ กรมวิทยาศาสตร์บริการ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ อาจารย์ ดร. พงศ์ธร ฐปะเต็มย์ และคุณจิตตรา ดอกบัว ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโททุกท่านที่ช่วยขณะทำการทดลองและให้กำลังใจมา โดยตลอด

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้การเลี้ยงดู อบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี ตลอดมา รวมทั้งเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสามารถสำเร็จการศึกษา ตลอดทั้งพี่สาว และพี่ชายที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 เซลลูโลส.....	2
2.2 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย.....	7
2.3 ลักษณะทั่วไปของโคโตแซน.....	9
2.4 สมบัติของโคโตแซน.....	11
2.5 การผลิตฟิล์มเซลลูโลส.....	13
2.6 สมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ.....	14
2.6.1 สมบัติพื้นฐาน.....	14
2.6.2 สมบัติเชิงกล.....	14
2.6.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร.....	16
2.6.4 สมบัติทางทัศนศาสตร์.....	16
2.7 ผลของพันธะของเส้นใยต่อสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ.....	16
2.8 การปรับปรุงสมบัติของแผ่นทดสอบโดยใช้โคโตแซน.....	19
3. การทดลอง.....	24
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย.....	25
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย.....	25
3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทั่วไปของโคโตแซน.....	25

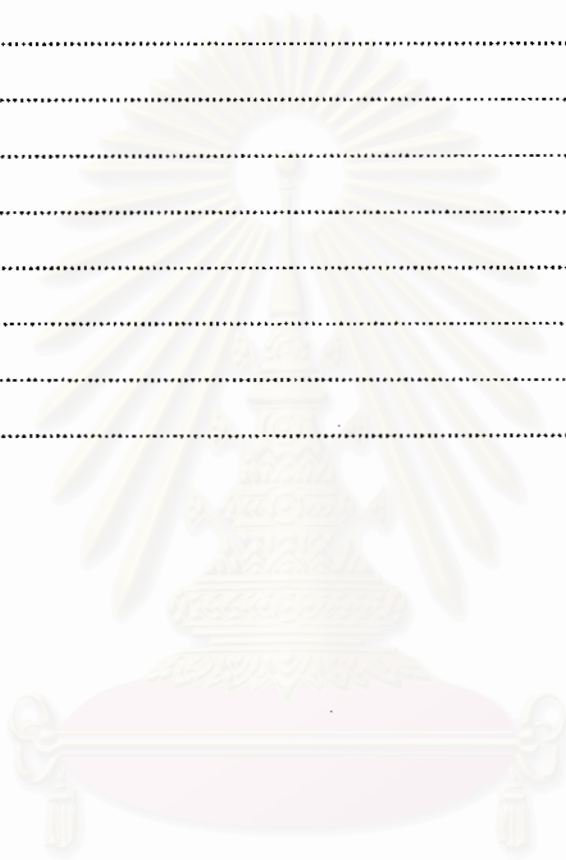
## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.3	ผลิตฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซน.....26
3.3.4	วิเคราะห์ปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์ม.....27
3.3.5	ทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม.....27
3.3.6	ทดสอบสมบัติด้านการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์ม.....28
3.3.7	ศึกษาผลของน้ำหนักมาตรฐานของปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม.....28
3.3.8	วิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....28
3.3.9	เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนกับกระดาษ พลาสติก และฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียอื่นๆ.....28
4.	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง .....30
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย.....30
4.2	สมบัติทั่วไปของโคโคแซน.....31
4.3	การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม.....32
4.4	ปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์ม.....38
4.5	สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....46
4.5.1	กลุ่มที่ 1.....47
4.5.2	กลุ่มที่ 2.....50
4.5.3	กลุ่มที่ 3.....52
4.5.4	กลุ่มที่ 4.....55
4.6	สมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของแผ่นฟิล์ม.....55
4.7	ผลของน้ำหนักมาตรฐานต่อปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์ม.....55
4.8	ผลของน้ำหนักมาตรฐานต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม.....57
4.9	สมบัติของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ.....62
4.9.1	ดัชนีความต้านแรงดึง.....62
4.9.2	ความยืด.....62
4.9.3	ยังส์โมดูลัส.....62
4.9.4	ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ.....66
4.9.5	ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด.....66
4.9.6	ความขาวสว่าง.....66
4.9.7	ความทึบแสง.....66



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	99
ภาคผนวก ง.....	104
ภาคผนวก จ.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	122



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติด้านเคมีกายภาพทั่วไปของโคโตน...	11
2 ปริมาณจุลินทรีย์ของนมในแต่ละวัน.....	23
3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (dry basis).....	30
4 สมบัติทั่วไปของโคโตน.....	31
5 ปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับปริมาณโคโตนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ.....	56

### ภาคผนวก ก

ตารางที่	หน้า
ก.1 ร้อยละของปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ในระดับปริมาณโคโตนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง.....	81
ก.2 ร้อยละของปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ในระดับปริมาณโคโตนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง.....	81
ก.3 ร้อยละของปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับปริมาณโคโตนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง.....	82
ก.4 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ในระดับการเติมโคโตนต่างๆ.....	83
ก.5 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตโดยการเติมโคโตนในระดับต่างๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5.....	84
ก.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ในระดับการเติมโคโตนต่างๆ.....	85
ก.7 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนซึ่งผลิตโดยการเติมโคโตนในระดับต่างๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0.....	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับการเติมโคโตแซนต่างๆ.....	88
ก.9 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนซึ่งผลิตโดยการเติมโคโตแซนในระดับต่างๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0.....	91
ก.10 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนซึ่งผลิตโดยการเติมโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ..	92
ก.11 สมบัติทางกายภาพของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	93
<b>ภาคผนวก ข</b>	
ตารางที่	
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สารละลายไหลในคาบิลลารีวิสโคมิเตอร์กับความเข้มข้นของสารละลายโคโตแซน.....	97

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....2
2	ตำแหน่งพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเซลลูโลส.....3
3	โครงสร้างระดับซูเปอร์โมเลกุลาร์ของเซลลูโลส.....4
4	โครงสร้างของหน่วยเซลล์เซลลูโลส.....4
5	พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส I ที่ระนาบเดียวกัน.....5
6	โครงร่างตาข่ายที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างระนาบของโครงสร้างเซลลูโลส II.....6
7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวหน้าเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....8
8	กลไกการแตกกิ่งก้านของไฟบริลเซลลูโลสจากแบคทีเรีย.....8
9	สูตรโครงสร้างโดยทั่วไปของไคโตแซน.....10
10	ผลของโครงสร้าง <i>Rhizopus stolonifer</i> ซึ่งเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar.....12
11	ตำแหน่งของพอลิเมอร์ในโครงร่างตาข่ายของเส้นใย.....21
12	bridging film ของไคโตแซนในแผ่นทดสอบ.....22
13	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ระดับการเติมไคโตแซนที่ร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....33
14	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ระดับการเติมไคโตแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....33
15	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....34
16	ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมไคโตแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....35
17	ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมไคโตแซนที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
18	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....36
19	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....37
20	ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....39
21	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....39
22	ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....40
23	ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....42
24	ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า.....44
25	ปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มเทียบกับปริมาณโคโตแซนที่เติมลงผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่สภาวะการผลิตต่างๆ.....45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเทียบกับปริมาณโคโตนแซนที่เติมลงผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่สภาวะการผลิตต่างๆ..... 46
27	ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 47
28	ความยืดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 49
29	ดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 50
30	การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 51
31	ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 52
32	ร้อยละของความขาวสว่างของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 52
33	ร้อยละของความทึบแสงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 53
34	ยังสีไม่ดูลึศของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ..... 54
35	ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่ระดับปริมาณโคโตนแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ..... 57
36	ความยืดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่ระดับปริมาณโคโตนแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ..... 58
37	ดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่ระดับปริมาณโคโตนแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ..... 58
38	ยังสีไม่ดูลึศของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนแซนที่ระดับปริมาณโคโตนแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ..... 59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
39	ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ระดับปริมาณโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ.....60
40	ความขาวสว่างของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ระดับปริมาณโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ.....60
41	ความทึบแสงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ระดับปริมาณโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ.....61
42	การซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ระดับปริมาณโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ.....61
43	ดัชนีความต้านแรงดึงของวัสดุต่างๆ.....63
44	ร้อยละของความยืดของวัสดุต่างๆ.....64
45	ยังสีโมดูลัสของวัสดุต่างๆ.....65
46	ดัชนีความต้านแรงดันทะเลของวัสดุต่างๆ.....67
47	ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของวัสดุต่างๆ.....68
48	ร้อยละของความขาวสว่างของวัสดุต่างๆ.....69
49	ร้อยละของความทึบแสงของวัสดุต่างๆ.....70
ภาคผนวก ค	
รูปที่	
ค.1	การตัดแผ่นทดสอบที่จะนำไปวัดสมบัติเชิงกลของฟิล์ม.....99
ภาคผนวก จ	
รูปที่	
จ.1	เครื่องกระจายเยื่อ (disintegrator, Marvis Engineering Co., ltd., England).....107
จ.2	เครื่องกวน (mixer, type EURO-HT D, IKA Laboratechnik).....108
จ.3	เครื่องทำแผ่นมาตรฐาน.....109
จ.4	แท่งน้ำหนัก (couch roll).....110
จ.5	เครื่องอัดแผ่นฟิล์ม (sheet plate, Toyo Seiki Seisakusho, Tokyo, Japan).....110
จ.6	การทำแห้งของแผ่นฟิล์ม.....111
จ.7	เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด.....112
จ.8	เครื่องวัดความหนา (Micrometer, Lorentzen & Wettre Co., ltd., Stock Holm, Sweden).....113

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.9 เครื่องวัดความต้านแรงดึง (Tensile Strength Tester, Lorentzen & Wettre).....	114
จ.10 เครื่องวัดความต้านแรงดันทะลุ (auto burst tester, tmi monitor/burst-200..... Model 13-09, Testing Machine Co., Ltd., New York, U.S.A.)	115
จ.11 เครื่องวัดความต้านแรงฉีกขาด (Elemendorf tearing tester, tmi monitor..... /Tear Model 83-11-00, Testing Machine Inc., Amityville., New York, U.S.A.)	116
จ.12 เครื่องวัดสี (Elrepho 2000 datacolor).....	117
จ.13 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Model DVII + Viscometer).....	118
จ.14 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (EA1110 CHNS-O CE Instruments).....	119
จ.15 เครื่องฉาบทอง (Quick Auto Coater, JEOL JFC-1500 Iron Sputtering Device).....	120
จ.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JSM-5310LV Scanning Microscope).....	121

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

โคโตเซนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ในธรรมชาติเพียงชนิดเดียวที่มีประจุบวก ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมากมาย ในอุตสาหกรรมกระดาษได้มีงานวิจัยพบว่า การเติมโคโตเซนลงในกระบวนการผลิตกระดาษทั้งจากเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้นที่มีประจุลบซึ่งใช้ในการผลิตกระดาษทั่วๆ ไป สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของกระดาษได้เหมือนกับการเติมแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์เช่น พอลิเอมีนต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของกระดาษอยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะโคโตเซนสามารถเพิ่มจำนวนพันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรเจนในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสได้ นอกจากนี้การใช้โคโตเซนยังมีข้อดีอีกหลายด้านเช่น ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้าง เนื่องจากโคโตเซนสามารถย่อยสลายในธรรมชาติไปเป็นปุ๋ยให้กับสิ่งแวดล้อมได้ และไม่เป็นพิษ

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการเติมโคโตเซนลงไปในช่วงขั้นตอนการผลิตกระดาษซึ่งใช้เยื่อที่มีความเป็นผลึกสูงและไม่มีประจุ งานวิจัยนี้จึงได้ทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความยากง่ายในการขึ้นรูปฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ผลิตได้จากการเติมโคโตเซนลงไปในช่วงขั้นตอนการผลิตกระดาษที่ใช้เยื่อชนิดดังกล่าวเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้ได้เลือกเซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นตัวอย่างในการวิจัย เพราะในปัจจุบันฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียซึ่งผลิตโดยวิธีเดียวกับการทำกระดาษทั่วไปเป็นที่สนใจในวงการบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

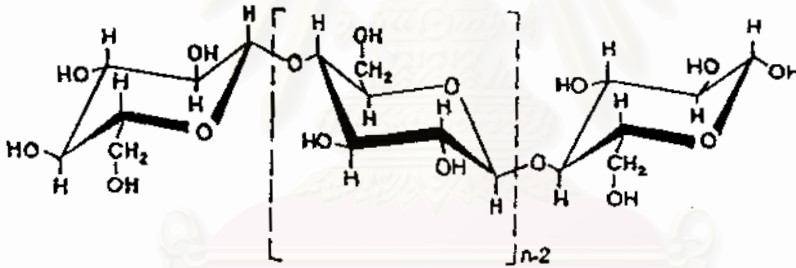
## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า 1,4- $\beta$ -D-polyanhydroglucopyranose

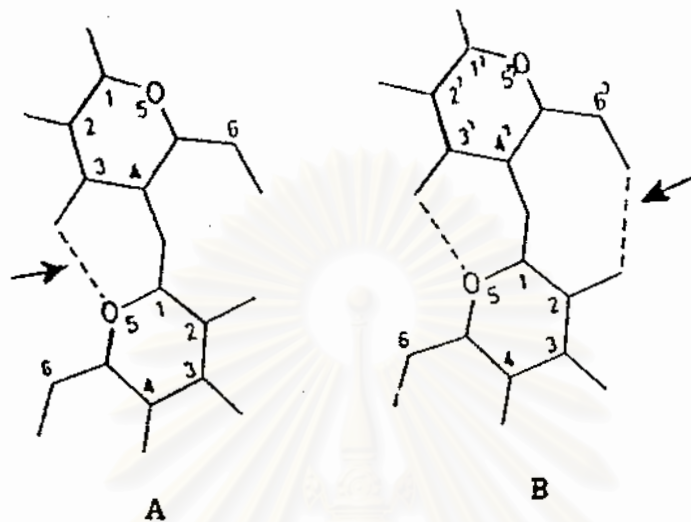
โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส 15-40,000 หน่วย ต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ  $\beta$ -(1,4) glycosidic ดังรูปที่ 1 (Cowling and Kirk, 1976) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบของเซลลูโลส ซึ่งมีค่าประมาณ 1,500,000 ดาลตัน (Brown, 1983)



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส

ที่มา : Cowling และ Kirk (1976)

เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำเนื่องจากเซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลหรือสายโซ่ (Blackwell and Marchessault, 1971) จากการศึกษาด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ และเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่ามีสองตำแหน่งที่เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเซลลูโลสและระหว่างหน่วยกลูโคสที่ติดกันคือ ไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) บนคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของกลูโคสหน่วยหนึ่งกับออกซิเจนของวงแหวนไพราโนส (pyranose ring) ของกลูโคสอีกหน่วยหนึ่ง ดังรูป 2A (Liang and Marchessault, 1959) และไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกลูโคสหน่วยหนึ่งกับไฮโดรเจนของไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสอีกหน่วยหนึ่งดังรูป 2B (Blackwell, Kolpak and Gardner, 1977)



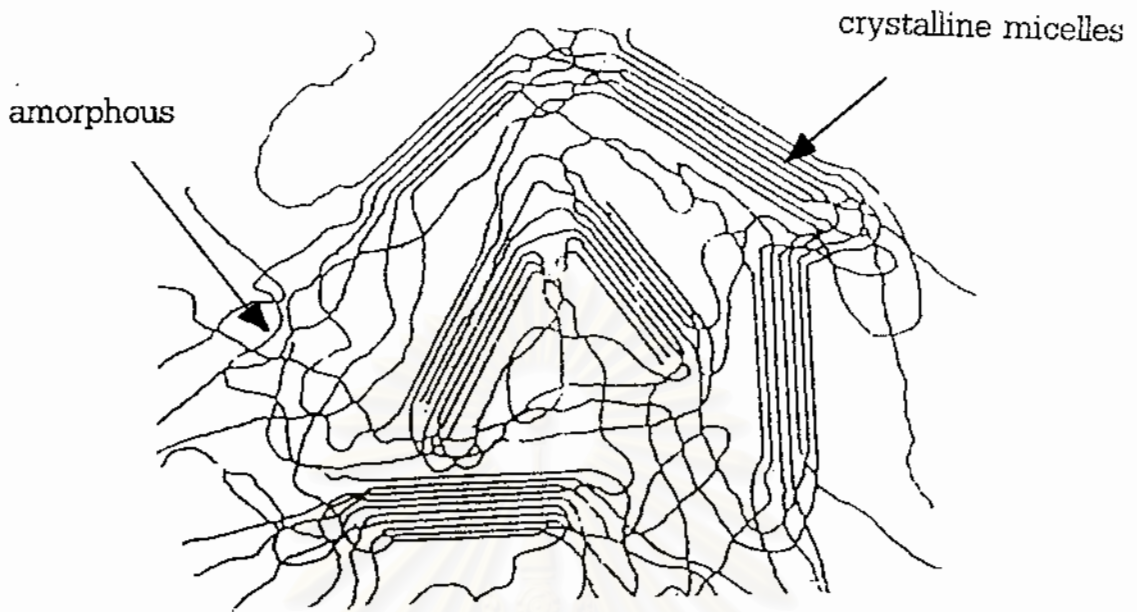
รูปที่ 2 ตำแหน่งพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเซลลูโลส

A: โมเดลของ Liang and Marchessault

B: โมเดลของ Blackwell, Kolpak and Gardner

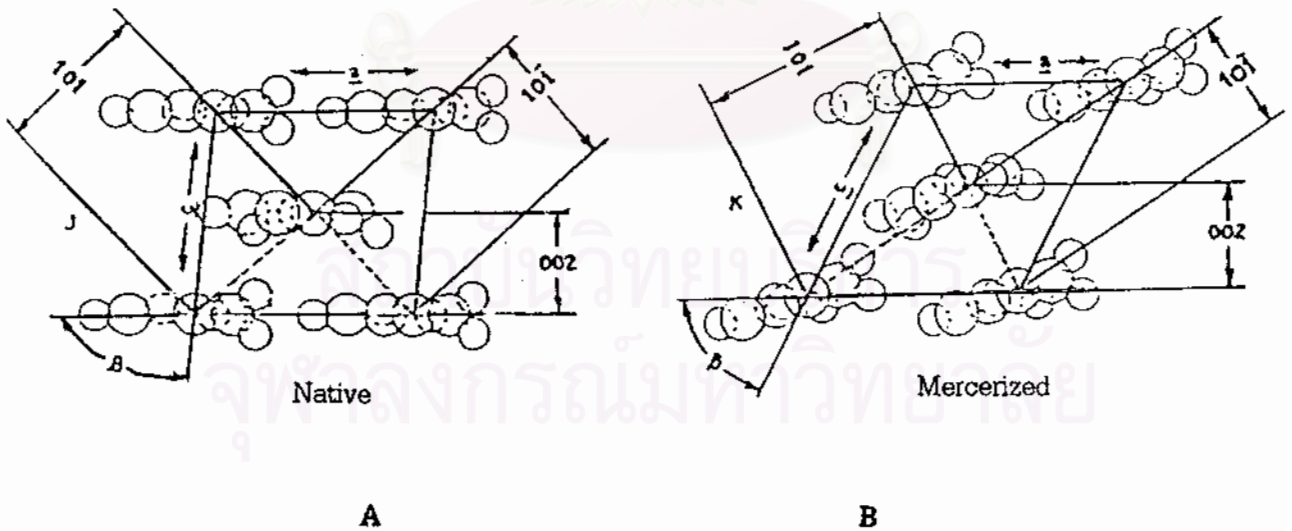
ที่มา : Krassig (1985)

พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเซลลูโลสทำให้สายโซ่เซลลูโลสยึดตรงและแข็ง (stiff) และมีการจัดเรียงส่วนของสายโซ่แบบขนาน (parallel) ซึ่งมีผลทำให้เกิดผลึก (crystalline micelles) และทำให้เกิดโครงสร้างระดับซูเปอร์โมเลกุลาร์ (supermolecular structure) คือมีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเซลลูโลสอย่างเป็นระเบียบล้อมรอบด้วยส่วนของสายโซ่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า ออสัญฐาน (amorphous) ดังรูปที่ 3 (Mark, 1940; Krassig, 1985) การที่ส่วนของสายโซ่มีการจัดเรียงตัวแบบขนานและเกิดเป็นผลึกเรียกเซลลูโลสแบบนี้ว่า เซลลูโลส I (Honeyman, 1959) ซึ่งเป็นเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติและไม่เสถียรตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อนำเซลลูโลส I มาละลายน้ำแล้วตกตะกอนหรือนำมาทำให้พองตัวในด่าง ทำให้มีการเรียงตัวของส่วนสายโซ่เป็นแบบไม่ขนาน (antiparallel) ซึ่งทำให้ได้ผลึกที่เสถียรมากกว่าและเรียกเซลลูโลสแบบนี้ว่า เซลลูโลส II (Delmer, 1983; Krassig, 1985) ตัวอย่างของเซลลูโลส II คือ รีเจนเนอเรทเซลลูโลส (regenerated cellulose) เช่น เรยอน (rayon) เซลโลเฟน (cellophane) และ เมอร์ซิไรซ์เซลลูโลส (mercerized cellulose) (Delmer, 1983; Krassig, 1985) การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส I และ II แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 โครงสร้างระดับซูเปอร์โมเลกุลาร์ของเซลลูโลส

ที่มา : Mark (1940)



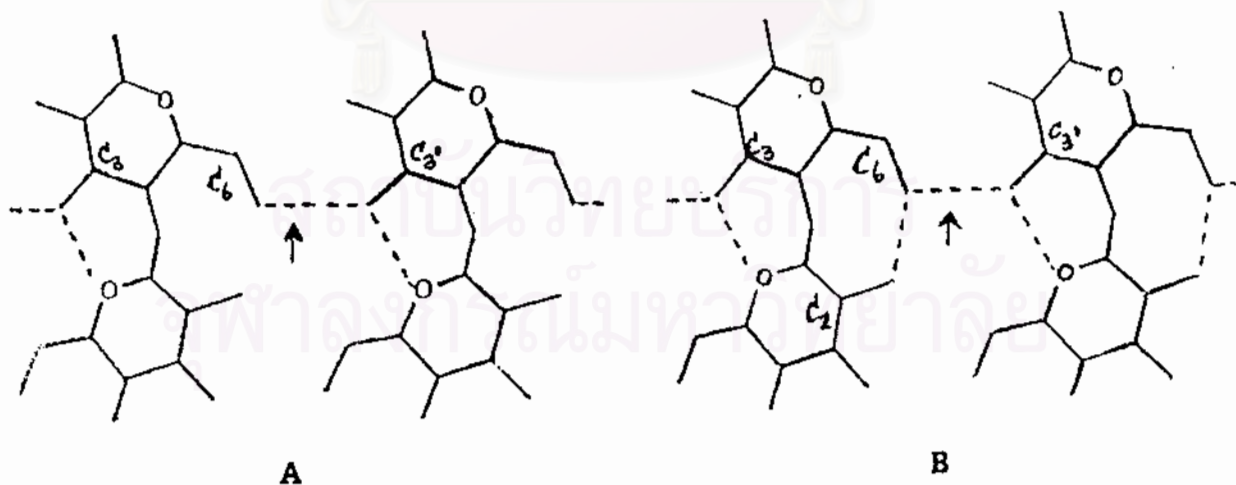
รูปที่ 4 โครงสร้างของหน่วยเซลล์เซลลูโลส

A: เซลลูโลส I ตามโมเดลโครงสร้างผลึกของ Maryer-Mark-Misch

B: เซลลูโลส II ตามโมเดลโครงสร้างผลึกของ Andress

ที่มา : Krassig (1986)

สายโซ่เซลลูโลสที่อยู่ติดกันภายในหน่วยเซลล์ของเซลลูโลส I ทำให้เกิดพันธะเวเลนซ์อันดับที่สอง (secondary valence) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) ระหว่างสายโซ่ที่อยู่ติดกันในระนาบผลึก (lattice plane) เดียวกันดังรูป 4A โมเลกุลเซลลูโลสที่อยู่ติดกันภายในระนาบผลึกที่ 002 (002-lattice layer) จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของสายหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 3' ของอีกสายหนึ่ง (Liang and Marchessault, 1959; Blackwell et al., 1977) ดังรูปที่ 5 ส่วนเซลลูโลส II หมู่ไฮดรอกซิลทุกกลุ่มอยู่ในตำแหน่งที่สามารถทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ทั้งพันธะภายในและระหว่างโมเลกุล โดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเป็นเช่นเดียวกับที่เกิดในเซลลูโลส I ดังรูป 5B สำหรับพันธะระหว่างโมเลกุลของสายโซ่เซลลูโลสระหว่างระนาบ (interplanar bonding) คาดว่ามีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น 3 สายดังนี้ หนึ่งคือพันธะไฮโดรเจนระหว่าง หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของสายโซ่หนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3'' ของอีกสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ตรงกลางของระนาบที่ 002 (002-plane) ตามทิศทางลงดังรูปที่ 6A สองคือพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของสายโซ่หนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2'' ของอีกสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ตรงมุมของระนาบที่ 002 (002-plane) ตามทิศทางขึ้น ดังรูป 6B และสุดท้ายคือพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงแบบไม่ขนาน (antiparallel) ในระนาบ 101 (101-plane) ดังรูปที่ 4B ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของสายหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2'' จากแต่ละหน่วยกลูโคสที่สองของอีกสายโซ่หนึ่งที่เกิดตรงใจกลางตามทิศทางลง และสายโซ่ที่เกิดตรงมุมตามทิศทางขึ้น ดังรูป 6C การมีพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลดังกล่าว ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส II มีโครงสร้างที่อัดแน่นมากกว่าโครงร่างผลึกของเซลลูโลส I (Krassig, 1985)

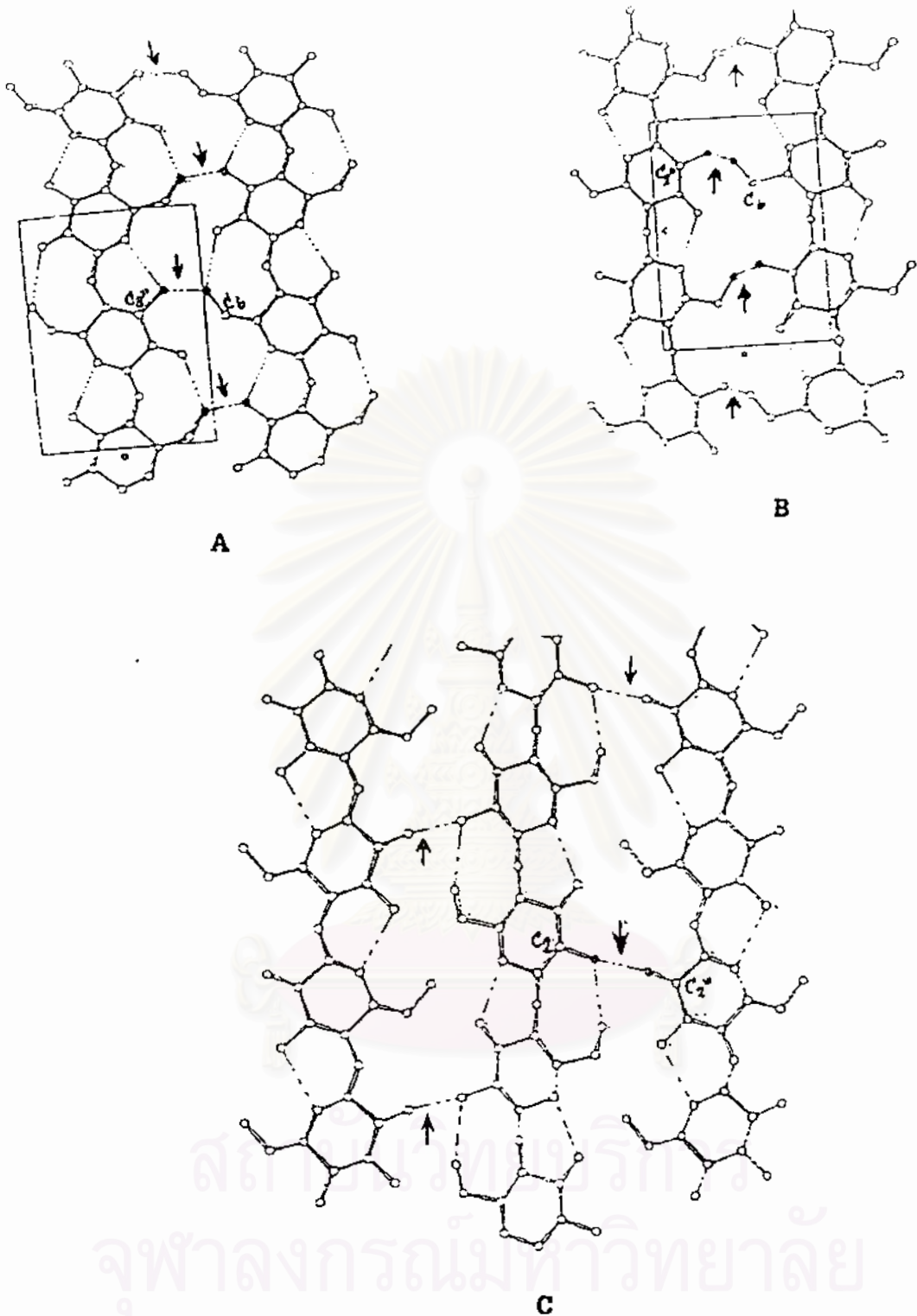


รูปที่ 5 พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส I ที่ระนาบเดียวกัน

A: ตามโมเดลของ Liang and Marchessault

B: ตามโมเดลของ Blackwell และคณะ

ที่มา : Krassig (1985)



รูปที่ 6 โครงร่างตาข่ายที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างระนาบของโครงสร้างของเซลลูโลส II

A: พันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสายโซ่ที่อยู่ตรงกลางของระนาบ 002 ตามทิศทางลง

B: พันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสายโซ่ที่อยู่ตรงมุมของระนาบ 002 ตามทิศทางขึ้น

C: พันธะไฮโดรเจนระหว่างระนาบที่เกิดระหว่างสายโซ่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ

ไม่ขนานในระนาบ 101

ที่มา : Krassig (1985)

## 2.2 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

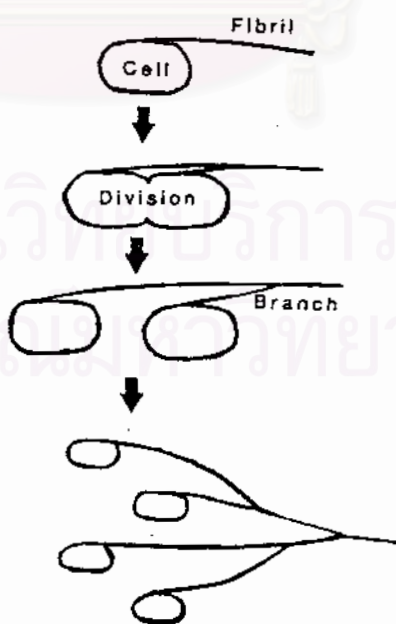
เซลลูโลสจากแบคทีเรียมีชื่อเรียกหลายอย่างเช่น ฐึ่นน้ำมะพร้าว ฐึ่นนาตา ฐึ่นสวรรค์ หรือเห็ดคริสต์เซี่ย หากทำจากน้ำมะพร้าวภาษาฟิลิปปินส์เรียกว่า “Nata de Coco” แต่ถึ่ทำจากน้ำสับปะรดเรียกว่า “Nata de Pina” เป็นผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งรับประทานเป็นของหวานและของคาว คำว่า “Nata” เป็นภาษาท็องถึ่นหมายถึงเซลลูโลสซึ่งแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติกพวก *Acetobacter* โดยเฉพาะ *Acetobacter aceti* subspecies *xylinum* สร้างขึ้นจากการหมักน้ำมะพร้าวหรือน้ำผลไม้ เซ็่่นนี้มีลักษณะเป็นท็อนสั้นๆ ขนาด 0.5 x 0.8 ถึง 1.0 ไมครอน จัดเรียงตัวต็อนกันเป็นสายสั้นๆ ไม่เคลื่อนที่ สร้างแคปซูลได้ ติดสีได้ทั้งแกรมบวกและลบ (ขึ้นอยู่กั่บอายุของเซลล์) เมื่อเลี้ยงบนอาหารฐึ่น โคโลนีมีขนาด 1-2 มิลลิเมตร หากอายุ 6 วัน โคโลนีจะมึ้นขนาดเล็ก กลม นูน แยกเป็นโคโลนีเดี่ยวๆ ชัดเจน เหนียว มีสีน้ำตาลอ่อน การผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียให้ได้ผลผลิตที่สูง จะต้องควบคุมสภาวะในการหมักให้เหมาะสมกั่บการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ปัจจุบันที่มีความสำคัญต็อนการผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียได้แก่ น้ำมะพร้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นต็อนเป็นน้ำมะพร้าวแก่ ที่สดและใหม่ ปรับภาวะให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 4-5 โดยใช้กรดอะซิติก และให้ปริมาณออกซิเจนอย่างเพียงพอ มีการเติมน้ำตาลได้แก่ กาแลกโตส เด็กซ์โตรส ซูโครส แลคโตส หรือมอลโตส ในปริมาณร้อยละ 5-8 โดยน้ำหนักต็อนปริมาตร เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้เชื้อเจริญเติบโต ส่วนสารประกอบไนโตรเจนได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) แอมโมเนียมซัลเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  เคซีน ยีสต์สกัด หรือเปปโตน เติมนในปริมาณร้อยละ 0.5-0.6 โดยน้ำหนักต็อนปริมาตร เพื่อเร่งให้เชื้อผลิตเซลลูโลสได้หนาในเวลาอันสั้น แต่ถ้าเติมนในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้ผลผลิตลดลง นำน้ำมะพร้าวข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องประมาณ 28-31 องศาเซลเซียส ไม้ให้มีการเคลื่อนไหวเป็นเวลา 10-15 วัน จะได้แผ่นเซลลูโลสจากแบคทีเรียหนา 1-2.5 เซนติเมตร (ทิพรัตน์ หงษ์ทริศรี, 2536) ซึ่งการสร้างเซลลูโลสจากแบคทีเรียมี 2 ขั้นตอนคือขั้นแรกกลูโคสในรูปของโมเลกุลอิสระเข้าไปภายในเซลล์และรวมตัวกันเป็นสารตั้งต้นคือพอลิกลูโคแซนและพอลิกลูโคแซนนี้จะแพร่ผ่านออกมาภายนอกเซลล์ ขั้นที่สองพอลิเมอร์เหล่านี้รวมกันเกิดเป็นเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็ก (microfibril) ซึ่งเซลลูโลสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเม็อกและแผ่นฝ้าที่ผิวหน้าอาหารเหลว (Colvin et al., 1977)

จากการวิเคราะห์โดยการย่อยด้วยกรดหรือ เอนไซม์ การละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน และการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโตกราฟี (chromatography) เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) อัลตราไวโอเลตสเปกโทรสโกปี (ultraviolet spectroscopy) นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance) เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) และ อิเล็กโทรโฟรีซิส (electrophoresis) บ่งว่าเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีลักษณะคล้ายเซลลูโลสจากพืช (Kaushal and Walker, 1950; Hestrin and Schramm, 1954) แต่เส้นใยของเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นใยของเชื้อยิวซึ่งมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.03 มิลลิเมตร และ

เส้นใยของเยื่อใยสั้นมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 0.5-3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.02 มิลลิเมตร (Bublitz, 1980) ในขณะที่ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ 7) พบว่าเส้นใยของเซลล์โลสจากแบคทีเรียมีความกว้างเพียง 20-50 นาโนเมตร ความยาวอย่างน้อย 10 ไมโครเมตร และเส้นใยของเซลล์โลสจากแบคทีเรียประกอบด้วยไมโครไฟบริลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร (Yamanaka et al., 1989) เส้นใยแตกกิ่งก้านแบบสามทาง (three-way branching points) ตลอดความยาวดังรูปที่ 8 การแตกกิ่งก้านของเส้นใยเกิดจากการแบ่งเซลล์ในการแพร่พันธุ์ของแบคทีเรียซึ่งเกิดขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดการแตกกิ่งก้านกันต่างๆ ไป ความยาวของเส้นใยระหว่างจุดที่แตกกิ่งก้านจะมีความยาวประมาณ 180-960 ไมโครเมตร (Brown, Willson and Richardson, 1976)



รูปที่ 7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวหน้าเซลล์โลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง  
ที่มา : Yamanaka และคณะ (1989)



รูปที่ 8 กลไกการแตกกิ่งก้านของไฟบริลเซลล์โลสจากแบคทีเรีย  
ที่มา : Brown และคณะ (1976)

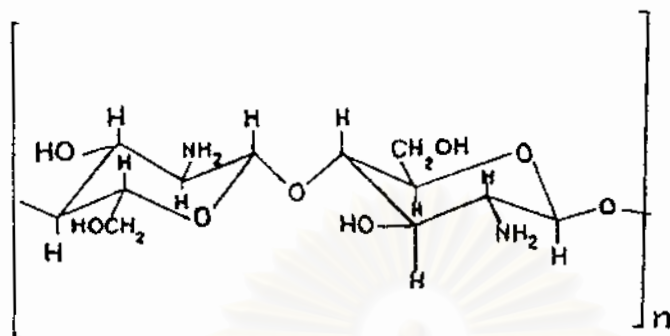


ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสจากแบคทีเรียเล็กกว่าเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้นมาก เป็นผลให้เส้นใยของเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีความแข็งแรงของเส้นใยต่ำกว่าเส้นใยจากเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น เพราะจำนวนสายโซ่เซลลูโลสที่พันกันด้วยพันธะไฮโดรเจนภายในเส้นใยมีน้อยกว่า ถ้านำเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธีเดียวกับกระดาษต่างๆ ไปแล้วเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ผลิตจากเซลลูโลสจากแบคทีเรีย เยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ที่นำหนักมาตรฐานของแผ่นฟิล์มที่เท่ากันพบว่าฟิล์มที่ผลิตจากเซลลูโลสจากแบคทีเรียมียังส์โมดูลัส ดัชนีความต้านแรงดึง และดัชนีความต้านแรงดันทะลุสูงกว่าฟิล์มซึ่งผลิตจากเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น แม้ความแข็งแรงของเส้นใยของเซลลูโลสจากแบคทีเรียต่ำกว่าเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น แต่ด้วยขนาดที่เล็กมกของเส้นใยของเซลลูโลสจากแบคทีเรียจึงทำให้พื้นที่สัมผัสกันระหว่างเส้นใยและความหนาแน่นของเส้นใยสูง (Brown et al., 1980) เป็นผลให้เส้นใยของเซลลูโลสจากแบคทีเรียยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มาก มีผลให้ขนาดของบริเวณเชื่อมต่อของเส้นใย (junction zone) ใหญ่กว่าเส้นใยของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ขณะที่ความยาวของเส้นใยระหว่างบริเวณเชื่อมต่อของเส้นใย (junction zone) ของเซลลูโลสจากแบคทีเรียสั้นกว่าเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ดังนั้นเซลลูโลสจากแบคทีเรียจะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยสูงกว่าเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ สูงกว่าฟิล์มซึ่งผลิตจากเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น (รังสิมก ชลคุป, 2538)

จากที่กล่าวข้างต้นสรุปได้ว่า เซลลูโลสจากแบคทีเรียมีความแข็งแรงระหว่างพันธะของเส้นใยสูง แต่มีความแข็งแรงของเส้นใยต่ำ ส่วนเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้นจะมีความแข็งแรงของเส้นใยสูง แต่มีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยต่ำ

### 2.3 ลักษณะทั่วไปของโคโคแซน

โคโคแซนเป็นอนุพันธ์ของโคคินมีชื่อทางเคมีว่า poly- $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ที่เตรียมได้จากการตัดแปรรูปโคคินด้วยการกำจัดหมู่เอซิดิล ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของวงแหวนน้ำตาลของโคคิน เหลือเป็นหมู่เอมิโนอิสระประมาณร้อยละ 60 ขึ้นไป (Muzzarelli, 1985) สูตรโครงสร้างโดยทั่วไปของโคโคแซนดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 สูตรโครงสร้างโดยทั่วไปของไคโตแซน

ที่มา : Conrad (1965)

ค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะซิติก (degree of deacetylation) ของไคโตแซนที่เตรียมได้ขึ้นกับชนิดสารละลายต่างที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายต่าง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิติก ปฏิกริยาออกซิเดชัน และคุณภาพของไคติน สารละลายต่างที่นิยมใช้ในการกำจัดหมู่อะซิติกของไคตินคือ สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นของสารละลายต่าง โดยทั่วไปมักใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก นอกจากรณีอาจใช้ต่างในรูปแบบอื่นแทน ใช้วิธี alkali fusion โดยการหลอมไคติน 30 กรัม กับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 150 กรัม ในถ้วยนิกลินภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายต่างที่ความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้สายโซ่ไคโตแซนแตกขาดได้ แต่การใช้สารละลายต่างความเข้มข้นต่ำเกินไป ก็มีผลต่อความสามารถในการละลายไคโตแซนในกรดอ่อน โดยมีผลให้การละลายไม่ดี เนื่องจากมีปริมาณหมู่เอมีนอิสระต่ำนั่นเอง

การกำจัดหมู่อะซิติก โดยมากมักทำที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 60-110 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราเร็วในการกำจัดหมู่อะซิติกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสมีมากกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเกือบ 2 เท่า แต่จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของไคโตแซนลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการแตกขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่างสูงขึ้น ควรใช้อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิติกลดต่ำลง เมื่อเวลาในการกำจัดหมู่อะซิติกเพิ่มขึ้นไคโตแซนจะมีปริมาณอะซิติกและน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่มีความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น และการใช้เวลาในการกำจัดหมู่อะซิติกมากกว่า 2 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อการเพิ่มค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะซิติกมากนัก อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิติกมีตั้งแต่ 5-15 นาที ถึง 2-15 ชั่วโมงขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ดังกล่าวมาแล้ว

ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของโคโคแซน เนื่องจากออกซิเจนในอากาศมีผลต่อสายโซ่โคโคแซนโดยทำให้ออกซิเจนในระหว่างการทำจัดหมู่อะซิติก จะทำให้สายโซ่โคโคแซนเกิดการแตกขาดได้ โคโคแซนที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ดังนั้นการกำจัดหมู่อะซิติกจึงควรทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้อาจเติมสารดักจับออกซิเจนเช่น ไฮโอฟินอล (thiophenol) ซึ่งนอกจากจะจับออกซิเจนได้แล้วยังมีผลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย

โคโคแซนเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมโคโคแซน คุณภาพของโคโคแซนจึงมีผลต่อคุณภาพของโคโคแซน อย่างไรก็ดีคุณภาพของโคโคแซนก็ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมโคโคแซน และกรรมวิธีที่ใช้แยกโคโคแซนด้วย

## 2.4 สมบัติของโคโคแซน

สมบัติด้านเคมีกายภาพทั่วไปของโคโคแซน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติด้านเคมีกายภาพทั่วไปของโคโคแซน

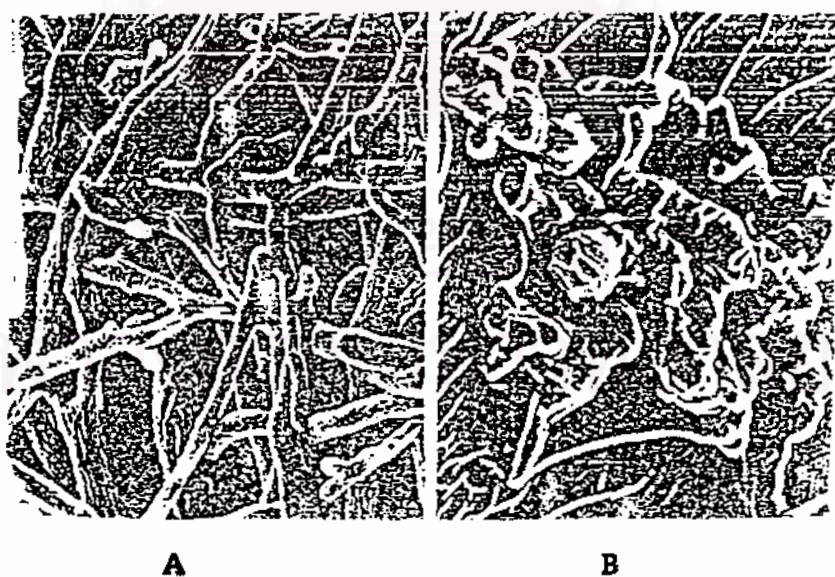
สมบัติ	โคโคแซน
ร้อยละของปริมาณความชื้น	ร้อยละ 2-10
ร้อยละของปริมาณไนโตรเจน	ร้อยละ 7-8.4
ร้อยละการกำจัดหมู่อะซิติก	มากกว่าร้อยละ 60
ร้อยละของปริมาณซีเถ้าที่ 900 องศาเซลเซียส	ต่ำกว่าร้อยละ 1
ความหนืดของสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตรในการทดสอบซีติกเข้มข้นร้อยละ 1	200-3000 เซนติพอยล์
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	$1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$ ดาลตัน
พีเคเอ (pKa)	6-7 (ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 6.3)

ที่มา: Muzzarelli (1985) และ Mathur และ Narang (1990)

สมบัติด้านการละลายของโคโคแซน พบว่าโคโคแซนสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์ เจือจางหลายชนิดเช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดออกซาลิก กรดมาลิก กรดซัคซินิก กรดอะดิพิค กรดแลกติก กรดไพรูวิก กรดมาลิก กรดทาร์ทริก และกรดซิตริก เนื่องจากโคโคแซนมีหมู่ อะมิโนอิสระที่สามารถจับโปรตอนได้ ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจางหลายชนิด นอกจากนี้โคโคแซนยังสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง แต่ต้องมีการให้ความร้อนและการกวน

โคโตแซนไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟูริก เพราะจะเกิดโคโตแซนซัลเฟตซึ่งเป็นผลึกของแข็งขึ้น โคโตแซนไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป (Kienzle et al., 1982)

สมบัติด้านการเป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังงานวิจัยของ Ghaouth และคณะ (1992) ศึกษาผลของการเคลือบโคโตแซนบนสตรอเบอร์รี่ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Botrytis cinerea* และ *Rhizopus stolonifer* โดยนำสตรอเบอร์รี่มาจุ่มในสารละลายของเชื้อราเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร ปลอ่ยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสตรอเบอร์รี่จุ่มในสารละลายโคโตแซนเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร เทียบกับชุดควบคุมที่จุ่มในน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อมาแล้ว จากนั้นปลอ่ยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 ติดตามผลการเน่าเสียของสตรอเบอร์รี่เป็นเวลา 1 เดือน พบว่าเมื่อถึงวันที่ 21 สตรอเบอร์รี่ชุดควบคุมเน่าเสียไปร้อยละ 52 ในขณะที่สตรอเบอร์รี่ซึ่งเคลือบด้วยโคโตแซนเน่าเสียไปร้อยละ 11 และเมื่อครบ 1 เดือน สตรอเบอร์รี่ชุดควบคุมเน่าเสียไปร้อยละ 87 ในขณะที่สตรอเบอร์รี่ซึ่งเคลือบด้วยโคโตแซนเน่าเสียไปร้อยละ 22 จึงสรุปได้ว่าโคโตแซนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ ซึ่งกลไกยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราคือ โคโตแซนสามารถจับโปรตอนและอยู่ในสภาพพอลิแคทไอออน (polycation) ได้ซึ่งสภาพดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิดการสูญเสียกรดอะมิโนและโปรตีนที่มีประจุลบของเซลล์เชื้อราทำให้ลักษณะโครงสร้างของเซลล์เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง (morphological change) ดังภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope) ในรูปที่ 10 ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อราถูกยับยั้ง



รูปที่ 10 ผลของโครงสร้าง *Rhizopus stolonifer* ซึ่งเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar

A: เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อปกติ

B: เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสมโคโตแซน 1.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ

ที่มา : Ghaouth และคณะ (1992)

## 2.5 การผลิตฟิล์มเซลล์โกลด์

Yamanaka และคณะ (1989) ได้ทดลองผลิตฟิล์มจากเซลล์โกลด์จากแบคทีเรียทั้งแผ่นภายหลังการทำให้บริสุทธิ์ด้วยด่าง โดยใช้แผ่นไฮดรอลิก (hydraulic plate) กดเซลล์โกลด์จากแบคทีเรียพร้อมกับให้ความร้อนเซลล์โกลด์จากแบคทีเรียถูกประกอบอยู่ระหว่างแผ่นตะแกรงขนาด 150 เมช (meshes) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมโดยแปรความดันไฮดรอลิก (hydraulic pressure) ในช่วง 49-1,960 เมกกะปาสกาล และแปรอุณหภูมิในช่วง 120-200 องศาเซลเซียส แล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพ ส่วนขั้นตอนการผลิตแผ่นทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพเชื้อและสมบัติของกระดาษในห้องปฏิบัติการ ตามวิธีของ ISO 5269/2 (1980) มีขั้นตอนดังนี้ (Young, 1980)

- การกระจายเชื้อ (disintegration) เพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกัน และกระจายในน้ำอย่างสม่ำเสมอ
- การบดเชื้อ (beating) เส้นใยที่อยู่ในน้ำจะได้รับแรงกระทำผ่านฟันบด 2 ชุด โดยชุดหนึ่งอยู่นิ่ง (stator) อีกชุดหนึ่งหมุน (rotor) ทำให้เส้นใยพองและอ่อนตัว เมื่อบดต่อไปเส้นใยจะแตกแขนง (fibrillation) ทำให้การสร้างพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยมีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้ผิวหน้าแผ่นทดสอบมีความสม่ำเสมอ
- การเตรียมน้ำเชื้อ เพื่อเจือจางน้ำเชื้อให้ได้ความเข้มข้นของน้ำเชื้อที่ต้องการ
- การขึ้นรูปแผ่นทดสอบ โดยใช้เครื่องทำแผ่นซึ่งประกอบด้วยตะแกรงพื้นที่ 200 ตารางเซนติเมตร ขนาดรูตะแกรง 150 เมช ติดตั้งอยู่ที่พื้นห้องขึ้นรูปแผ่นทดสอบ มีท่อน้ำเข้าและออกเพื่อให้น้ำผสมกับน้ำเชื้อ และใช้ใบพัดกวานผสมน้ำเชื้อให้เข้ากันและปล่อยน้ำออกผ่านตะแกรง เชื้อจะก่อตัวเป็นแผ่นเปียกอยู่บนตะแกรง
- การรีดแผ่น โดยการนำกระดาษซับประมาณ 5 แผ่น ซึ่งมีแผ่นโลหะอยู่ด้านบนสุดวางทับไปบนแผ่นเปียก และใช้แท่งน้ำหนัก (couch roll) ขนาด 13 กิโลกรัม กลิ้งทับเพื่อทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก และทำให้เกิดการยึดกันแน่นระหว่างเส้นใยภายในแผ่นทดสอบ
- การอัดแผ่น เพื่อรีดเอาน้ำออกจากแผ่นและทำให้แผ่นทดสอบมาติดกับแผ่นโลหะ โดยวางแผ่นโลหะสัมผัสกับแผ่นทดสอบแล้วตามด้วยกระดาษซับและนำเข้าเครื่องอัดแผ่น (sheet press) การอัดแผ่นขึ้นกับความดันและเวลาในการอัด เพราะมีผลต่อการเกิดพันธะของเส้นใยภายในแผ่น และส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ
- การทำแห้งเพื่อทำให้แผ่นทดสอบแห้งโดยวางแผ่นโลหะที่มีแผ่นทดสอบที่เปียกตรึงอยู่บนกรอบเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นทดสอบหดตัวเมื่อแห้ง

## 2.6 สมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ

สมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบมีดังนี้ (พรทวิ พึ่งรัสมิ และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534; ริงลิมา ชลคูป, 2538; รัชনী อัสวเกสมณี และคณะ, 2539)

### 2.6.1 สมบัติพื้นฐาน ประกอบด้วย

- น้ำหนักพื้นฐาน (basis weight) หมายถึงน้ำหนักของแผ่นทดสอบต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐานที่เก็บในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้มีการควบคุมตามมาตรฐานกำหนด น้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบจะเป็นประโยชน์ในด้านการควบคุมการผลิตแผ่นทดสอบให้ทุกๆ แผ่นที่ใช้ทดสอบมีสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อเปรียบเทียบและสรุปผล หน่วยที่ใช้วัดน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบเป็น กรัมต่อตารางเมตร ตามระบบสากลทั่วไป แต่บางประเทศยังมีการใช้หน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางฟุต (ISO 536, 1976)

- ความหนา (thickness) หมายถึงระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของแผ่นทดสอบ ภายใต้สภาวะที่กำหนด หน่วยที่ใช้ในอเมริกาจะกำหนดเป็น นิ้ว (inch) หรือ มิล (1/1000 ของหนึ่งนิ้ว) ในระบบ SI จะวัดเป็นหน่วย ไมโครเมตร หรือ มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นทดสอบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักมาตรฐาน การรีดแผ่น การบดเยื่อ และชนิดของเยื่อที่ใช้ (ISO 534, 1988)

- ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) หมายถึงอัตราส่วนของน้ำหนักมาตรฐานต่อความหนา ค่านี้เกี่ยวข้องกับความพรุน และความแข็งแรงของแผ่น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นปรากฏคือปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณพันธะของเส้นใยได้แก่ ความยืดหยุ่นของเส้นใย ปริมาณการติด ปริมาณของเฮมิเซลลูโลส และอีกปัจจัยคือการมีวัสดุอื่นที่เพิ่มน้ำหนักแต่ไม่เพิ่มความหนา (ISO 534, 1988)

### 2.6.2 สมบัติเชิงกล ประกอบด้วย

- ความยืด (% elongation) หมายถึงระยะทางที่แผ่นทดสอบยืดออกด้วยแรงดึงจนขาด คำนี้อัดได้ในขณะทดสอบความต้านแรงดึง เป็นค่าที่แสดงความเหนียวของแผ่นทดสอบ การบดเยื่อและการตีเยื่อจะช่วยให้สมบัติความยืดของแผ่นทดสอบ นอกจากนี้ความยืดของแผ่นทดสอบยังขึ้นกับระยะทางของเส้นใยระหว่าง junction zone ซึ่งถ้าระยะนี้สั้นความยืดของแผ่นทดสอบจะน้อย (Flory, 1953; ISO 1924/2, 1994)

- ยิงส์โมดูลัส (Young 's modulus) หมายถึงค่าอัตราส่วนของแรงเค้น (stress) ต่อแรงเครียด

(strain) และเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร ค่านี้แสดงถึงความยืดหยุ่นและความแกร่งของแผ่นทดสอบ Perkins และ Mark (1976) พบว่าสมบัติความยืดหยุ่นของแผ่นทดสอบขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของเส้นใยและรูปทรงของโครงร่างตาข่ายถ้าเส้นใยมีความยืดหยุ่นดีและมีรูปทรงโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสมจะทำให้แผ่นทดสอบมีความยืดหยุ่นสูง ค่ายังส์โมดูลัสนี้ขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย มากกว่าความแข็งแรงของตัวเส้นใย (Brown et al., 1976; ISO 1924/2, 1994)

- ความต้านแรงดึง (tensile strength) หมายถึงค่าแรงที่ใช้ในการดึงแผ่นทดสอบที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่จนขาดภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนดคมีหน่วยเป็น แรงต่อความกว้างของแผ่นทดสอบที่ใช้ทดสอบ เช่น กิโลนิวตันต่อเมตร หรือ ปอนด์ต่อนิ้ว ค่านี้ขึ้นกับการบดเชื้อและความดึงของแผ่นในขณะทำแห้ง การบดเชื้อและความดึงของแผ่นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่เส้นใยสัมผัสกันมากขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าบดเชื้อมากเกินไปทำให้โครงสร้างเส้นใยเสียหายจนไม่สามารถเกิดพันธะระหว่างเส้นใยได้จะทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลง ส่วนความต้านแรงดึงเมื่อเปียก (wet tensile strength) เป็นการตรวจสอบค่าความต้านแรงดึงขณะที่แผ่นทดสอบอิมด้วยน้ำ (Britt, 1965; ISO 1924/2, 1994)

- ความต้านแรงดันทะลุ (bursting strength) หมายถึงค่าความดันสูงสุดที่แผ่นทดสอบจะทนได้เมื่อใช้ความดันกระทำตั้งฉากกับระนาบของแผ่นทดสอบจนทำให้แผ่นทดสอบแตกทะลุ มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (kPa) หรือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว สมบัติความต้านแรงดันทะลุนี้ จะใช้เป็นดัชนีสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการความทนทานของแผ่นทดสอบเช่น นำไปใช้เป็นกระดาษฉีกกล่อง (linerboard) ซึ่งจะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก (corrugated board) หรือกล่องที่ใช้สำหรับการขนส่ง (shipping container) (ISO 2758, 1983; พรทวี พึ่งรัมย์ และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534; รัชนิย์ อัสวเกสมณี และคณะ, 2539)

- ความต้านแรงฉีกขาด (tearing resistance) หมายถึงความสามารถของแผ่นทดสอบที่จะต้านแรงกระทำซึ่งจะทำให้ฉีกขาดออกจากรอยฉีกนำเดิม มีหน่วยเป็นมิลลิวัดตัน (mN) หรือกรัม ความต้านแรงฉีกขาดขึ้นกับจำนวนเส้นใยที่เกาะเกี่ยวกันในแผ่น ความยาวของเส้นใย จำนวนและความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย แผ่นทดสอบที่ทำจากเยื่อใยยาวมีค่านี้สูงกว่าแผ่นทดสอบที่ทำจากเยื่อใยสั้น (ISO 1974, 1990; พรทวี พึ่งรัมย์ และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534; รัชนิย์ อัสวเกสมณี และคณะ, 2539)

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการรับแรง โดยมากจะรายงานในรูปของดัชนี (index) ที่เทียบต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐาน

### 2.6.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร ประกอบด้วย

- การซึมผ่านไอน้ำของไอน้ำ (water vapour transmission) หมายถึงปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวหน้าหนึ่ง ไปยังอีกผิวหน้าหนึ่งของหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุหรือภาชนะบรรจุในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ ปริมาณการซึมผ่านไอน้ำของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุมีความสอดคล้องกับการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมให้ป้องกันสินค้าไม่ให้เสื่อมสภาพภายใต้เวลาที่กำหนด (พรทวิ พึ่งรัศมี และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534; รัชนิย์ อัสวเกศมณี และคณะ, 2539)

- การซึมผ่านได้ของก๊าซ (gas transmission) หมายถึงปริมาตรของก๊าซที่ซึมผ่านจากผิวหน้าหนึ่ง ไปยังอีกผิวหน้าหนึ่งของหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุหรือภาชนะบรรจุในระยะเวลาที่กำหนด และภายใต้ผลต่างของความดันหนึ่งหน่วย ก๊าซที่ซึมผ่านภาชนะบรรจุได้อาจเป็นออกซิเจน ไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซบางชนิดทำให้สินค้าเสื่อมคุณภาพ แต่สินค้าบางชนิดต้องการก๊าซเพื่อรักษาคุณภาพ ปริมาณการซึมผ่านได้ของก๊าซของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุจึงมีความสอดคล้องกับการเลือกใช้ภาชนะที่สามารถป้องกันสินค้าไม่ให้เสื่อมสภาพในระยะเวลาที่กำหนด (พรทวิ พึ่งรัศมี และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534; รัชนิย์ อัสวเกศมณี และคณะ, 2539)

### 2.6.4 สมบัติทางทัศนศาสตร์ ประกอบด้วย

- ความขาวสว่าง (brightness) หมายถึงอัตราส่วนร้อยละของค่าสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านต่อค่าสะท้อนแสงของวัตถุซึ่งสะท้อนแสงได้สมบูรณ์ โดยวัดการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับแบเรียมซัลเฟต ค่าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับการกระจายและดูดซับแสงของเยื่อ (ISO 2470, 1971; พรทวิ พึ่งรัศมี และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534)

- ความทึบแสง (opacity) หมายถึงอัตราส่วนร้อยละของค่าสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบชั้นเดียว ซึ่งรองรับด้วยพื้นดำ ต่อค่าสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบที่มีความหนาพอที่แสงไม่สามารถทะลุผ่าน (ISO 2471, 1977; พรทวิ พึ่งรัศมี และ อรัญ หาญสืบสาย, 2534)

## 2.7 ผลของพันธะของเส้นใยต่อสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ

ลักษณะความแข็งแรงของแผ่นทดสอบที่แสดงออกมาในรูปสมบัติเชิงกลเกิดจากโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นในช่วงการขึ้นรูปแผ่นทดสอบ โดยหลังจากน้ำเยื่อที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำแผ่นทดสอบและใช้ใบพัดกวานให้น้ำเยื่อผสมกันดีแล้วถูกปล่อยน้ำออกจากเครื่องทำแผ่นทดสอบ



เริ่มขึ้น การสร้างโครงร่างตาข่ายของเส้นใยที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนก็เริ่มขึ้นและการสร้างพันธะจะพัฒนาต่อไปตามปริมาณน้ำที่ปล่อยออกไป โดยการสานกันของโครงร่างตาข่ายของเส้นใยจะไม่แข็งแรงในช่วงที่การปล่อยน้ำออกจากตะแกรงของเครื่องทำแผ่นทดสอบยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากในช่วงดังกล่าวมีน้ำอยู่ในช่องว่างของโครงร่างตาข่ายของเส้นใยปริมาณมาก และแรงดึงผิวยังมีปริมาณน้อย แต่เมื่อการปล่อยน้ำออกจากตะแกรงมากขึ้น สัดส่วนของอากาศต่อน้ำบนเยื่อที่แขวนลอยอยู่ก็จะมีมากขึ้น และในที่สุดเมื่อการปล่อยน้ำออกจากตะแกรงสมบูรณ์ สัดส่วนของอากาศต่อน้ำบนเยื่อที่แขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดแรงดึงผิวปริมาณมากที่กดทับ (compact) และดึง (draw) ให้เส้นใยมาอยู่ชิดกันมากขึ้น และการสร้างพันธะที่แท้จริงระหว่างเส้นใย (interfiber bonding) จะเกิดขึ้น และในขั้นตอนนี้จะได้แผ่นทดสอบเป็ยกล้าอย่างอยู่บนตะแกรงของเครื่องทำแผ่นทดสอบซึ่งแผ่นทดสอบดังกล่าวจะต้องผ่านกระบวนการรีดและการอัด เพื่อกดหรือบีบให้น้ำออกจากแผ่นทดสอบมากยิ่งขึ้น และมีผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยมีเพิ่มขึ้น และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำแห้งจะเกิดการเสียน้ำระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น และเกิดการสร้างพันธะที่แท้จริงระหว่างเส้นใยเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสียภายในเส้นใยด้วยซึ่งทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในเส้นใย (intrafiber bonding) เป็นผลให้แผ่นทดสอบเกิดการหดตัว (shrinkage) ทั้งตามแนวยาวของเส้นใยและตามแนวขวางของเส้นใย แต่การหดตัวตามแนวขวางของเส้นใยเกิดขึ้นมากกว่าตามแนวยาวของเส้นใย (Robinson, 1980)

เนื่องจากลักษณะความแข็งแรงของแผ่นทดสอบที่เกิดจากโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะแสดงออกมาในรูปสมบัติทางเชิงกลของแผ่นทดสอบ โดยเฉพาะค่าความต้านแรงดึงของแผ่นทดสอบ ซึ่ง Robinson (1980) อธิบายว่าความต้านแรงดึงของแผ่นทดสอบขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของตัวเส้นใยหรือความแข็งแรงในรูปความต้านแรงดึงของเส้นใย และขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยดังสมการที่ 1 และรังสีมา ชลคุป (2538) อธิบายว่าความแข็งแรงของเส้นใยแปรผันตามความแข็งแรงของ back-bone ของสายโซ่เซลลูโลสและความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่เซลลูโลสในเส้นใย ดังสมการที่ 2 ส่วนความแข็งแรงรวมของพันธะทั้งหมดระหว่างเส้นใยที่เกิดจากการสานตัวของเส้นใยนั้นแปรผันตามจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยดังสมการที่ 3

$$1 = \frac{1}{F} + \frac{1}{B} \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ  $T$  = ความต้านแรงดึง (กิโลแคลอรีต่อโมล)

$F$  = ความแข็งแรงของตัวเส้นใย (กิโลแคลอรีต่อโมล)

$B$  = ความแข็งแรงรวมของพันธะทั้งหมดระหว่างเส้นใย (กิโลแคลอรีต่อโมล)

$$F \propto n_C E_C + n_H E_H \quad \text{สมการที่ 2}$$

- เมื่อ  $F$  = ความแข็งแรงของตัวเส้นใย (กิโลแคลอรีต่อโมล)  
 $n_C$  = จำนวนสายโซ่เซลลูโลสในเส้นใย  
 $E_C$  = เอนทาลปีของพันธะโควาเลนต์ของ back-bone สายโซ่เซลลูโลส (กิโลแคลอรีต่อโมล) ซึ่งค่าประมาณ 50 กิโลแคลอรีต่อโมล  
 $n_H$  = จำนวนของพันธะระหว่างสายโซ่เซลลูโลสในเส้นใย  
 $E_H$  = เอนทาลปีของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่เซลลูโลส (กิโลแคลอรีต่อโมล) ซึ่งมีค่าประมาณ 15 กิโลแคลอรีต่อโมล

$$B \propto n_F \cdot \overline{n_H'} \cdot E_H \quad \text{สมการที่ 3}$$

- เมื่อ  $B$  = ความแข็งแรงรวมของพันธะทั้งหมดระหว่างเส้นใย (กิโลแคลอรีต่อโมล)  
 $n_F$  = จำนวนเส้นใย  
 $\overline{n_H'}$  = จำนวนเฉลี่ยของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยต่อ 1 เส้นใย  
 $E_H$  = เอนทาลปีของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างเส้นใย (กิโลแคลอรีต่อโมล)

เมื่อเพิ่มความแข็งแรงรวมของพันธะทั้งหมดระหว่างเส้นใย สมบัติความต้านแรงดึงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดึงที่ทำให้แผ่นทดสอบขาดออกจากกันนั้น จะต้องเริ่มทำลายพันธะระหว่างเส้นใยก่อนและจึงทำลายตัวเส้นใยต่อไป และสมบัติความต้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากแรงดึงที่ทำให้แผ่นทดสอบแตกทะลุ นั้น จะต้องเริ่มทำลายพันธะระหว่างเส้นใยก่อนและจึงทำลายตัวเส้นใยต่อไปเช่นกัน ส่วนความต้านแรงดึงก็ขึ้นกับความแข็งแรงของตัวเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงรวมของพันธะทั้งหมดระหว่างเส้นใย เนื่องจากแผ่นทดสอบมีรอยฉีกขาดนำอยู่ก่อนแล้วแรงที่ใส่เข้าไปเพื่อทำให้แผ่นทดสอบขาดออกจากกันก็จะทำลายที่ตัวเส้นใยโดยตรง ค่านี้จึงขึ้นกับความแข็งแรงของตัวเส้นใยมากกว่า ดังนั้นเชื่อว่าจึงช่วยให้สมบัติความต้านแรงดึงก็เพิ่มขึ้น (Robinson, 1980)

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหล (rheological behavior) ของแผ่นทดสอบ และผลจากการทดลองสนับสนุนต่างๆ พบว่าสัดส่วนของพันธะไฮโดรเจน (fraction of hydrogen bonds) มีผลต่อสมบัติความต้านแรงดึงมาก ซึ่งสัดส่วนของพันธะไฮโดรเจนในหนึ่งหน่วยปริมาตรของโครงสร้างค้ำยันเส้นใยเซลลูโลส (fraction bond) ขึ้นกับความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบดังแสดงในสมการที่ 4 (Nissan และ Sternstein, cited in Robinson, 1980)

$$\text{Fraction bond} = \left[ \frac{d}{1.6} \right]^5 \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ  $d$  = ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบ

## 2.8 การปรับปรุงสมบัติของแผ่นทดสอบโดยใช้ไคโตแซน

การเติมพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตแผ่นทดสอบมีวัตถุประสงค์หลายประการเช่น เพิ่มการต้านทานการซึมผ่าน เพิ่มความต้านแรงดึง เพิ่มความต้านแรงดึงเมื่อเปียก เพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์ เพิ่มการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยการเติมพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตนั้นสามารถเติมก่อนหรือหลังการสร้างโครงร่างของเส้นใยก็ได้ (web formation) โดยการเติมก่อนการสร้างโครงร่างของเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีทั่วไปที่นิยมคือการเติมในขั้นตอนการตีเยื่อ (beater addition) ซึ่งเป็นการผสมพอลิเมอร์กับเยื่อก่อนการขึ้นรูปแผ่นทดสอบ ซึ่งวิธีนี้พอลิเมอร์จะสะสมอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยของแผ่นทดสอบ โดยทางทฤษฎีนั้นไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ทั้งนี้ให้พิจารณาจากความเร็วในการขึ้นรูป ราคาของพอลิเมอร์ และสมบัติของแผ่นทดสอบที่ต้องการ โดยปกติมักเติมพอลิเมอร์น้อยกว่าร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อ ส่วนการเติมหลังการสร้างโครงร่างของเส้นใยเช่น การฉีดพ่น (spray) สารละลายพอลิเมอร์ที่ผิวหน้าแผ่นทดสอบ และการเคลือบ (coat) ผิวหน้าแผ่นทดสอบ (Waterhouse, 1983)

ไคโตแซนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เพียงชนิดเดียวในธรรมชาติที่มีประจุบวกจึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมากมาย มีงานวิจัยพบว่า การเติมไคโตแซนลงในกระบวนการผลิตแผ่นทดสอบที่ขึ้นรูปโดยวิธีเดียวกับกระดาษสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของแผ่นทดสอบได้

### 2.8.1 การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบโดยใช้ไคโตแซน

การเติมไคโตแซนลงในกระบวนการผลิตแผ่นทดสอบในขั้นตอนการตีเยื่อปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อสามารถเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นทดสอบได้ เนื่องจากไคโตแซนสามารถเพิ่มจำนวนพันธะอ็อกซิกและพันธะไฮโดรเจนในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสที่มีประจุลบได้เช่นเดียวกับพอลิแคทไอออนิกอิเล็กโทรไลต์เช่น พอลิเอธิลีนอิมินที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน แต่ไคโตแซนมีข้อดีในด้านเป็นมิตรต่อธรรมชาติมากกว่า และเมื่อเทียบประสิทธิภาพของไคโตแซนกับพอลิเอธิลีนอิมิน (polyethylenimine) ที่ใช้ปรับปรุงแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลแล้วพบว่าที่ความแข็งแรงของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 70 จากสถานะที่ไม่มีการเติมสารใดๆ เหมือนกันนั้น ต้องเติมพอลิเอธิลีนอิมินถึงร้อยละ 7 ของน้ำหนักเยื่อ ในขณะที่เติมไคโตแซนเพียงร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักเยื่อเท่านั้น (Allan et al., cited in Waterhouse, 1983)

Slagel และ Sinkovitz (1977) ศึกษาการทำแผ่นทดสอบโดยใช้เยื่อใยสั้นซัลไฟต์ฟอกขาวผสมไคโตแซน ปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งในขั้นตอนการตีเยื่อในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง เทียบกับการผลิตแผ่นทดสอบที่สภาวะเดียวกันแต่ไม่มีการเติมไคโตแซนที่น้ำหนักมาตรฐาน 73 กรัมต่อตารางเมตร จากผลการทดลองพบว่าในสภาวะที่เป็นกรดนั้นความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.5 ความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.1 และในสภาวะที่เป็นด่างความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 20.1 และความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.9 จากสภาวะที่ไม่มีการเติมไคโตแซน ซึ่งจากผลการทดลองอธิบายได้ว่าในสภาวะที่เป็นกรด น้ำเยื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็น 4.5 ในขณะที่หมู่อะมิโนของไคโตแซนมี pKa ประมาณ 6.3 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า pKa หมู่อะมิโนของไคโตแซนจึงรับโปรตอนและอยู่ในสภาวะที่มีประจุบวก (polycation) ดังสมการที่ ก (Rinaudo and Domard, 1989) ซึ่งไคโตแซนในสภาวะนี้สามารถเกิดพันธะไอออนิกกับประจุลบ

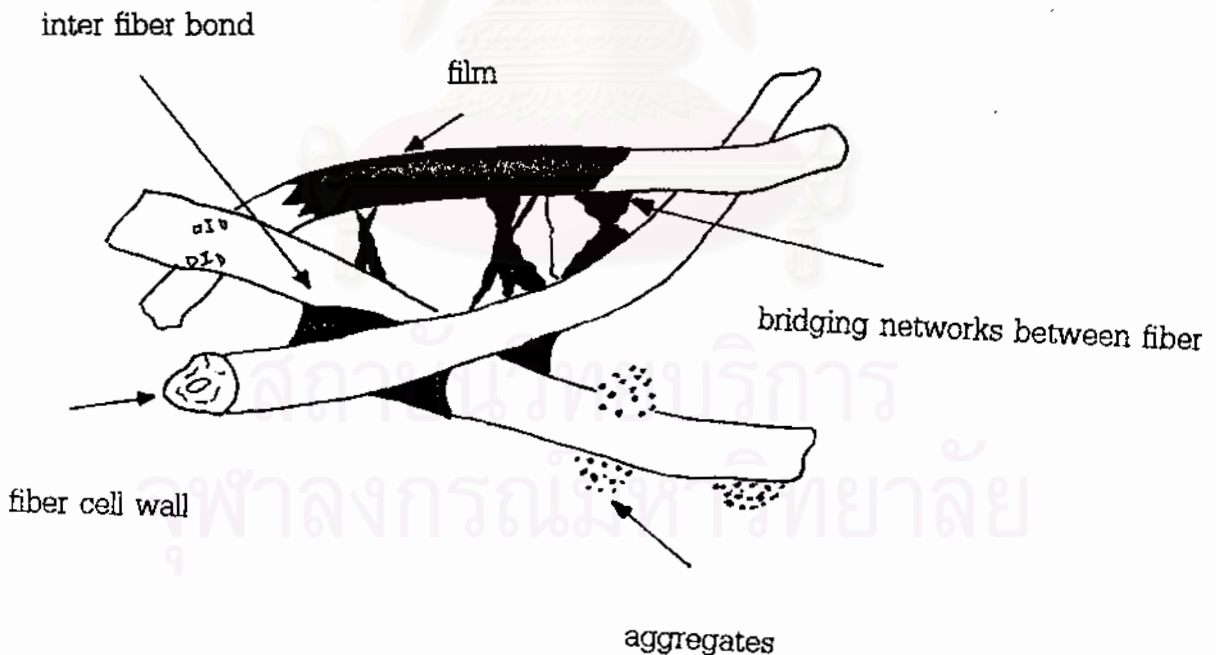


ของผิวหน้าเส้นใย ส่งผลให้ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น ส่วนในสภาวะที่เป็นด่างพบว่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบสูงกว่าในสภาวะที่เป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มในสภาวะที่เป็นด่างในช่วงแรกจะต้องเติมไคโตแซนลงในน้ำเยื่อที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า (ไคโตแซนละลายได้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.3) ทำให้ไคโตแซนสามารถสร้างพันธะไอออนิกกับเส้นใยได้ ในช่วงนี้ และเมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้สูงขึ้นไคโตแซนก็มีโอกาสสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยได้อีก ทำให้ในสภาวะนี้ไคโตแซนสามารถสร้างทั้งพันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยเป็นผลให้ออกาสการสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยมีมากกว่าในสภาวะที่เป็นกรด ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุจึงมีค่ามากกว่าในสภาวะที่เป็นกรด

รัชนีษ์ อัสวเกศมณี และคณะ (2539) ศึกษาการทำแผ่นทดสอบซึ่งมีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้เยื่อใยยาวซัลไฟต์ฟอกขาวผสมไคโตแซนในขั้นตอนการตีเยื่อมาผลิตแผ่นทดสอบในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมไคโตแซนในปริมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งจะให้ค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุมากที่สุด แต่ถ้าเพิ่มปริมาณไคโตแซนมากไปกว่านี้จะทำให้ค่าทั้งสองต่ำลง ซึ่งอธิบายได้ว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเยื่อเป็น 5 นั้นเป็นสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า pKa ของหมู่อะมิโนของไคโตแซน ดังนั้นไคโตแซนจะรับโปรตอนและอยู่ในสภาวะที่มีประจุบวก ซึ่งสามารถเกิดพันธะไอออนิกกับประจุลบของผิวหน้าเส้นใยได้ ทำให้ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุในช่วงแรกเพิ่มขึ้น และค่าดังกล่าวจะเพิ่มมากที่สุดเมื่อเติมไคโตแซนปริมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง เนื่องจากเป็นปริมาณที่ไคโตแซนจะถูกปรับประจุเป็นกลางด้วยตำแหน่งประจุลบของผิวหน้าเส้นใย ถ้าเติมไคโตแซนปริมาณมากกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งจะทำให้มีหมู่อะมิโนของไคโตแซนซึ่งอยู่ในสภาวะที่มีประจุ

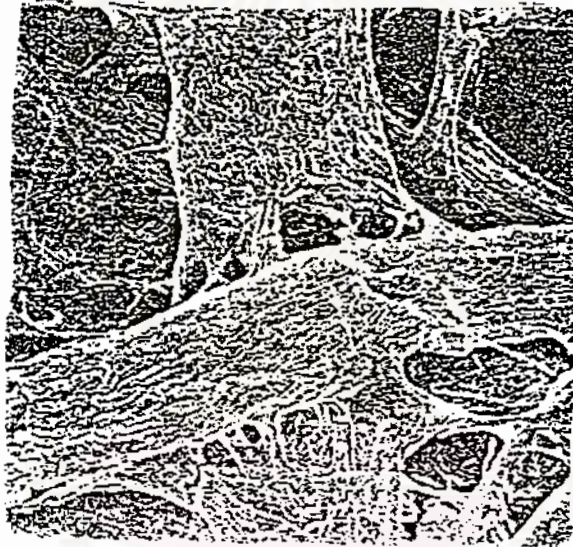
บวกเหลือตกค้างบนแผ่นทดสอบและเกิดการผลึกกันเองระหว่างโมเลกุลของโคโตนเซน เป็นผลให้ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุต่ำลง

Waterhouse (1983) ได้เสนอว่าพอลิเมอร์ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งที่เส้นใยเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน (interfiber bond) และตำแหน่งที่พอลิเมอร์ทำหน้าที่คล้ายสะพานเชื่อมเส้นใย (bridging networks between fiber) ดังแสดงในรูปที่ 11 เป็นตำแหน่งที่พอลิเมอร์สามารถมีผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของเส้นใยมีมากขึ้น และทำให้ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นฟิล์มเคลือบเส้นใย ส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านแรงดึงขาดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์ที่อยู่ในตำแหน่งเหล่านี้จึงสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มได้ แต่พอลิเมอร์ที่เป็นตะกอนขนาดเล็ก (aggregates) ตกอยู่ในบริเวณผิวเส้นใยไม่ส่งผลในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบ



รูปที่ 11 ตำแหน่งของพอลิเมอร์ในโครงสร้างตาข่ายของเส้นใย  
ที่มา : Waterhouse (1983)

Allan, Crosby และ Sarkanen (Muzzarelli, 1977) ได้กล่าวถึงการนำโคโคแซนที่สกัดจากเปลือกปู น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 93,000 ดาลตัน มาทำการฉีดพ่น (spray) ลงบนเยื่อคราฟท์ที่ผ่านขั้นตอนการรีดแผ่นมาแล้ว หลังจากนั้นก็นำมาผ่านขั้นตอนการอัดแผ่น ทำแห้งตามปกติพบว่า ถ้าปริมาณโคโคแซนที่ฉีดพ่นลงบนแผ่นเยื่อน้อยกว่าร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะมองไม่เห็น bridging film ในภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพราะ bridging film จะกลมกลืนกับผิวหน้าเส้นใยจนแยกไม่ออก แต่ถ้าปริมาณโคโคแซนที่ฉีดพ่นลงบนแผ่นเยื่อมากกว่าร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง จะเริ่มมองเห็น bridging film ในภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 bridging film ของโคโคแซนในแผ่นทดสอบ

ที่มา : Muzzarelli (1977)

### 2.8.2 การปรับปรุงสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้โคโคแซน

Kojiro, Takafumi และ Takaaki (1996) ศึกษาสมบัติการเป็นสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial) ของแผ่นทดสอบที่มีการผสมโคโคแซนในลักษณะต่างๆ เช่น วิธีแรกนำแผ่นทดสอบมาแช่ในสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นทำแห้ง แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปปะติดกับผนังด้านในกล่องใส่ขนมทุกด้าน จากนั้นใส่ขนมญี่ปุ่น 1 กรัม และเก็บกล่องใส่ขนมดังกล่าวที่ 35 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละวันได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณจุลินทรีย์ของขนมในแต่ละวัน

วันที่	ปริมาณจุลินทรีย์ (colony/unit)	
	กล่อง A	กล่อง B
1	$3.8 \times 10^4$	$1.1 \times 10^7$
2	$9.8 \times 10^4$	$4.7 \times 10^7$
3	$1.4 \times 10^5$	$1.0 \times 10^8$

เมื่อ กล่อง A คือกล่องซึ่งหนึ่งด้านในแปะด้วยแผ่นทดสอบที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโคโตแซน  
กล่อง B คือกล่องกระดาษปกติ

ที่มา : Kojiro, Takafumi และ Takeaki (1996)

และต่อมาประยุกต์โดยนำแผ่นทดสอบที่ผ่านการแช่สารละลายโคโตแซนมาทำเป็นกระดาษผิวกล่อง (liner)  
ของกล่องกระดาษลูกฟูกแบบผนังชั้นเดียว (single wall) พบว่ากล่องสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้  
แม้จะวางตั้งกับพื้นก็ตาม

วิธีที่สองคือการเติมโคโตแซนไปในขั้นตอนการตีเยื่อแล้วนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นทดสอบ ซึ่งพบว่าแผ่น  
ทดสอบที่ได้มีสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้เหมือนกัน (Kojiro, Takafumi and Takaaki, 1996)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การทดลอง

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

- 3.1.1 เซลลูโลสจากแบคทีเรียที่คุณภาพไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปบริโภค (บางและนิ่มเกินไป) จากสถาบันอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลส ร้อยละ  $83.98 \pm 0.04$  และเซลลูลูร็อยละ  $16.02 \pm 0.04$  (น้ำหนักแห้ง)
- 3.1.2 ไคโตแซน ที่สกัดมาจากเปลือกกุ้ง (ได้รับอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณคร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) มีร้อยละการขจัดหมู่อะซิดิล  $69.94 \pm 2.41$  น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด 440,000 ดาลตัน และมีความหนืดของสารละลายไคโตแซนร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดอะซิดิกเข้มข้นร้อยละ 1 เป็น  $34.4 \pm 1.5$  มิลลิปาสคาล.วินาที
- 3.1.3 วัสดุที่ใช้เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพกับฟิล์มมีดังนี้ พลาสติก PET หนา 0.012 มิลลิเมตร พลาสติก PVC หนา 0.041 มิลลิเมตร พลาสติก PE หนา 0.060 มิลลิเมตร พลาสติก LLDPE หนา 0.119 มิลลิเมตร
- 3.1.4 น้ำปราศจากไอออน (deionized distilled water)
- 3.1.5 กรดอะซิดิก AR Grade
- 3.1.6 กรดไฮโดรคลอริก AR Grade
- 3.1.7 กรดไนตริก AR Grade
- 3.1.8 เมทานอล AR Grade
- 3.1.9 ซิลเวอร์ไนเตรต AR Grade
- 3.1.10 โซเดียมอะซิเตต AR Grade
- 3.1.11 โซเดียมไฮดรอกไซด์ AR Grade
- 3.1.12 ฟีนอลฟทาลิน AR Grade
- 3.1.13 อะซีโตน AR Grade
- 3.1.14 แคลเซียมคลอไรด์ AR Grade



### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องกระจายเชื้อ (disintegrator, Marvis Engineering Co., Ltd., England)
- 3.2.2 เครื่องกวน (mixer, type EURO-HT D, IKA Laboratechnik)
- 3.2.3 เครื่องอัดแผ่นฟิล์ม (sheet press, Toyo Seiki Seisakusho, Tokyo, Japan)
- 3.2.4 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Model DVII + Viscometer)
- 3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Sartorius MC1 Analytic AC 2105)
- 3.2.6 เครื่องวัดความหนา (micrometer, Lorentzen & Wettre Co., Ltd., Stock Holm, Sweden)
- 3.2.7 เครื่องวัดความต้านแรงดึง (tensile strength tester, Lorentzen & Wettre)
- 3.2.8 เครื่องวัดความต้านแรงดันทะลุ (auto burst tester, tmi Monitor/ Burst-200 Model 13-09, Testing Machine Co., Ltd., New York, U.S.A.)
- 3.2.9 เครื่องวัดความต้านแรงฉีกขาด (elemendorf tearing tester, tmi Monitor/Tear Model 83-11-00, Testing Machine Inc., Amityville., New York, U.S.A.)
- 3.2.10 เครื่องวัดสี (Elrepho 2000 datacolor)
- 3.2.11 เครื่องวัดการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน (gas permeability tester, GDP-C, Serial No. 145, Brugger, New York, U.S.A.)
- 3.2.12 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (EA1110 CHNS-O CE Instruments)
- 3.2.13 เครื่องฉาบทอง (quick auto coater, JEOL JFC-1500 Ion Sputtering Device)
- 3.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JSM-5310LV Scanning Microscope, JEOL)

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย โดยวิธีที่ได้ดัดแปลงมาจากวิธี Tadao, Takafumi และ Minoru (1995) (ภาคผนวก ข)

#### 3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทั่วไปของไคโตแซน

สมบัติทั่วไปของไคโตแซนที่วิเคราะห์ได้แก่ ร้อยละการขจัดหมู่อะซิดิลตามวิธี Hayes (1978) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ตามวิธี Wang และคณะ (1991) และสมบัติทางด้านความหนืด ตามวิธี ประเวศ วิเศษภู่วัฒนกุล (2535) (ภาคผนวก ข)

### 3.3.3 ผลิตฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซน

#### 3.3.3.1 การทำเซลล์โลสจากแบคทีเรียให้บริสุทธิ์

นำแผ่นเซลล์โลสจากแบคทีเรียล้างน้ำสองครั้ง แล้วต้มในน้ำเดือดโดยใช้อัตราส่วน เซลล์โลสจากแบคทีเรียต่อน้ำเป็น 1: 1 (W/V) นาน 30 นาที (อย่างต่ำ 2 ครั้ง) จนกระทั่งน้ำที่ต้มมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง แخذเซลล์โลสจากแบคทีเรียในน้ำจนกระทั่งเย็น แล้วนำเซลล์โลสจากแบคทีเรียที่ได้มาผสมกับน้ำในอัตราส่วนเซลล์โลสจากแบคทีเรียต่อน้ำเป็น 1:2 (W/V) แล้วนำไปกระจายเยื่อด้วยเครื่องกระจายเยื่อ (รูปที่ จ.1 ในภาคผนวก จ) ที่ 10,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปกรองแยกเซลล์โลสออกจากน้ำและนำเซลล์โลสจากแบคทีเรียที่ได้มาต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยใช้อัตราส่วนเซลล์โลสจากแบคทีเรียต่อค่าเป็น 1:10 (W/V) ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง

#### 3.3.3.2 เตรียมสารละลายโคโคแซน

เตรียมสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 2 แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 3.3.3.3 เตรียมสารแขวนลอยผสมเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซน

ผสมเซลล์โลสจากแบคทีเรีย 14 กรัม (น้ำหนักแห้ง) กับน้ำปราศจากไอออน (deionized distilled water) 2 ลิตร กระจายเยื่อด้วยเครื่องกระจายเยื่อที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เรียกสารแขวนลอยที่ได้ว่าน้ำเยื่อ จากนั้นเพิ่มความเป็นกรดของน้ำเยื่อด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเยื่อเป็น 4.5 หลังจากนั้นดวงสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 2 ปริมาตรต่างๆ กันลงในน้ำเยื่อเพื่อให้ได้ปริมาณโคโคแซนในช่วงร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวน (รูปที่ จ.2 ในภาคผนวก จ) ที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เรียกสารแขวนลอยที่ได้ว่าสารแขวนลอยผสม

#### 3.3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์ม

ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 โมลาร์และกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ จนกระทั่งความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมมีค่า 4.5, 7.0 หรือ 10.0 หลังจากนั้นเจือจางสารแขวนลอยผสมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.15 (W/V) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามความต้องการอีกครั้งด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 โมลาร์ จากนั้นกวนและดวงสารแขวนลอยผสมเพื่อขึ้นรูปฟิล์มให้น้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัมต่อตารางเมตร โดยเทสารแขวนลอยผสมลงบนเครื่องทำแผ่นมาตรฐานซึ่งประกอบด้วยตะแกรงที่มีขนาดรูตะแกรง 150 เมช

(meshes) และมีพื้นที่ 200 ตารางเซนติเมตรติดตั้งอยู่ที่พื้นห้องขึ้นรูปแผ่นทดสอบ (รูปที่ จ.3 ในภาคผนวก จ) เมื่อเย็บเป็นแผ่นฟิล์มบนตะแกรงแล้ว วางผ้าตามด้วยกระดาษซับ 5 แผ่นทับลงบนแผ่นฟิล์มเปียกแล้วใช้แท่งน้ำหนัก (รูปที่ จ.4 ในภาคผนวก จ) (couch roll) ซึ่งหนัก 13 กิโลกรัม กลิ้งทับกลับไปมา 5 รอบ แผ่นฟิล์มเปียกจะติดอยู่บนผ้า จากนั้นนำแผ่นโลหะกลมพื้นที่ 200 ตารางเซนติเมตร ทับด้านที่เหลือของแผ่นฟิล์มแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัด (รูปที่ จ.5 ในภาคผนวก จ) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.51 เซนติเมตร โดยใช้ความดัน 0.37 เมกกะปาสคาล นาน 2.5 นาที ยึดแผ่นฟิล์มที่ได้กับกรอบแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 12 ชั่วโมง (รูปที่ จ.6 ในภาคผนวก จ) เรียกแผ่นที่ได้ว่าแผ่นฟิล์ม

อนึ่งที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0 โคลิโคแซนบางส่วนได้ตกตะกอน ฉะนั้นก่อนที่จะเจือจางสารแขวนลอยผสมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรนั้นจึงได้กวนสารแขวนลอยผสมที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

### 3.3.4 วิเคราะห์ปริมาณโคลิโคแซนในแผ่นฟิล์ม

วิเคราะห์ปริมาณโคลิโคแซนในแผ่นฟิล์มโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (EA1110 CHNS-O CE Instruments) (ภาคผนวก ง)

### 3.3.5 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

นำฟิล์มจากข้อ 3.3.3 มาปรับสภาวะที่อุณหภูมิ  $27 \pm 1$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $65 \pm 2$  เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้

#### 3.3.5.1 สมบัติพื้นฐาน

- น้ำหนักมาตรฐาน ตามวิธี ISO 536 (1976) (ภาคผนวก ค)
- ความหนา ตามวิธี ISO 534 (1988) (ภาคผนวก ค)
- ความหนาแน่นปรากฏ ตามวิธี ISO 534 (1988) (ภาคผนวก ค)

#### 3.3.5.2 สมบัติเชิงกล

- ยิงส์โมดูลัส ตามวิธี ISO 1924/2 (1994) (ภาคผนวก ค)
- ความยืด ตามวิธี ISO 1924/2 (1994) (ภาคผนวก ค)
- ดัชนีความต้านแรงดึง ตามวิธี ISO 1924/2 (1994) (ภาคผนวก ค)
- ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ตามวิธี ISO 2758 (1983) (ภาคผนวก ค)
- ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ตามวิธี ISO 1974 (1990) (ภาคผนวก ค)

### 3.3.5.3 สมบัติทางทัศนศาสตร์

- ความขาวสว่าง ตามวิธี ISO 2470 (1971) (ภาคผนวก ค)
- ความทึบแสง ตามวิธี ISO 2471 (1977) (ภาคผนวก ค)

### 3.3.5.4 สมบัติทางด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร

- การซึมผ่านไอน้ำของโพลีเอทิลีน ตามวิธี พัชรี รัตนวรานันท์ และรัชดา สาคตระกูลวัฒนา (2530) (ภาคผนวก ค)
- การซึมผ่านไอน้ำของก้ำซอกซิเจน ตามวิธี ASTM D 1434-82 (1994) (ภาคผนวก ค)

### 3.3.6 ทดสอบสมบัติด้านการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์ม

ปิดฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนลงบนอาหารเลี้ยงเชื้ออีเอ็มบี (EMB) ที่มีเชื้อ *Escherichia coli* แผ่กระจาย (spread) อยู่บนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส และตรวจหาบริเวณที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (clear zone) ที่กระจายปิดทับทุกวัน รวมเป็นเวลา 5 วัน

### 3.3.7 ศึกษาผลของน้ำหนักมาตรฐานต่อปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มและสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยใช้ภาวะการเติมโคโตแซนและค่าความเป็นกรด-ด่างทำให้ฟิล์มที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุดที่สรุปได้จาก 3.3.4 และ 3.3.5 มาศึกษาผลการแปรน้ำหนักมาตรฐานเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 กรัมต่อตารางเมตร ต่อปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มและสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ผลิตได้

### 3.3.8 วิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

นำแผ่นฟิล์มที่ได้จากข้อ 3.3.3 มาวิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยคิดแผ่นฟิล์มที่ต้องการตรวจสอบบนแท่นติดสารตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (microscope stubs) ด้วยเทปกาวสองหน้า แล้วฉาบผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่องฉาบทอง (รูปที่ จ.15 ในภาคผนวก จ)หนา 500 ไมโครเมตร ส่องดูผิวและถ่ายภาพผิวฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ จ.16 ในภาคผนวก จ)

### 3.3.9 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนกับกระดาษพลาสติก และฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียอื่นๆ

เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ผลิตได้กับพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ได้นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยวิธีเดียวกับฟิล์มที่ผลิตได้ในข้อ 3.3.5 (พลาสติก PET พลาสติก PVC พลาสติก PE และพลาสติก LLDPE) และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ผลิตได้กับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียอื่นๆ และกระดาษประเภทต่างๆ โดยนำค่าตัวเลขของฟิล์มและกระดาษชนิดต่างๆ ที่ทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยวิธีเดียวกับฟิล์มผลิตได้มาเปรียบเทียบ (ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (พาสวดี

ประทีปเสนา และสุเมธ ตันตระเชียร, 2539) กระจกยดุง กระจกยผวกล่อง กระจกยรืบค้คราฟค้ (มอก. 170, 2529) กระจกยพืมพ์และเจียน กระจกยออฟเช้ต กระจกยแมนิโฟลค้ กระจกยเอ้มจี กระจกยวาคเจียน (มอก. 287, 2533) กระจกยหนังสือพืมพ์ (มอก. 758, 2531) กระจกยเช้ตปาก (มอก. 240, 2520) กระจกยเช้ตมือ (มอก. 239, 2520) กระจกยเช้ตหน้า (มอก. 215, 2520) และกระจกยช้ระ (มอก. 214, 2520))



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัย คัดแปลงจากวิธีของ Tadao, Takafumi และ Minoru (1995) ทำโดยการนำเซลลูโลส 2 ส่วน ส่วนแรกนำมากำจัดกรดโดยการต้ม ด้วย น้ำและค่านวนน้ำหนักแห้งเป็นน้ำหนักส่วนของเซลล์ร่วมกับเซลลูโลสส่วนที่สองนำมากำจัดกรดและต้ม ด้วย ค่างค่อเพื่อกำจัดส่วนของเซลล์ รวมทั้งสารภายในเซลล์และสิ่งทีแบคทีเรียสร้างขึ้นซึ่งอยู่ใน โครงร่างตาข่าย ของ เซลลูโลสออกไปกับค่าง แล้วจึงค่านวนน้ำหนักแห้งเป็นน้ำหนักของเซลลูโลส และน้ำหนักส่วนของเซลล์ แบคทีเรียหาได้จากเอาน้ำหนักในส่วนแรกลบด้วยน้ำหนักในส่วนที่สอง จากการทดลองพบว่าเซลลูโลสที่ ใช้ในงานวิจัยมีส่วนของเซลล์เป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ  $16.02 \pm 0.04$  (ตารางที่ 3) ทั้งนี้เพราะเซลลูโลสที่ สังเคราะห์ขึ้นจะอยู่ข้างนอกเซลล์แบคทีเรียและเกิดเป็นลักษณะตาข่ายรอบๆ เซลล์แบคทีเรียที่สร้างเซลลูโลส นั้นๆ ขึ้นมา (Haigler and Benziman, 1982)

เนื่องจากส่วนของเซลล์แบคทีเรียที่หลงเหลืออยู่อาจมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มและการนำฟิล์มมาใช้ใน ผลิตภัณฑ์บางประเภทเช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และเครื่องอุปโภคเพื่อสุขภาพต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึง มีขั้นตอนการกำจัดส่วนของเซลล์แบคทีเรียก่อนจะนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์ม โดยการนำเซลลูโลสผ่านขั้นตอน การกระจายเชื้อเพื่อทำให้เซลล์แตก และทำให้เซลล์หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ หลุดออกจากโครงร่างตาข่ายของ เซลลูโลส แล้วนำเซลลูโลสที่ได้มาต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ขั้นตอนนั้นนอกจากจะ ทำให้สารภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วย โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตละลายออกมากับสารละลายค่างได้ แล้วยังทำ ให้เกิดสะปอนนิฟิเคชันของไขมันได้เกลือของไขมัน (Meyer, 1960) และทำให้เถ้าต่างๆ เช่น สารประกอบ ฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์แบคทีเรียถูกกำจัดออกไปด้วย (Cannon ตารางที่ 3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (dry basis)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
เซลลูโลส	$83.98 \pm 0.04$
ส่วนของเซลล์แบคทีเรีย	$16.02 \pm 0.04$

And Anderson, 1991; Yamanaka et al., 1989; Savidge and Colvin, 1985) การกำจัดสิ่งเจือปนเหล่านี้เป็นการจำกัดสิ่งกีดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลส มีผลให้โอกาสการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การแช่เซลลูโลสในสารละลายต่างยังทำให้เกิดการพองตัวของโครงสร้างตาข่ายของเซลลูโลสและทำให้เซลลูโลส I ในธรรมชาติถูกเปลี่ยนเป็นเซลลูโลส II ซึ่งมีความเสถียรมากขึ้นและทำให้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสมีมากขึ้น (Krassig, 1985) การที่พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงด้านสมบัติเชิงกลของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นด้วย

#### 4.2 สมบัติทั่วไปของไคโตแซน

จากการนำไคโตแซนที่ใช้ในงานวิจัยมาวิเคราะห์ร้อยละการจัดหมู่อะซิดิลโดยการไตเตรตหาปริมาณหมู่โมโนเมอร์ที่มีหมู่  $\text{NH}_2$  อิสระ ตามวิธีของ Hayes (1978) วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืดตามวิธีของ Wang และคณะ (1991) และวิเคราะห์หาสมบัติด้านความหนืด ตามวิธี ประเวศ วิเศษภูฏติกุล (2535) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4 พบว่าสมบัติของไคโตแซนซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด 440,000 ดาลตัน และมีความหนืดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 อยู่ในช่วงค่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.4 มิลลิปาสคาล.วินาที จึงเป็นสมบัติที่คาดได้ว่ามีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุคัปที่ใช้ในการวิจัยซึ่งส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้มีที่มีการแปรความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่า  $\text{pKa}$  ของหมู่อะมิโนอิสระของไคโตแซน ความหนืดของสารละลายไคโตแซนในช่วงที่ไม่สูงจนเกินไป จึงคาดว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มในลักษณะการใช้แรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อแยก (drain) น้ำออกจากเยื่อเซลลูโลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และในด้านร้อยละการจัดหมู่อะซิดิลอยู่ในช่วง 69.94 แสดงว่าสารดังกล่าวนี้เป็นไคโตแซน (Muzzarelli, 1985)

ตารางที่ 4 สมบัติทั่วไปของไคโตแซน

สมบัติ	ไคโตแซน
ร้อยละการจัดหมู่อะซิดิล	69.94 ± 2.41
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด (ดาลตัน)	440,000
ความหนืดของสารละลายไคโตแซนเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดอะซิดิกเข้มข้นร้อยละ 1 (มิลลิปาสคาล.วินาที)	34.4 ± 1.5

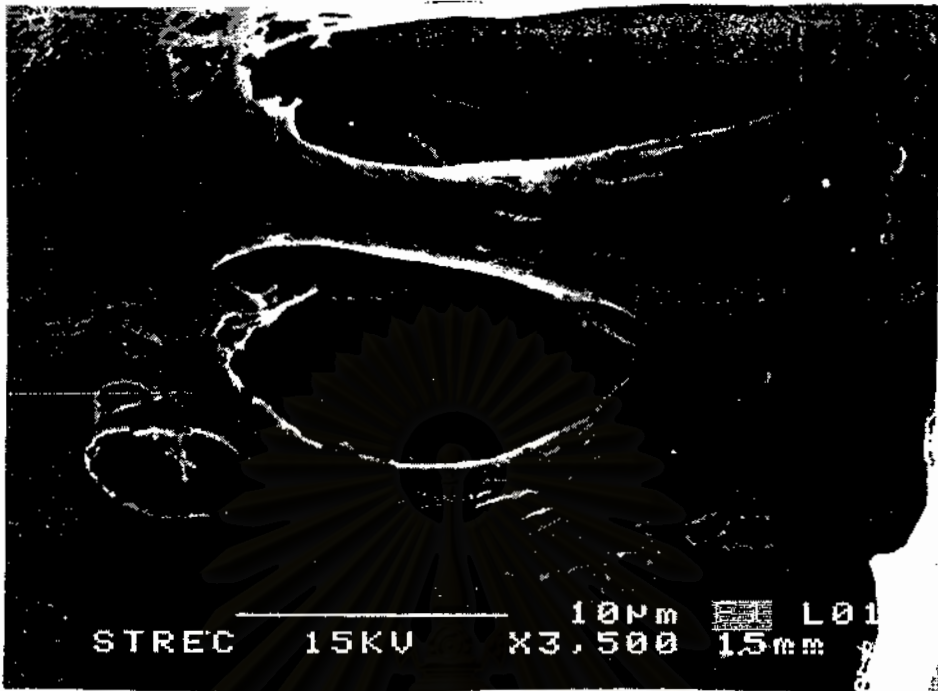
### 4.3 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

จากผลการแปรค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณ ไคโตเซนที่ผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ที่น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์ม 30 กรัมต่อตารางเมตร โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 แปรปริมาณไคโตเซนเป็นร้อยละ 0, 2 และ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 แปรปริมาณไคโตเซนเป็นร้อยละ 0, 4, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 แปรปริมาณไคโตเซนเป็นร้อยละ 0, 2, 4, 6, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง พบว่า

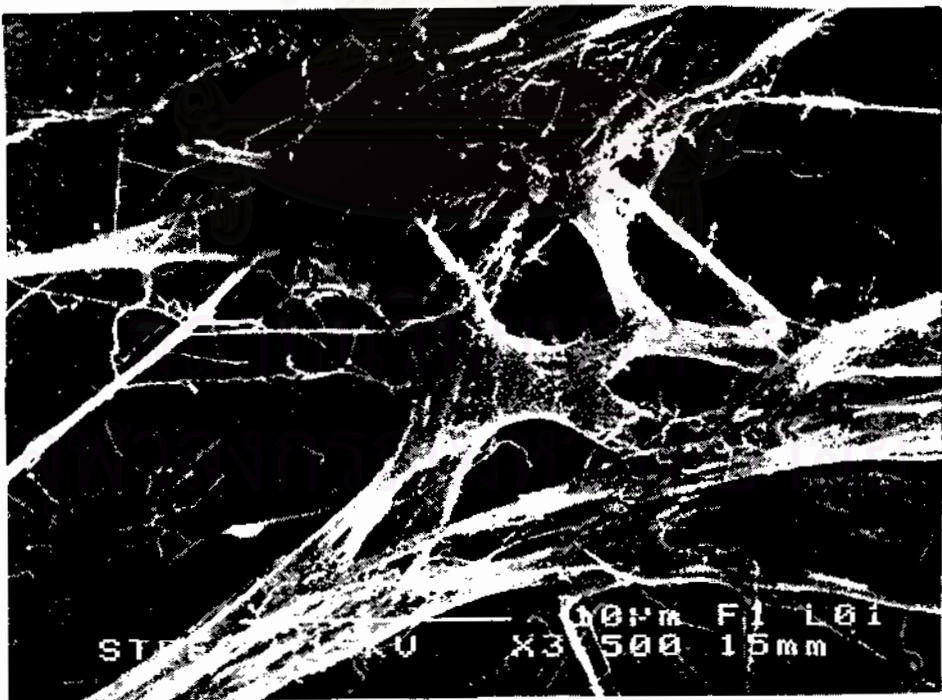
ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 พบว่าการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไม่สามารถทำได้เมื่อระดับปริมาณไคโตเซนที่ผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีเกินกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ทั้งนี้เพราะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมมีค่าน้อยกว่าค่า  $pK_a$  ของหมู่อะมิโนอิสระของไคโตเซน ( $pK_a \approx 6.3$ ) ไคโตเซนจะอยู่ในรูปของพอลิแคทไอออน (polycation) ดังสมการ ก จึงสามารถละลายในสารแขวนลอยผสมได้และทำให้สารแขวนลอยผสมมีความหนืดระดับหนึ่ง และเมื่อเพิ่มระดับปริมาณไคโตเซนที่ผสมในกระบวนการผลิต ความหนืดของสารแขวนลอยผสมจะเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถปล่อยน้ำออกจากตะแกรงในขณะขึ้นรูปได้ และเมื่อนำแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้จากสภาวะนี้มาวิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่าฟิล์มซึ่งมีการผสมไคโตเซนในการผลิต (รูปที่ 13 และ 14) จะให้ลักษณะปรากฏที่แตกต่างจากฟิล์มที่ไม่ได้ผสมไคโตเซนในการผลิต (รูปที่ 15) กล่าวคือมีร่างแหหรือลักษณะของชั้นฟิล์มบางๆ อยู่บนพื้นผิวซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่พบในรูปที่ 15 จึงคาดว่าร่างแหหรือชั้นฟิล์มบางๆ ดังกล่าวน่าที่จะเป็นไคโตเซนหรือของผสมระหว่างไคโตเซนกับไมโครไฟบริลซึ่งละลายในสารแขวนลอยผสมในสภาวะการผลิตนี้ และเมื่อผ่านขั้นตอนการทำแห้งแล้วได้ก่อตัวลักษณะคล้ายร่างแหหรือชั้นฟิล์มบางๆ ขึ้นปกคลุมทั่วแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปได้

ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 พบว่าการขึ้นรูปสามารถทำได้ทุกระดับการเติมไคโตเซน เนื่องจากที่สภาวะการผลิตนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมมีค่าใกล้เคียงกับ  $pK_a$  ของหมู่อะมิโนอิสระของไคโตเซน ( $pK_a \approx 6.3$ ) Rinaudo และ Domard (1989) กล่าวว่าไคโตเซนจะเปลี่ยนรูปจากพอลิแคทไอออนไปเป็นรูปที่ไม่มีประจุและตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนของไคโตเซนในสภาวะนี้จะไม่เสถียรโดยจะตกตะกอนมากกว่าร้อยละ 50 แต่การตกตะกอนจะเป็นเท่าไรนั้นขึ้นกับโครงสร้างการเรียงตัวของ glucosamine และ N-acetyl glucosamine ในโครงสร้างไคโตเซน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่าไคโตเซนส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (คือตกตะกอน) และไคโตเซนส่วนที่เหลืออยู่ในรูปที่เป็นพอลิแคทไอออนซึ่งละลายได้ การที่ไคโตเซนตกตะกอนนั้นไม่ได้ทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยผสมเพิ่มขึ้น เปลี่ยนรูปจากพอลิแคทไอออนไปเป็นรูปที่ไม่มีประจุและตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนของไคโตเซนในสภาวะนี้

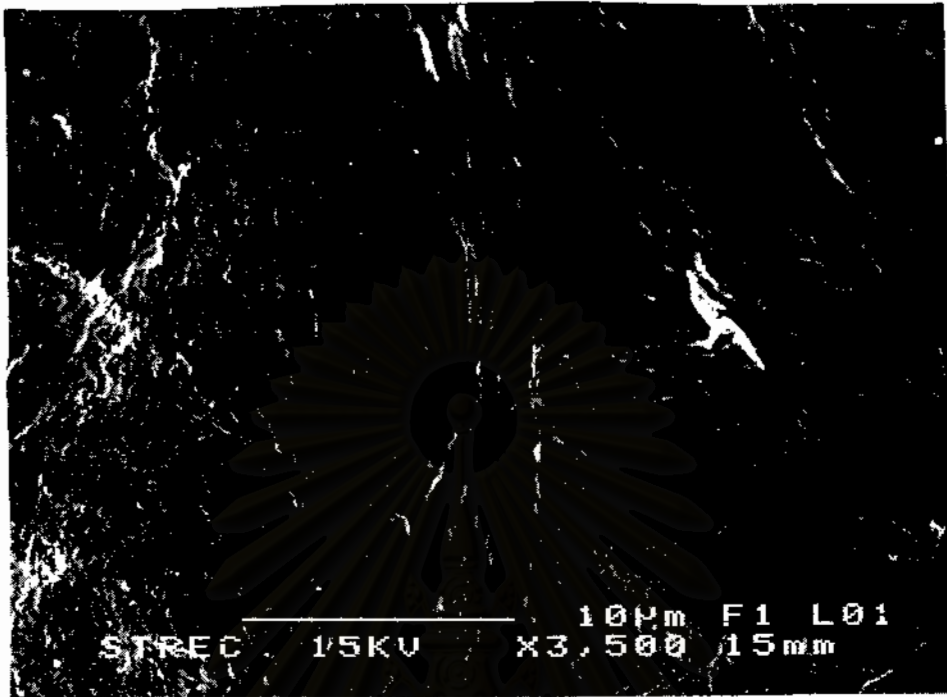




รูปที่ 13 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตรที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



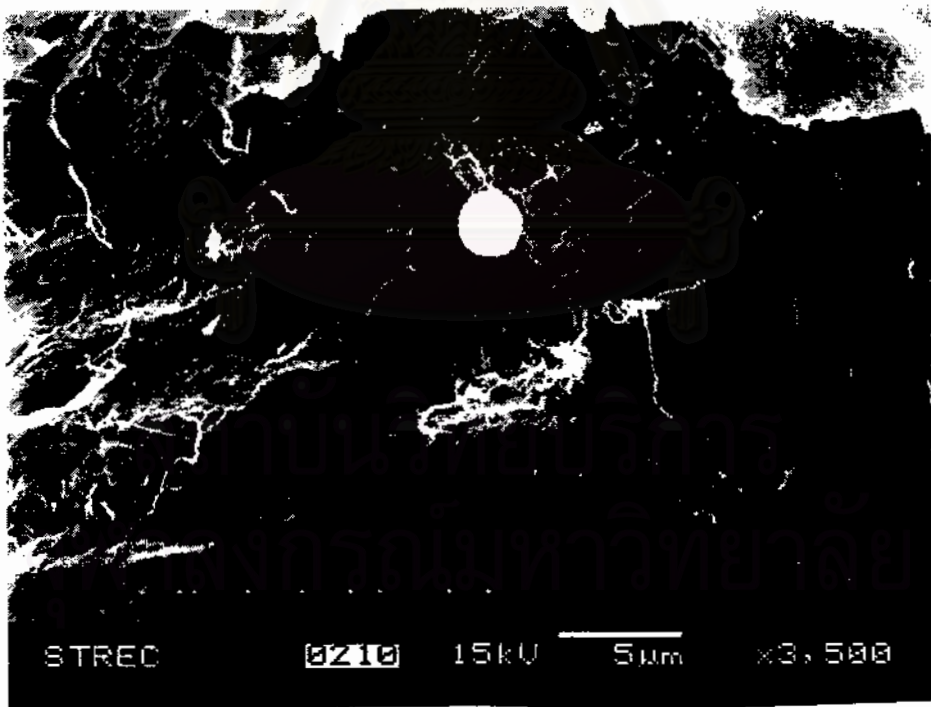
รูปที่ 14 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตรที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



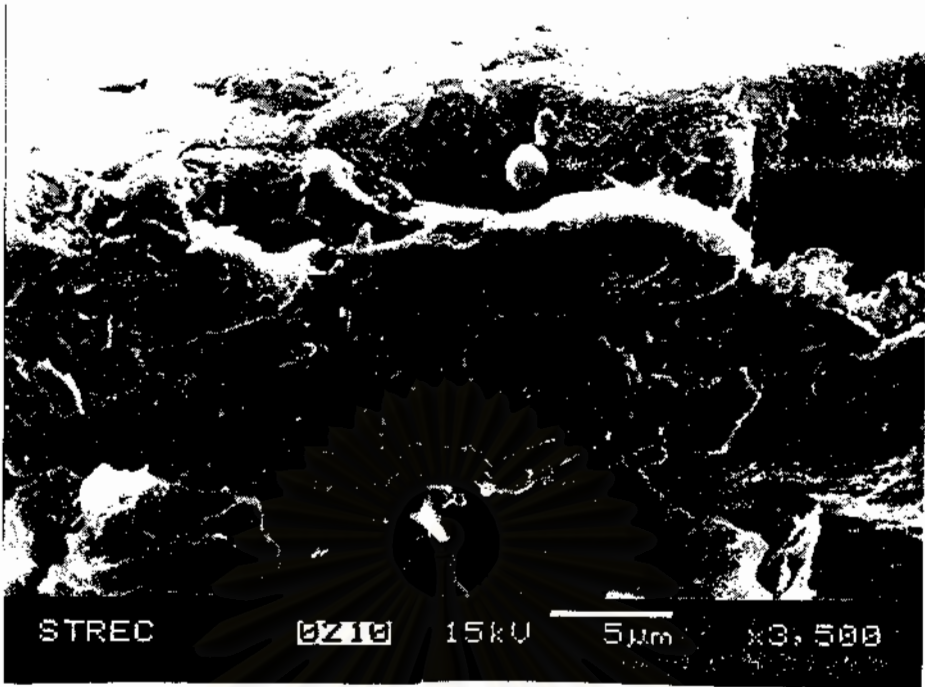
รูปที่ 15 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

จะไม่เสถียรโดยจะตกตะกอนมากกว่าร้อยละ 50 แต่การตกตะกอนจะเป็นเท่าไรนั้นขึ้นกับโครงสร้างการเรียงตัวของ glucosamine และ N-acetyl glucosamine ในโครงสร้างโคโตแซน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่าโคโตแซนส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (คือตกตะกอน) และโคโตแซนส่วนที่เหลืออยู่ในรูปที่เป็นพอลิแคทไอออนซึ่งละลายได้ การที่โคโตแซนตกตะกอนนั้นไม่ได้ทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยผสมเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีกรรมผสมโคโตแซน การปล่อยน้ำออกจากตะแกรงในขณะขึ้นรูปจึงง่ายเช่นเดียวกับการขึ้นรูปฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกันที่ไม่ได้มีการผสมโคโตแซน ประกอบกับโคโตแซนในรูปของพอลิแคทไอออนมีอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าสภาวะการขึ้นรูปที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 มาก จึงพบว่าการเพิ่มระดับปริมาณโคโตแซนที่ผสมลงในการผลิตแผ่นฟิล์มไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูป เมื่อนำฟิล์มที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่าฟิล์มซึ่งผสมโคโตแซนในการผลิต (รูปที่ 16, 17 และ 18) มีอนุภาคทรงกลมปรากฏอยู่ในขณะที่ฟิล์มซึ่งไม่ได้ผสมโคโตแซน (รูปที่ 19) ไม่มีอนุภาคทรงกลมปรากฏอยู่เลย แต่ในรูปที่ 17 นอกจากอนุภาคทรงกลมแล้วพบว่ามีอนุภาครูปร่างเป็นเกล็ด (flake) ด้วย ซึ่งแตกต่างจากภาพฟิล์มซึ่งไม่ได้ผสมโคโตแซนในการผลิต อย่างไรก็ตามลักษณะเกล็ดเช่นนี้ก็ปรากฏในรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแผ่นฟิล์มซึ่งไม่มีโคโตแซนผสมที่จะเสนอต่อไปในรูปที่ 24B จึงสันนิษฐานได้ว่าโคโตแซนเมื่อหมดประจุจะหดรัดตัวทุกทิศทุกทางเท่ากันเป็นอนุภาคทรงกลม ซึ่งอนุภาคทรงกลมดังกล่าวก็คือตะกอนโคโตแซน ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวไว้ตอนต้นว่าในสภาวะนี้

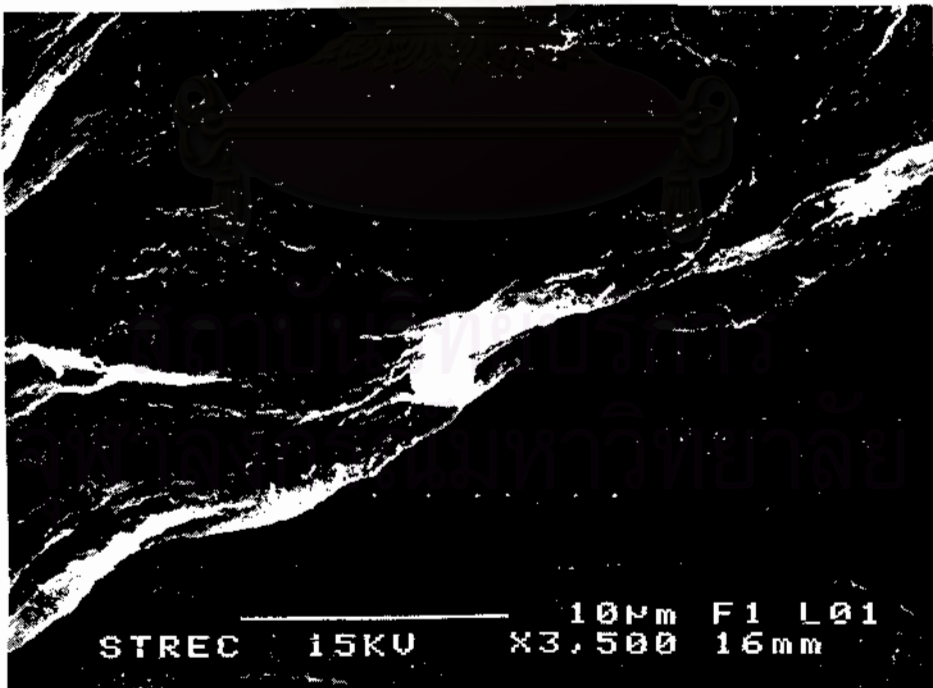
โคโตะแซนตกตะกอน และเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคทรงกลม (ตะกอน) ของฟิล์มในสภาวะการผลิตนี้ที่ ปริมาณการเติมโคโตะแซนต่างกันพบว่า ขนาดของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเติมโคโตะแซน ทั้งนี้เนื่องจากการตกตะกอนของโคโตะแซนไม่เสถียรดังที่ Rinaudo และ Domard (1989) กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ยังมีโคโตะแซนบางส่วนที่อยู่ในสภาพพอลิแคทไอออน ดังเช่นที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ด้วย แต่จากรูปที่ 16, 17 และ 18 ไม่ปรากฏลักษณะร่างแหหรือชั้นฟิล์มบางๆ อยู่บนพื้นผิว อาจเนื่องมาจาก โคโตะแซนที่อยู่ในสภาพพอลิแคทไอออน และสามารถละลายอยู่ในสารแขวนลอยผสมได้น่าจะอยู่ในสภาพที่เจือจางมากเมื่อแห้งจึงไม่พบลักษณะร่างแหดังกล่าว



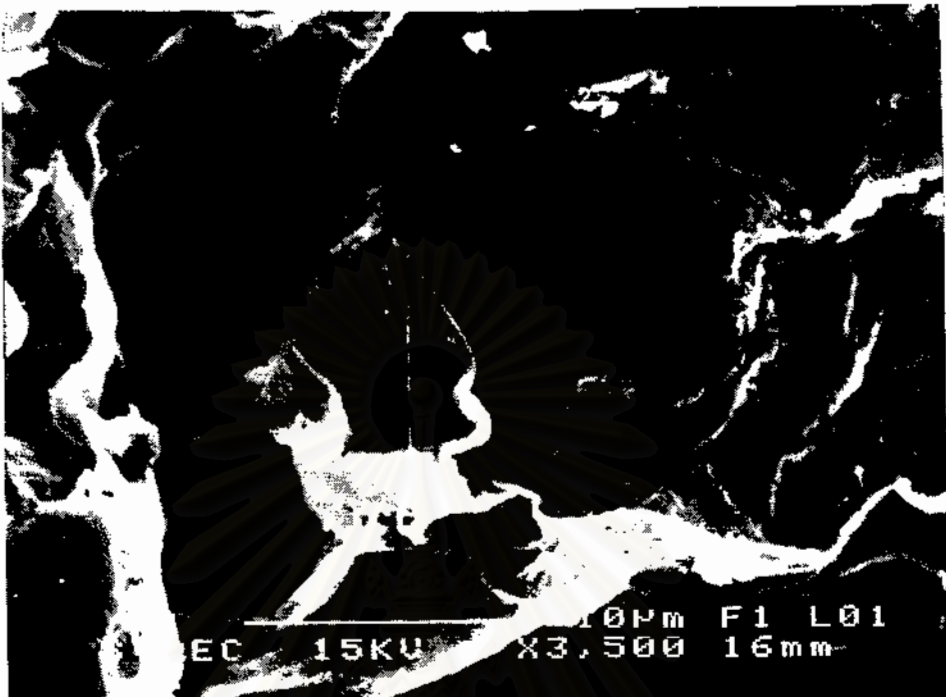
รูปที่ 16 ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตะแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมโคโตะแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



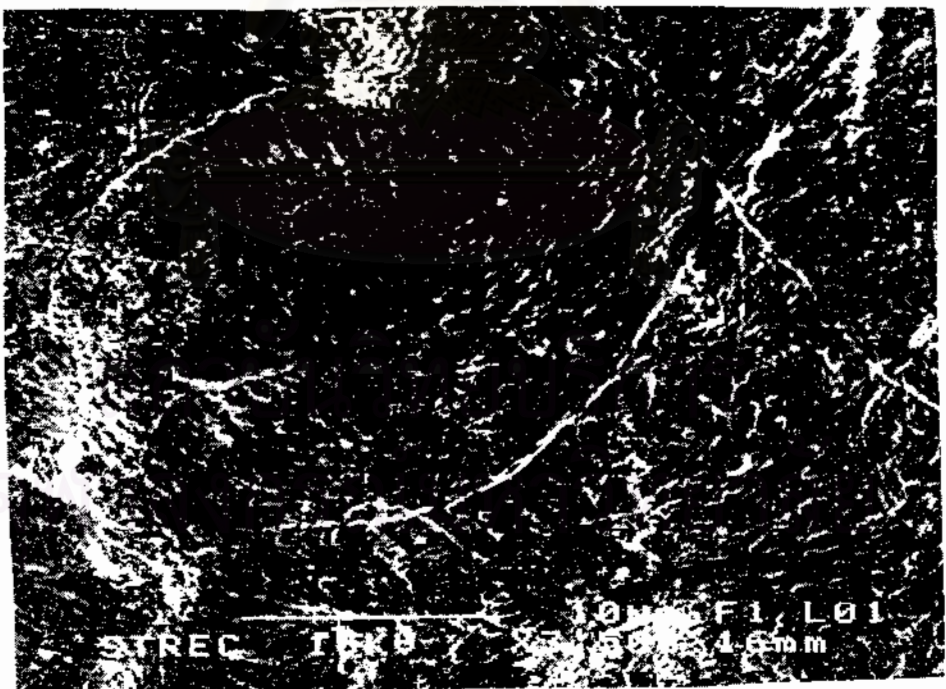
รูปที่ 17 ภาพตัดขวางของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมโคโคแซนที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 18 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ระดับการเติมโคโคแซนที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 19A



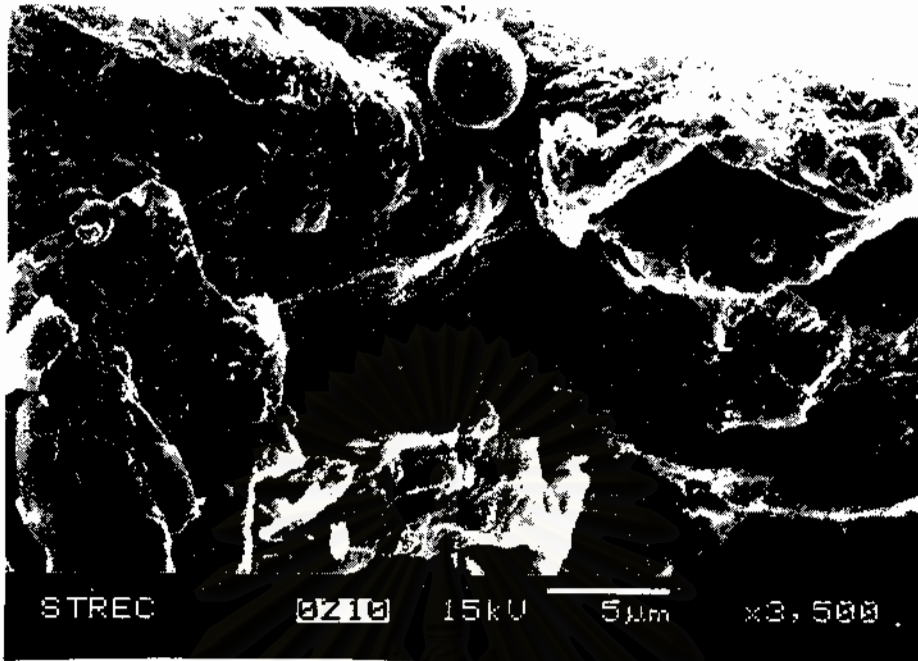
รูปที่ 19B

รูปที่ 19 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความ เป็นกรด-ด่าง 7.0 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 การขึ้นรูปจะง่ายเหมือนกับการผลิตฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมในสภาวะการผลิตนี้มีค่ามากกว่าค่า  $pK_a$  ของหมู่อะมิโนอิสระของโคโตแซน ( $pK_a \approx 6.3$ ) มาก โคโตแซนอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ จึงตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ การปล่อยน้ำในช่วงขึ้นรูปฟิล์มจึงทำได้ง่าย และเมื่อคิกซารูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่มีปริมาณโคโตแซนผสม (รูปที่ 20, 21, 22 และ 23) กับฟิล์มที่ไม่มีโคโตแซนผสม (รูปที่ 24) พบว่ามีอนุภาคทรงกลมปรากฏเด่นชัดอยู่ในฟิล์มซึ่งมีการผสมโคโตแซน ทั้งนี้เพราะการผลิตฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสมมากกว่าค่า  $pK_a$  มาก ประกอบกับโคโตแซนซึ่งเติมลงในกระบวนการผลิตเป็นโคโตแซนชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดต่ำ และโคโตแซนที่เติมอยู่ในรูปของสารละลายโคโตแซนที่เจือจางซึ่งมีความเข้มข้นเพียงร้อยละ 0.5 ทำให้โคโตแซนในสารแขวนลอยผสมหมดประจุโดยสมบูรณ์ ทำให้สายโคโตแซนต่างๆ หดตัวทุกทิศทางเท่ากันเป็นอนุภาคทรงกลม นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคทรงกลมดังกล่าวในสภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 มีขนาดโดยรวม (ทุกระดับการผสมโคโตแซน) ใหญ่กว่าที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 ทั้งนี้เนื่องมาจากเหตุผลดังเช่นที่ Rinaudo และ Domard (1989) อธิบายไว้ข้างต้นว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 โคโตแซนมีอยู่ในรูปพอลิแคทไอออนและในรูปที่ไม่มีประจุ การตกตะกอนโคโตแซนที่สภาวะนี้จึงไม่เสถียร ทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดเล็ก ในขณะที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 โคโตแซนอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุอย่างสมบูรณ์ สายของโคโตแซนจึงรวมตัวกันตกตะกอนได้เป็นตะกอนที่ใหญ่กว่า และนอกจากนี้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ยังพบว่าเมื่อระดับปริมาณโคโตแซนที่ผสมลงในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้น อนุภาคทรงกลมมีขนาดใหญ่อขึ้นด้วยเพราะโอกาสในการรวมตัวกันของสายโคโตแซนที่จะตกตะกอนมีมากขึ้น เมื่อปริมาณโคโตแซนในสารแขวนลอยผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อระดับปริมาณโคโตแซนที่ผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียเกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งขนาดอนุภาคโคโตแซนจะเปลี่ยนไปโดยมีขนาดใหญ่อขึ้นมาก

#### 4.4 ปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์ม

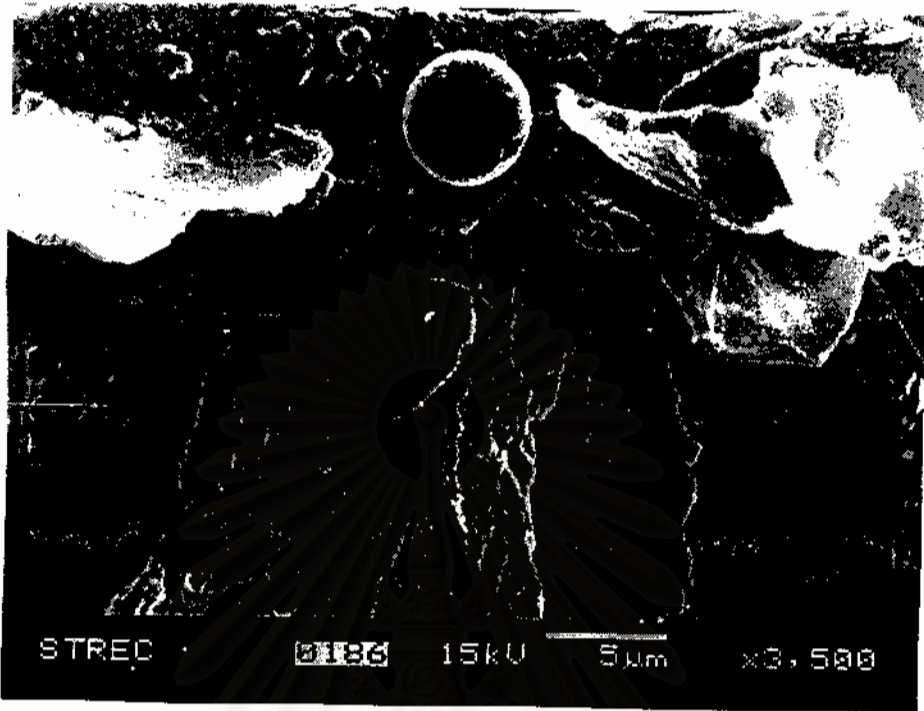
เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มซึ่งทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และ ออกซิเจน โดยวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในแผ่นฟิล์มแล้วคำนวณกลับเป็นปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์ม ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างและระดับปริมาณโคโตแซนเช่นเดียวกับข้อ 4.3 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 25 พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 มีแนวโน้มว่าเมื่อระดับปริมาณโคโตแซนที่เติมลงในกระบวนการผลิตสูงขึ้น จะมีปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความหนืดของสารแขวนลอยผสมที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลของน้ำและสารละลายโคโตแซนผ่านเยื่อเซลลูโลสขณะขึ้นรูปต่ำลง ส่งผลให้แรงเฉือนของน้ำและสารละลายโคโตแซนผ่านโครงร่างตาข่ายของเยื่อเซลลูโลสลดลงด้วย โคโตแซนจึงสามารถยึดเกาะอยู่ในเส้นใยได้มากขึ้น



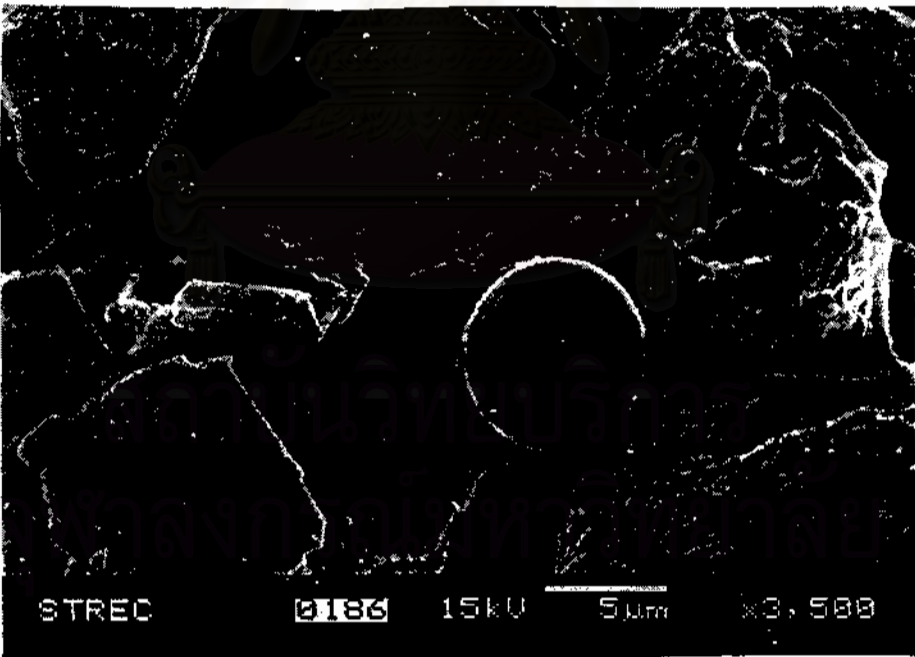
รูปที่ 20 ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 21 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 22A



รูปที่ 22B

รูปที่ 22 ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแมคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

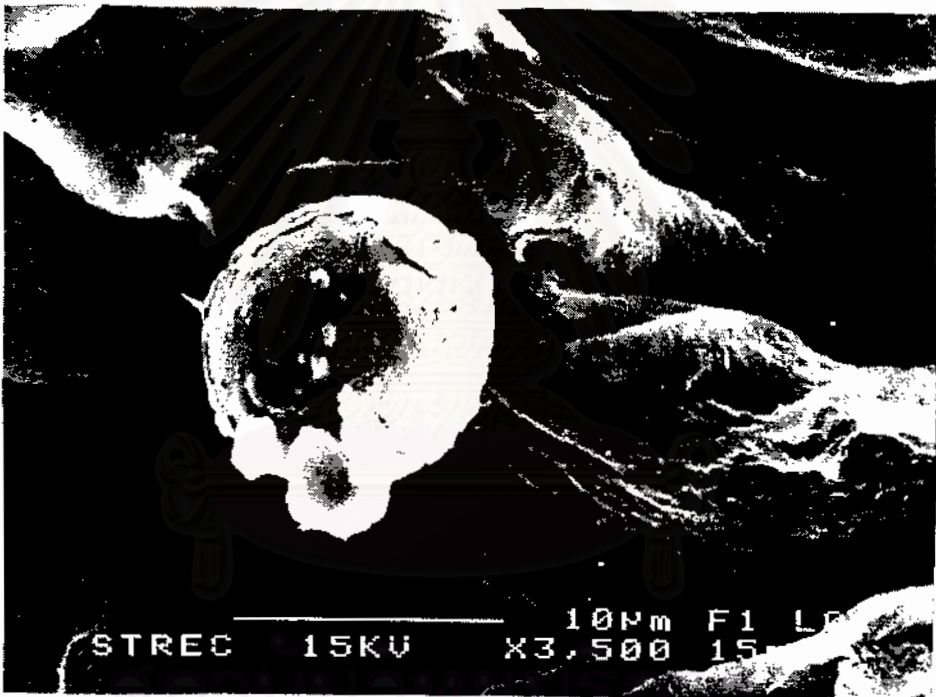




รูปที่ 23A

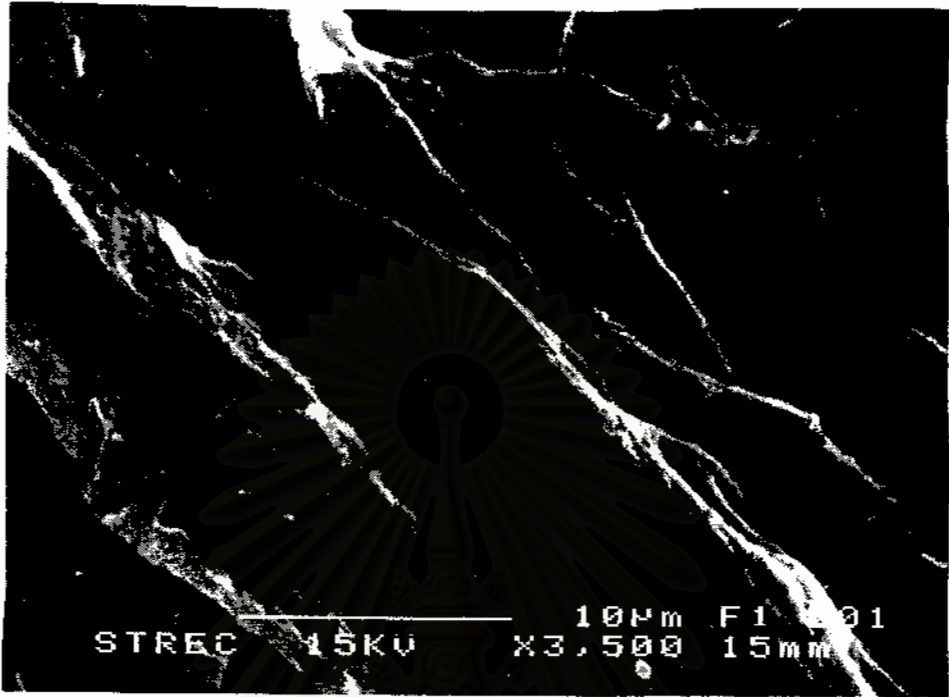


รูปที่ 23B



รูปที่ 23C

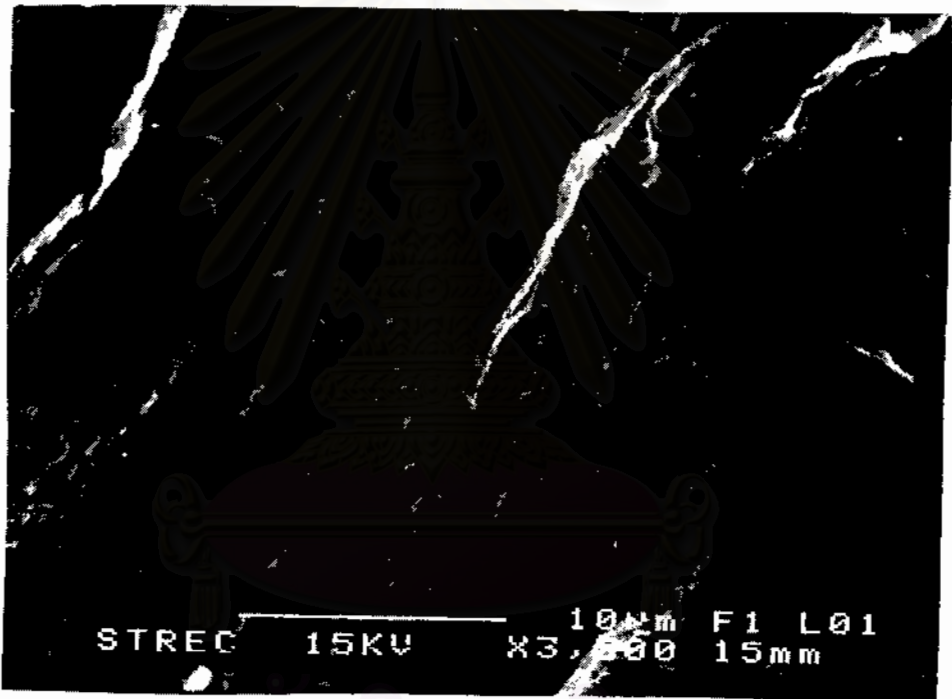
รูปที่ 23 ภาพพื้นผิวฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 ระดับการเติมโคโตแซนที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 24A



รูปที่ 24B

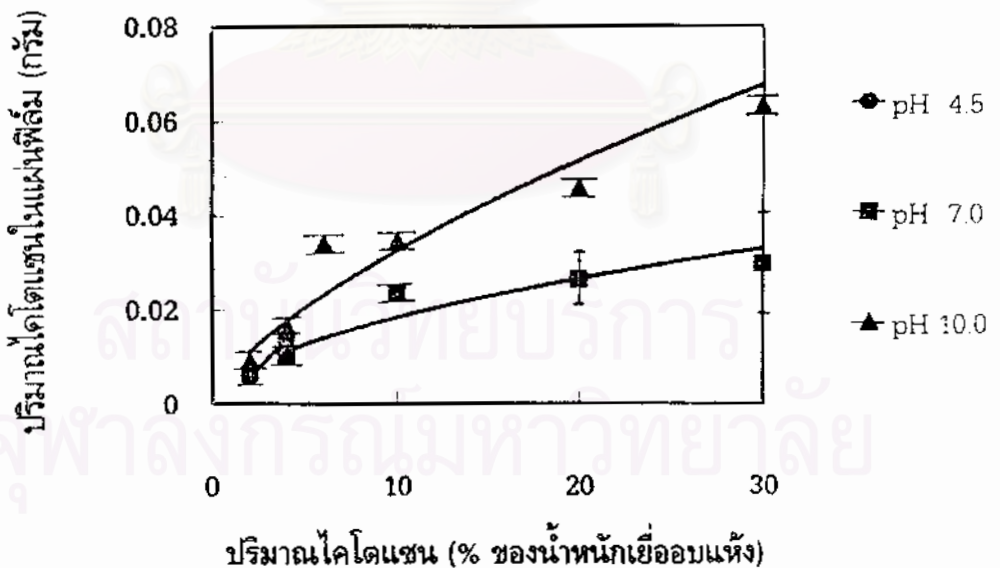


รูปที่ 24C

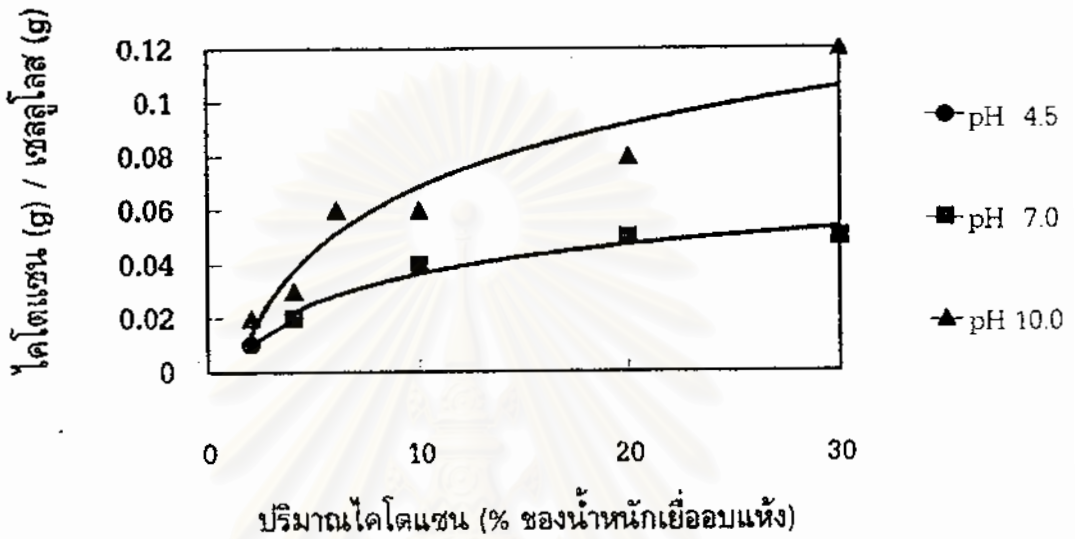
รูปที่ 24 ภาพตัดขวางของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่สภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 ปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณโคโตนที่เติมในกระบวนการผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 0-10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และเมื่อปริมาณโคโตนที่เติมลงในกระบวนการผลิตสูงกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มจะมีแนวโน้มคงที่ จากภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (หัวข้อ 4.3) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคที่

ปริมาณการผสมโคโตนในระดับต่างๆ และสังเกตได้ว่า อนุภาคโคโตนจะถูกกักเก็บไว้ในช่องว่างภายในโครงร่างตาข่ายของเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสจากแบคทีเรียนี้ไม่มีประจุ ดังนั้นการจับกันระหว่างโคโตนกับเซลลูโลสจะเป็นการจับกันทางกายภาพ จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าขนาดช่องว่างที่สามารถกักอนุภาคทรงกลมดังกล่าวมีจำนวนจำกัด ดังนั้นปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์ม (อนุภาคโคโตน) จึงถูกจำกัดไปด้วย ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 พบว่าปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคโตนที่เติมลงในกระบวนการผลิต เนื่องจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ข้อ 4.3) อนุภาคทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณโคโตนที่เติม ทำให้ปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในทุกระดับของการเติมโคโตนจะมีปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มที่มากกว่าฟิล์มที่ผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 โคโตนอยู่ในภาวะที่เป็นกลางอย่างไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 ทำให้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 โคโตนมีโอกาสที่จะสูญเสียไปจากการละลายออกไปกับน้ำ และจากขนาดของอนุภาคที่เล็กทำให้อนุภาคลอดผ่านตะแกรงในขณะขึ้นรูปจากปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มที่วิเคราะห์ได้จากสภาวะการผลิตต่างๆ สามารถคำนวณเป็นอัตราส่วนของโคโตนต่อเซลลูโลสโดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 26 พบว่าแนวโน้มของกราฟเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับรูปภาพของปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์ม (รูปที่ 25)



รูปที่ 25 ปริมาณโคโตนในแผ่นฟิล์มเทียบกับปริมาณโคโตนที่เติมลงผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่สภาวะการผลิตต่างๆ



รูปที่ 26 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคแซนต่อเซลลูโลสเทียบกับปริมาณโคโคแซนที่เติมลงผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่สภาวะการผลิตต่างๆ

#### 4.5 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคแซนต่อเซลลูโลสในระดับต่างๆ ต่อสมบัติทางกายภาพได้แก่ ดัชนีความต้านแรงดึง ความยืด ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ การซึมผ่านไอน้ำ ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ยังสีไม่ดูกลัด ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของฟิล์มที่ขึ้นรูปที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 7.0 และ 10.0 อาจแบ่งได้โดยประมาณเป็น 4 กลุ่มดังนี้

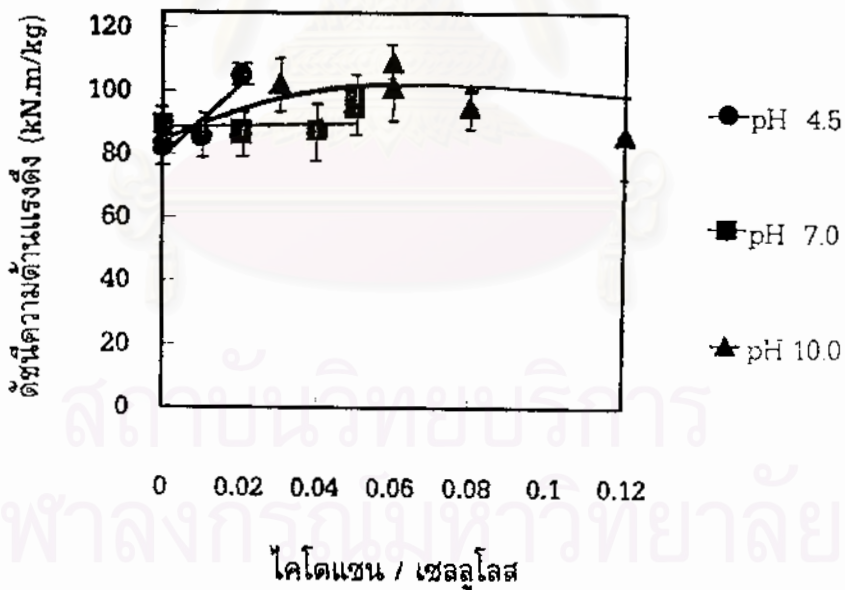
- กลุ่มที่ 1 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ได้แก่ ดัชนีความต้านแรงดึง ความยืด ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ และการซึมผ่านไอน้ำ
- กลุ่มที่ 2 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ได้แก่ ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด

- กลุ่มที่ 3 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มคงที่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ได้แก่ ยังสีโมดูลัส ความขาวสว่าง และความทึบแสง
- กลุ่มที่ 4 สมบัติทางกายภาพแตกต่างจากกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 โดยผลการทดลองแสดงเป็นช่วงของข้อมูล

4.5.1 กลุ่มที่ 1 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ได้แก่ ดัชนีความต้านแรงดึง ความยืด ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ และการซึมผ่านไอน้ำ มีรายละเอียดดังนี้

### ดัชนีความต้านแรงดึง

จากผลการวิเคราะห์ที่ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 7.0 และ 10.0 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสในแผ่นฟิล์มต่างๆ ในรูปที่ 27 พบว่า



รูปที่ 27 ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียโคโตนแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

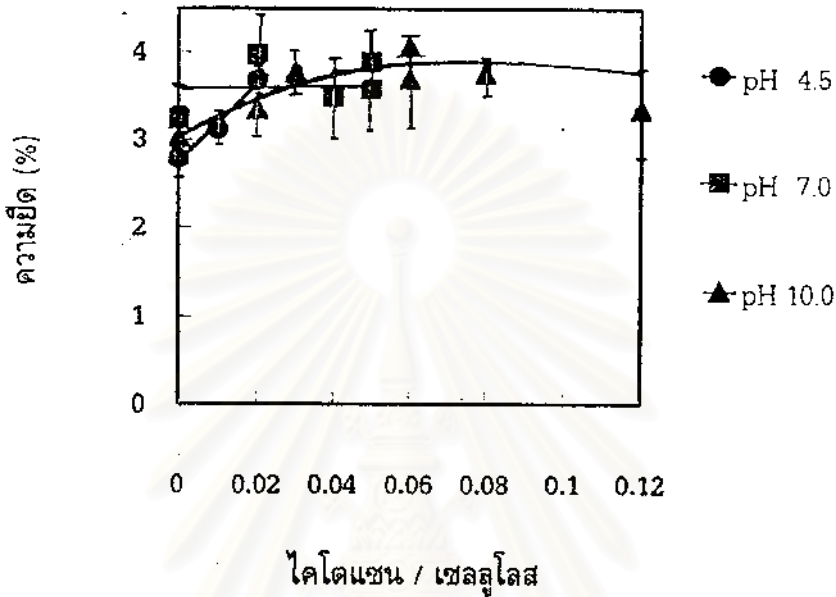
ดัชนีความต้านแรงดึงดัชนีความต้านแรงดึงของแผ่นฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะการผลิตนี้ โคโตนแซนสามารถละลายได้ในสารแขวนลอยผสมและทำให้ความหนืดของสารละลายสูงพอเพียงที่จะเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ลักษณะคล้ายร่างแหปกคลุมโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (ดังปรากฏในรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนรูปที่ รูปที่ 13 และ 14 ที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 4.3) เมื่ออัตราส่วนของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นฟิล์มโคโตนแซนที่มีลักษณะคล้ายร่างแหมีความแข็งแรงมากขึ้น (ร่างแหของโคโตนแซนหนาขึ้น และ/หรือ ความหนาแน่นสูงขึ้น) จึงทำให้ดัชนีความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีการเติมโคโตนแซน พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ดัชนีความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีการเติมโคโตนแซนถึงร้อยละ 28

ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 พบว่าอัตราส่วนของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อดัชนีความต้านแรงดึง เนื่องจากเซลลูโลสจากแบคทีเรียไม่มีประจุ(หรือมีประจุต่ำ) การเกาะติดของอนุภาคทรงกลมโคโตนแซนกับโครงร่างตาข่ายเส้นใยเซลลูโลสเป็นแบบทางกายภาพไม่เกิดพันธะเคมี ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กจะมีผิวสัมผัสต่อเส้นใยต่อหนึ่งอนุภาคต่ำ จึงไม่สามารถช่วยยึดเกาะระหว่างเส้นใยเพื่อจะเพิ่มความแข็งแรงของโครงร่างตาข่ายเส้นใยเซลลูโลสได้ ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 ในช่วงแรกของการเพิ่มอัตราส่วนของโคโตนแซนต่อเซลลูโลส ดัชนีความต้านแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคทรงกลมโคโตนแซนมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงสามารถยึดเกาะระหว่างเส้นใยได้มากขึ้น (โดยพื้นที่ผิวสัมผัสกับเส้นใยต่อหนึ่งอนุภาคเพิ่มขึ้น และ/หรือมีจำนวนเส้นใยที่สามารถสัมผัสกับอนุภาคได้มากขึ้น) และค่าดัชนีดังกล่าวจะเข้าสู่ค่าคงที่และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มมากกว่า 0.03 เนื่องจากอนุภาคโคโตนแซนมีขนาดใหญ่ขึ้น จนถึงระดับที่อนุภาคขนาดใหญ่ส่งผลให้จำนวนอนุภาคลดลงเกินกว่าที่จะช่วยเสริมความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มได้

### ความยืด

จากรูปที่ 28 พบว่ากราฟการเปลี่ยนแปลงของความยืดของฟิล์มมีลักษณะคล้ายกราฟการเปลี่ยนแปลงของดัชนีความต้านแรงดึง ซึ่งเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับดัชนีความต้านแรงดึง โดยฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 มีผลให้ความยืดเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีโคโตนแซนถึงร้อยละ 32 ส่วนฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.03 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 มีผลให้ความยืดเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีโคโตนแซนถึงร้อยละ 25

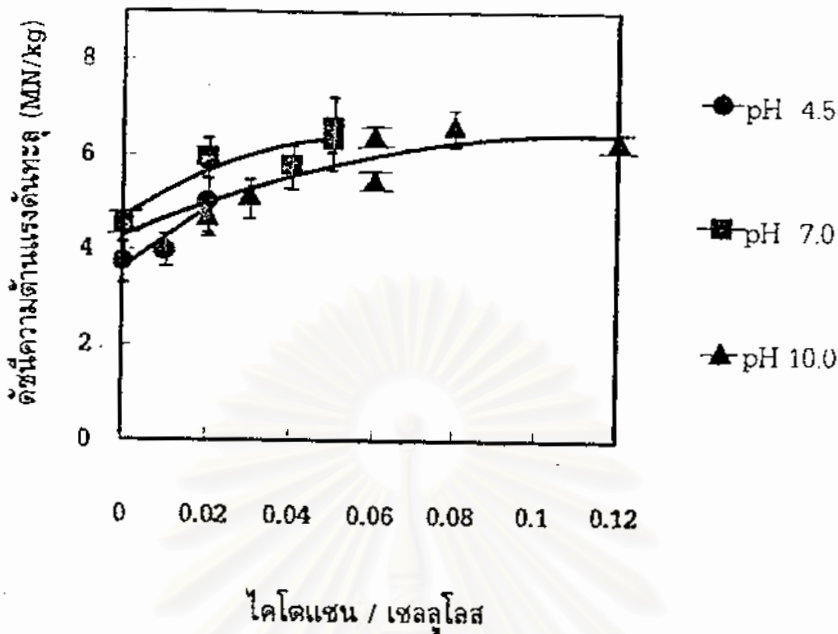




รูปที่ 28 ความยืดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

#### ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ

จากรูปที่ 29 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของดัชนีความต้านแรงดันทะลุต่ออัตราส่วนของไคโตแซนต่อเซลลูโลสก็เป็นไปในทำนองเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของดัชนีความต้านแรงดึง และความยืด ด้วยเหตุผลซึ่งอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน พบว่าฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 มีผลให้ดัชนีความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีการเติมไคโตแซนถึงร้อยละ 34 และฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.06 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 มีผลให้ดัชนีความต้านแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีการเติมไคโตแซนถึงร้อยละ 42



รูปที่ 29 ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

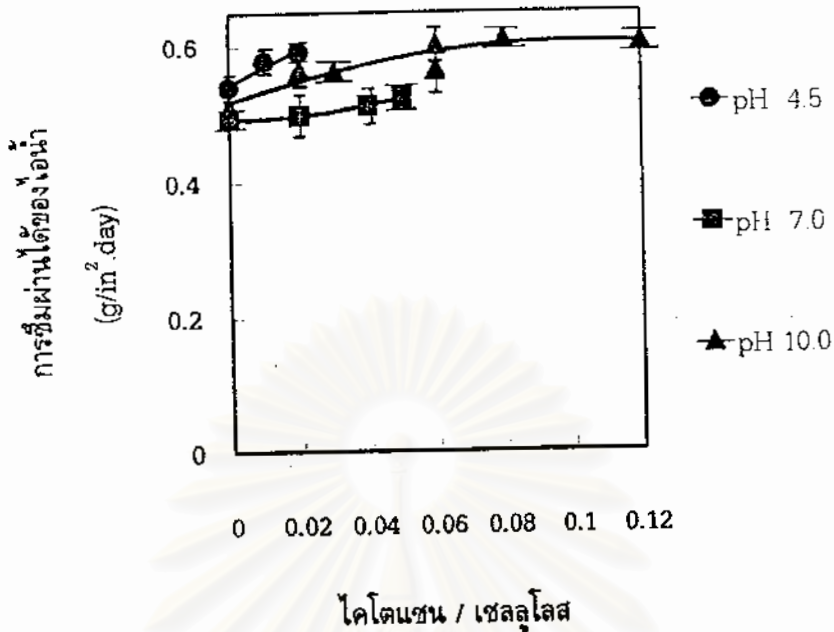
### การซึมผ่านได้ของไอน้ำ

จากรูปที่ 30 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 7.0 และ 10.0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะถูกดึงมาสู่ผิวหน้าของแผ่นฟิล์มได้มากกว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่ได้เติมโคโตแซน ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำจากบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มซึ่งเป็นแรงผลักดันให้น้ำซึมผ่าน (driving force) แต่อย่างไรก็ตามที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 เมื่ออัตราส่วนของโคโตแซนต่อเซลลูโลสมากกว่า 0.06 การซึมผ่านไอน้ำจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากดังที่กล่าวมาแล้วว่าอนุภาคโคโตแซนจะมีขนาดใหญ่จนส่งผลให้จำนวนอนุภาคโคโตแซนลดลง พื้นที่ผิวสัมผัสกับโมเลกุลน้ำในอากาศจึงไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโคโตแซนต่อเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น

4.5.2 กลุ่มที่ 2 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นได้แก่ ดัชนีความต้านแรงดึงขาด มีรายละเอียดดังนี้

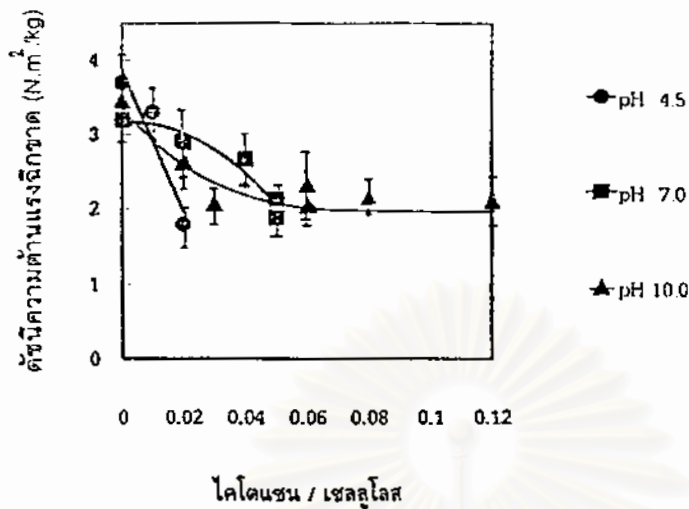
### ดัชนีความต้านแรงดึงขาด

จากรูปที่ 31 พบว่าดัชนีความต้านแรงดึงขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซน



รูปที่ 30 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

ต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มขึ้นกับความแข็งแรงของตัวเส้นใย เนื่องจากแผ่นฟิล์มถูกทำรอยขาดนำร่องอยู่ก่อน ดังนั้นแรงที่ให้เข้าไปเพื่อทำให้ฟิล์มฉีกขาดออกจากกันจะทำให้เส้นใยโดยตรง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การขาดของฟิล์มในกรณีนี้จะเกิดการขาดตามส่วนที่อ่อนแอที่สุดของแผ่นฟิล์ม ซึ่งถ้าเปรียบเทียบระหว่างโคโตแซนกับเส้นใยแล้วเส้นใยจะแข็งแรงกว่าโคโตแซน ดังนั้น ยิ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (ซึ่งหมายถึงน้ำหนักโคโตแซนในแผ่นฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่น้ำหนักของเซลลูโลสในแผ่นฟิล์มลดลง) ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดจึงลดต่ำลงด้วย ดังรูปที่ 31 โดยพบว่าฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 มีผลให้ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดลดลงจากสภาวะที่ไม่มีโคโตแซนถึงร้อยละ 51 ฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.04 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 มีผลให้ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดลดลงจากสภาวะที่ไม่มีโคโตแซนร้อยละ 16 และฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.06 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 มีผลให้ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดลดลงจากสภาวะที่ไม่มีโคโตแซนถึงร้อยละ 32 จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงมากกว่าฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0 ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มจะขาดตามส่วนที่อ่อนแอที่สุดของแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ถ้าพิจารณาโคโตแซนในสภาพที่เป็นฟิล์มและโคโตแซนในสภาพที่เป็นตะกอนแล้ว สันนิษฐานว่าโคโตแซนในสภาพที่เป็นฟิล์มน่าจะอ่อนแอกว่าโคโตแซนในสภาพที่เป็นตะกอน ดังนั้นดัชนีความต้านแรงฉีกขาดที่สภาวะการผลิตฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 จึงมีแนวโน้มลดลงมากกว่าที่สภาวะการผลิตฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0

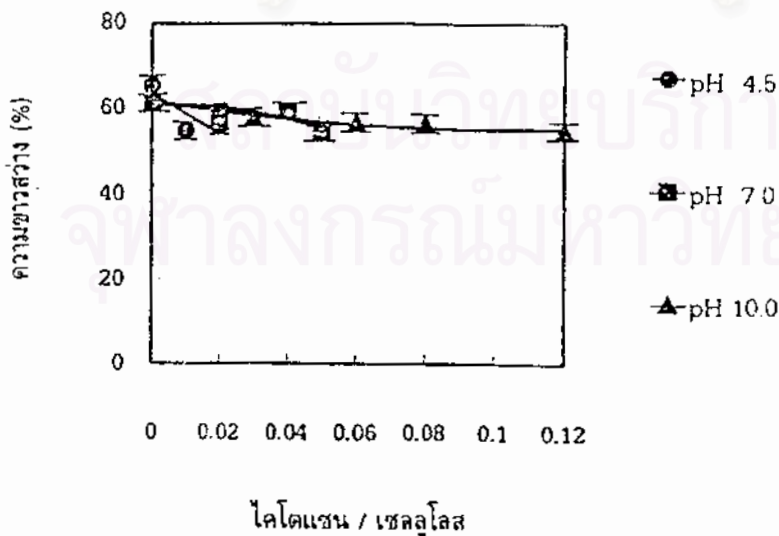


รูปที่ 31 คณิตค่าความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

4.5.3 กลุ่มที่ 3 สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มคงที่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นได้แก่ ความขาวสว่าง ความทึบแสง และยังมีโมดูลัส

#### ความขาวสว่าง

จากรูปที่ 32 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละของความขาวสว่างของฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 มีแนวโน้มลดลง แต่ของฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0 มีแนวโน้มคงที่ การที่ร้อยละของความขาวสว่างลดลงอาจมาจากสีของไคโตแซน

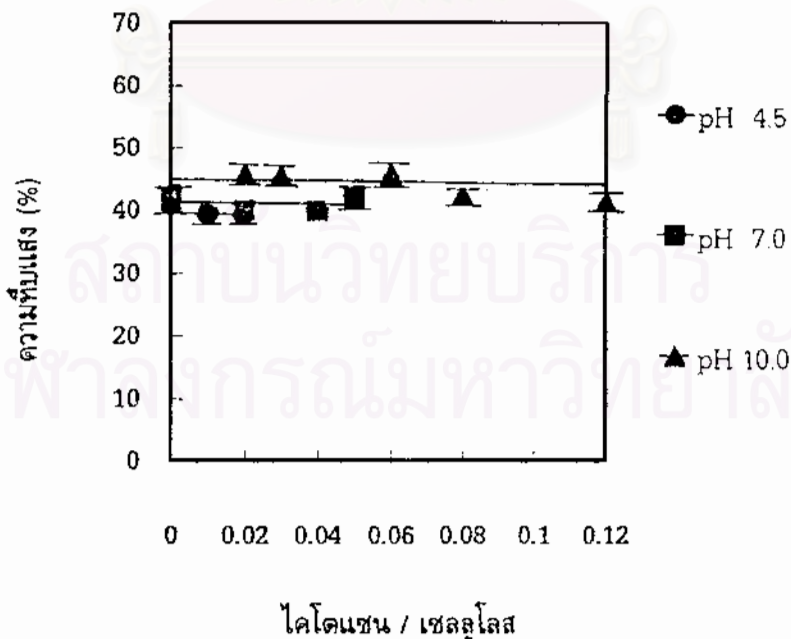


รูปที่ 32 ร้อยละของความขาวสว่างของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

เพราะโคโตนที่ใช้นี้ในงานวิจัยนี้เมื่อละลายจะมีสีเหลืองอ่อน โดยในสภาวะการผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 โคโตนอยู่ในสภาพเป็นฟิล์มหรือลักษณะร่างแหปกคลุมทั่วโครงร่างตาข่ายของเส้นใย จึงเป็นผลให้ร้อยละของความขาวสว่างของฟิล์มลดลงตามอัตราส่วนของโคโตนต่อเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 มีผลให้ร้อยละของความขาวสว่างลดลงจากสภาวะที่ไม่มีโคโตนถึงร้อยละ 15 แต่ฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 และ 10.0 มีแนวโน้มคงที่อาจเนื่องจากในสภาวะการผลิตนี้โคโตนตกตะกอนอยู่ในโครงร่างตาข่ายของเซลลูโลส ซึ่งตะกอนนี้เล็กมาก (ปริมาตรของอนุภาคทรงกลมที่ใหญ่ที่สุดเป็น  $7.82 \times 10^{-16}$  ลูกบาศก์เมตร) และเมื่อเทียบปริมาณโคโตนกับปริมาณเซลลูโลสจากแบคทีเรียในแผ่นฟิล์มพบว่าโคโตนมีปริมาณน้อยกว่ามาก จึงอาจมีผลในการกระเจิงแสงให้เห็นออกมาเป็นสีได้น้อย

### ความทึบแสง

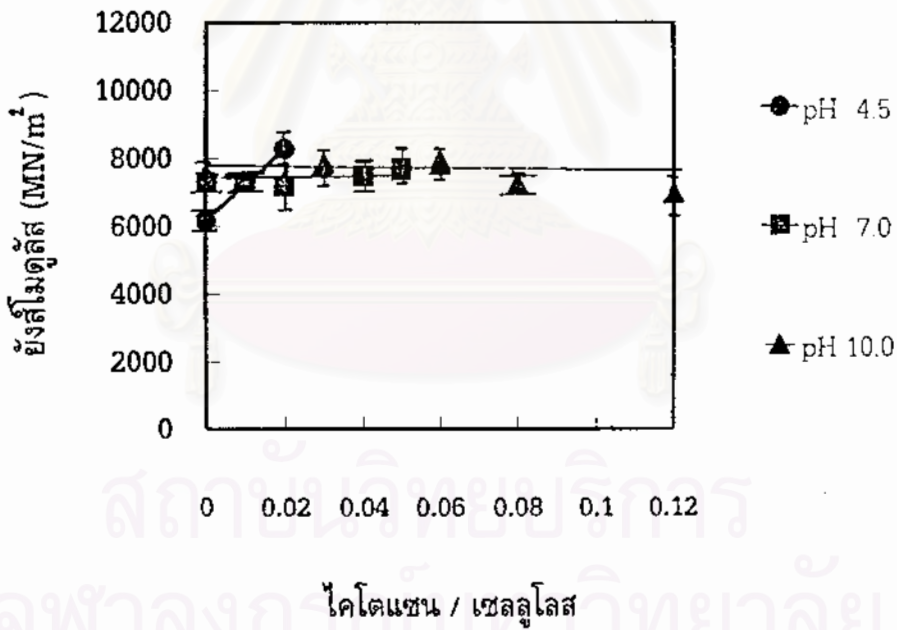
จากรูปที่ 33 พบว่าความทึบแสงของฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 7.0 และ 10.0 มีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าโคโตนที่อยู่ในสภาพเป็นฟิล์ม หรือตะกอนขนาดเล็กนั้นไม่สามารถอุดช่องว่างของโครงร่างตาข่ายของเส้นใยได้หมด ทำให้ร้อยละของความทึบแสงมีแนวโน้มคงที่



รูปที่ 33 ร้อยละของความทึบแสงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

## ยังส์โมดูลัส

จากรูปที่ 34 พบว่าฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0 มีค่ายังส์โมดูลัสของฟิล์มไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของโคโตแซนต่อเซลลูโลส แต่ฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 มีค่ายังส์โมดูลัสเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแปรตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เพราะฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 4.5 โคโตแซนอยู่ในสภาพเป็นฟิล์มหรือร่างแหปกคลุมโครงร่างตาข่ายของเส้นใยไ่ว้ซึ่งชั้นของฟิล์มโคโตแซนบางๆ นี้มีลักษณะคล้ายพลาสติก เมื่ออัตราส่วนระหว่างโคโตแซนต่อเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ชั้นฟิล์มโคโตแซนที่ปกคลุมโครงร่างตาข่ายเซลลูโลสนั้นหนาขึ้น ยังส์โมดูลัสจึงเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.02 ค่ายังส์โมดูลัสสูงขึ้นจากสภาวะที่ไม่มีโคโตแซนถึงร้อยละ 35



รูปที่ 34 ยังส์โมดูลัสของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตแซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์มต่างๆ

#### 4.5.4 กลุ่มที่ 4

สมบัติทางกายภาพแตกต่างจากกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 โดยผลการทดลองแสดงเป็นช่วงของข้อมูล เช่นการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มในตารางที่ ก.4, ก.6 และ ก.8 จะระบุค่าเป็นช่วงของข้อมูล เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มมีความไวสูงมาก และแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ผลิตได้ยังขาดความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่นทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างกันมาก ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ จึงรายงานเป็นช่วงของข้อมูล

#### 4.6 สมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของแผ่นฟิล์ม

จากการติดตามผลการต้านเชื้อ *Escherichia coli* ของแผ่นฟิล์มทุกวันเป็นเวลา 5 วัน พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 7.0 และ 10.0 ไม่สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ ทั้งนี้เพราะฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.0 และ 10.0 นั้นอนุภาคของไคโตแซนจะตกแทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสซึ่งเส้นใยเซลลูโลสนี้มีปริมาณมาก ทำให้อนุภาคของไคโตแซนไม่สามารถแสดงผลการต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ ส่วนฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ไคโตแซนเคลือบเป็นฟิล์มปกคลุมโครงร่างตาข่ายเส้นใยเซลลูโลส โดยปริมาณไคโตแซนที่หลงเหลืออยู่ในฟิล์มปริมาณมากที่สุดเป็นร้อยละ 2.3 ของน้ำหนักแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีปริมาณมากกว่าปริมาณไคโตแซนในรูปสารละลายต่ำสุดที่มีผลในการต่อต้านเชื้อ *Escherichia coli* คือร้อยละ 0.002 (Seo, Mitsuhashi and Tanibe, 1992) เหตุผลที่ไคโตแซนภายในฟิล์มซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ซึ่งปกคลุมโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสนี้ไม่มีผลยับยั้งการเจริญของเชื้อ เนื่องจากไคโตแซนอยู่ในสภาพเป็นฟิล์มจึงอาจไม่มีผลโดยตรงในการยับยั้งการเจริญของเชื่อดังเช่นไคโตแซนที่อยู่ในรูปสารละลาย แต่ถ้านำฟิล์มซึ่งผลิตขึ้นนี้ไปใช้งานในสภาพที่เป็นของเหลวที่มีความเป็นกรดอ่อนๆ ไคโตแซนอาจจะละลายออกมาในของเหลวและมีผลในการยับยั้งการเจริญของเชื้อได้

#### 4.7 ผลของน้ำหนักมาตรฐานต่อปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซนต่อเซลลูโลสเป็น 0.06 หรือฟิล์มซึ่งผลิตโดยการผสมไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งลงในกระบวนการผลิต ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 10.0 ให้สมบัติทางกายภาพโดยรวมของฟิล์มดีที่สุดและง่ายแก่การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม จึงได้ทดลองนำสภาวะดังกล่าวมาแปรน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อศึกษาผลของน้ำหนักมาตรฐานที่มีต่อปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ปริมาณการเติมไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ระดับความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 และ

น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5 พบว่าร้อยละของปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ

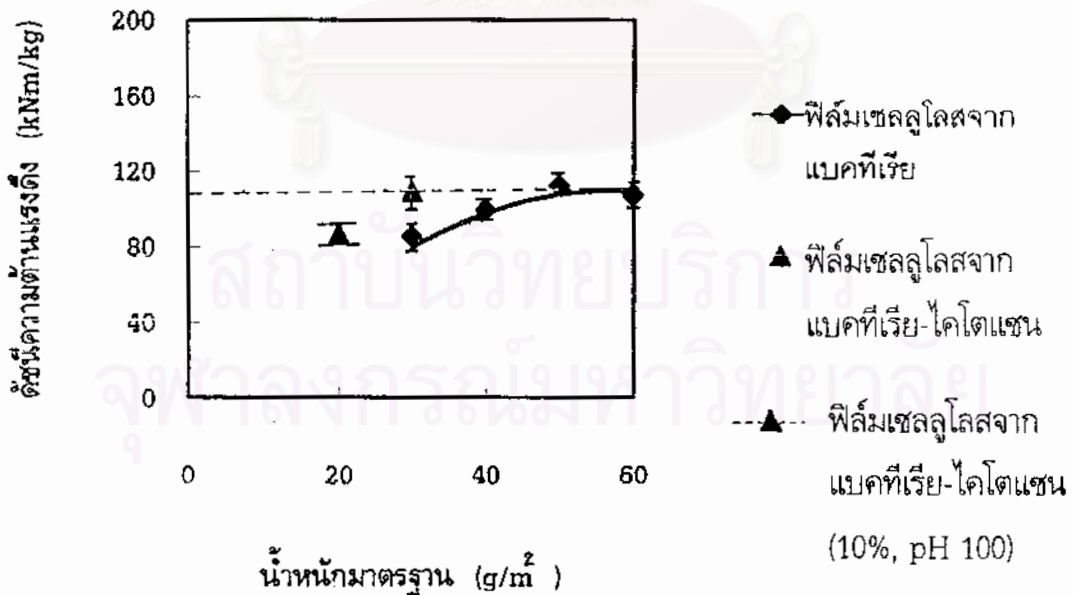
	น้ำหนักมาตรฐาน (g/m <sup>2</sup> )				
องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม	20.84	30.98	42.05	53.55	67.15
	±0.41	±0.34	±0.40	±1.66	±1.84
ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม (g)	0.0373	0.0345	0	0	0
ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์มเทียบกับปริมาณไคโตแซนที่ผสม (%)	±1.46	±0.49			

ที่น้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มระหว่าง 40 ถึง 60 กรัมต่อตารางเมตรพบว่าไม่มีปริมาณไคโตแซนตกค้างอยู่ในแผ่นฟิล์มเลย ทั้งนี้เพราะเมื่อน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเพิ่มขึ้นปริมาตรรวมของสารแขวนลอยผสมที่ใช้ในขณะขึ้นรูปจะมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อเวลาที่ปล่อย (drain) น้ำออกจากตะแกรงของชุดขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้เวลานานขึ้นตามน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสันนิษฐานว่ามีสาเหตุมาจากการที่เยื่อจะตกลงด้านล่างของตะแกรงได้เร็วกว่าตะกอนไคโตแซนและสารตัวกั้นแน่นอยู่ด้านล่างตะแกรง ทำให้เวลาในการปล่อยน้ำออกจากตะแกรงนานขึ้นมาก และทำให้โอกาสที่ไคโตแซนจะค้างอยู่ส่วนบนของแผ่นฟิล์มเปียกหลังจากปล่อยน้ำออกจากตะแกรงหมดมีมากขึ้น โดยตะกอนไคโตแซนที่ยึดกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียในแผ่นฟิล์มเป็นการยึดเหนี่ยวกันทางกายภาพ ดังนั้นโอกาสที่ไคโตแซนจะสูญเสียเนื่องจากถูกชะออกไปพร้อมกับน้ำโดยติดอยู่บนผ้าและกระดาษซับในขั้นตอนการรีดน้ำออกจากแผ่นฟิล์มเปียกโดยใช้แทนน้ำหนักและขั้นตอนการอัดแผ่นฟิล์มโดยใช้เครื่องอัดจึงมีมากขึ้น ในขณะที่แผ่นฟิล์มซึ่งมีน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มต่ำนั้น ปริมาตรของสารแขวนลอยผสมมีน้อย เวลาในการขึ้นรูปทำได้รวดเร็ว ทำให้โอกาสที่ไคโตแซนจะตกแทรกในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงพบว่าปริมาณไคโตแซนที่ตกค้างอยู่บนแผ่นฟิล์มที่น้ำหนักมาตรฐานต่ำมีค่ามากกว่าฟิล์มที่น้ำหนักมาตรฐานสูง จากนั้นจึงสรุปได้ว่าเวลาและปริมาณสารแขวนลอยผสมที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อปริมาณการตกค้างของไคโตแซนบนแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ในกรณีที่ต้องการทำแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่น้ำหนักมาตรฐานสูง อาจต้องพัฒนาเครื่องขึ้นรูปให้มีตัวกวนในขณะขึ้นรูป เพื่อให้สารแขวนลอยผสมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเวลาในการขึ้นรูปเร็วขึ้น ทำให้ไคโตแซนมีโอกาสแทรกอยู่ในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยมากขึ้น

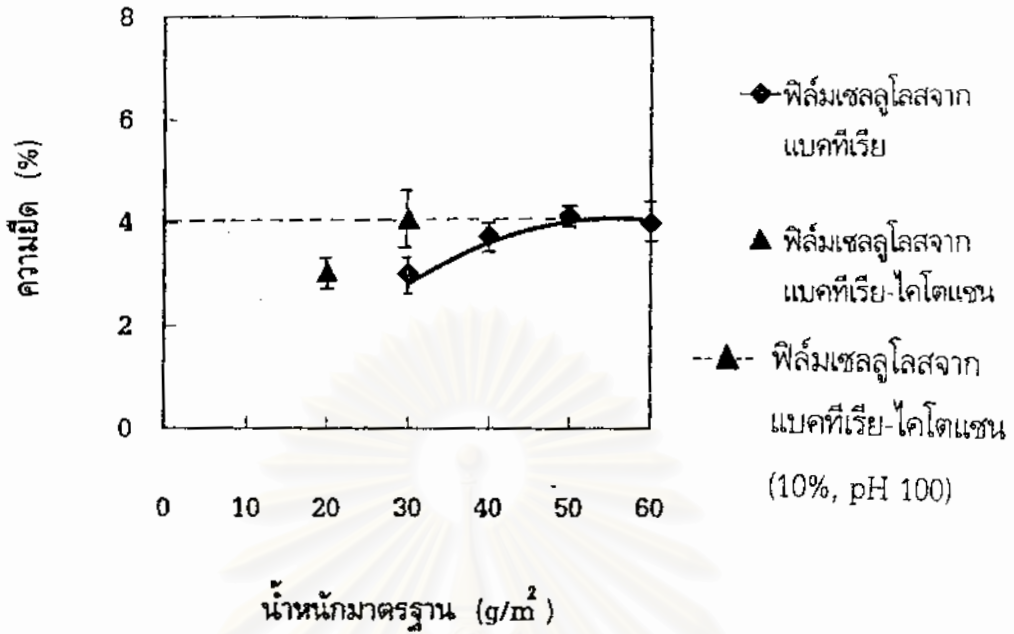


#### 4.8 ผลของน้ำหนักมาตรฐานต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

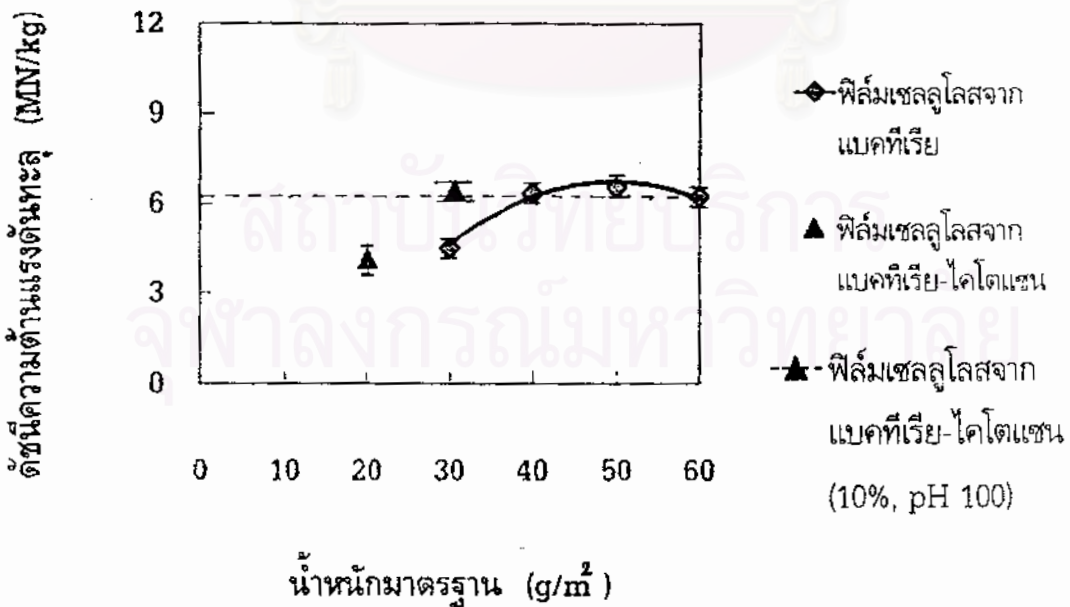
จากหัวข้อ 4.6 พบว่าฟิล์มซึ่งผลิตโดยการผสมโคโคแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 เมื่อน้ำหนักมาตรฐานของฟิล์มเพิ่มขึ้นมากกว่า 40 กรัมต่อตารางเมตร จะไม่มีโคโคแซนค้างบนแผ่นฟิล์มเลย (เรียกฟิล์มซึ่งไม่มีโคโคแซนผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียว่า ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย) ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่างๆ กับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 20 และ 30 กรัมต่อตารางเมตร โดยจากรูปที่ 35 ถึง 42 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 20 กรัมต่อตารางเมตรมีสมบัติทางกายภาพโดยรวมต่ำกว่าฟิล์มอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะนี้ฟิล์มที่ผลิตได้บางมากเกินไป จึงทำให้แผ่นฟิล์มอ่อนแอ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงนำฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัมต่อตารางเมตรเป็นตัวเปรียบเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่างๆ จากรูปที่ 35, 36 และ 37 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัมต่อตารางเมตรมีดัชนีความต้านแรงดึง ความยืด และดัชนีความต้านแรงดันทะลุใกล้เคียงกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 40 ถึง 60 กรัมต่อตารางเมตร แสดงว่าการผสมโคโคแซนลงในกระบวนการผลิตจะช่วยปรับปรุงดัชนีความต้านแรงดึง ความยืด และดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มที่มีน้ำหนัก



รูปที่ 35 ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่ระดับปริมาณโคโคแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ

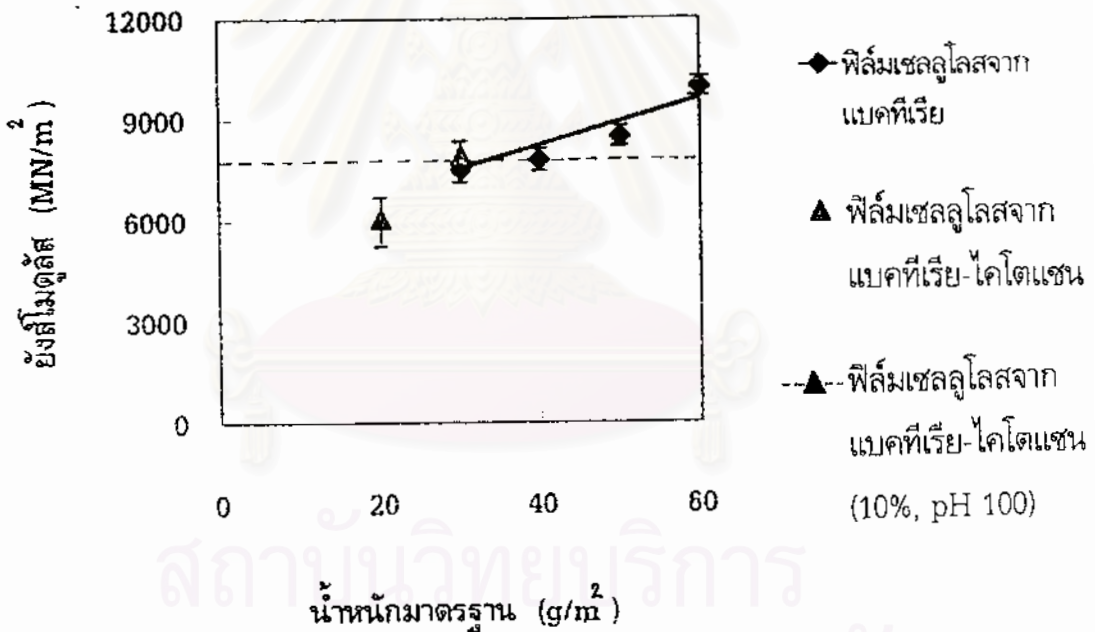


รูปที่ 36 ความยืดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ

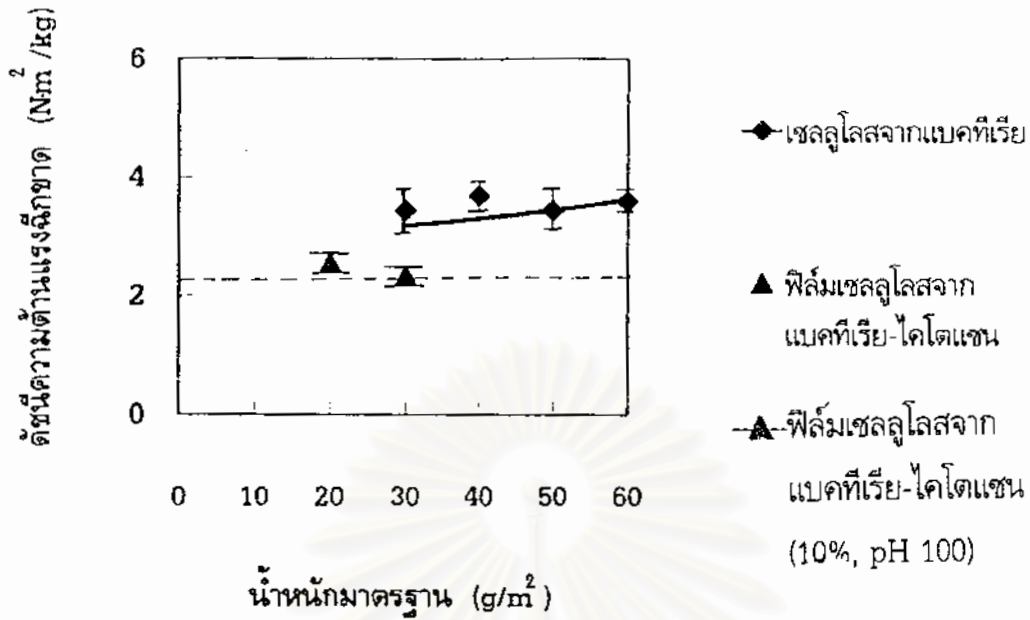


รูปที่ 37 ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ

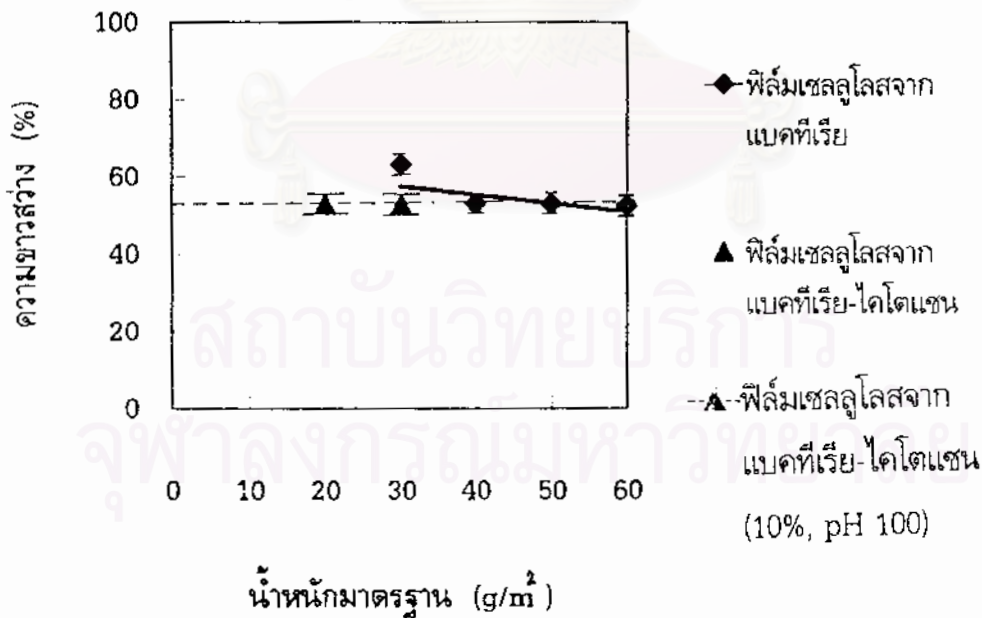
มาตรฐานต่ำให้มีค่าสูงใกล้เคียงกับฟิล์มซึ่งมีน้ำหนักมาตรฐานสูงได้ เหตุผลอธิบายดังหัวข้อ 4.5 แต่พบว่าการผสมไคโตแซนไม่มีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติด้านยังสีไมดูลัส ความขาวสว่าง ความทึบแสง การซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มซึ่งมีน้ำหนักมาตรฐานต่ำได้ (รูปที่ 38, 40, 41 และ 42) นอกจากนี้ไคโตแซนที่เติมในกระบวนการผลิตยังมีผลทำให้ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดต่ำกว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ไม่มีการผสมไคโตแซนเมื่อเทียบที่น้ำหนักมาตรฐานเดียวกัน (รูปที่ 39) เหตุผลอธิบายดังหัวข้อ 4.5



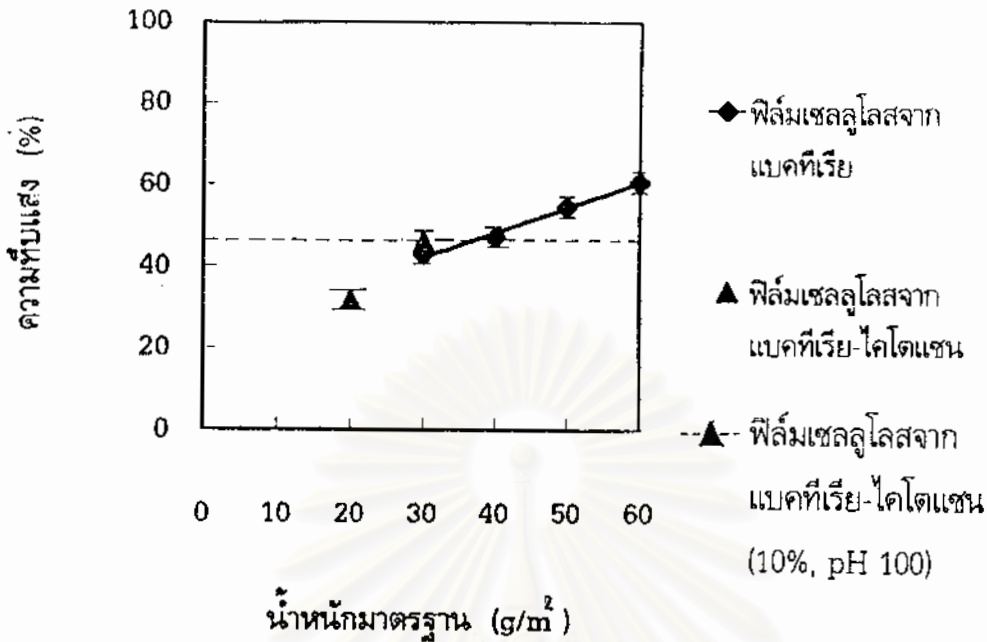
รูปที่ 38 ยังสีไมดูลัสของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ



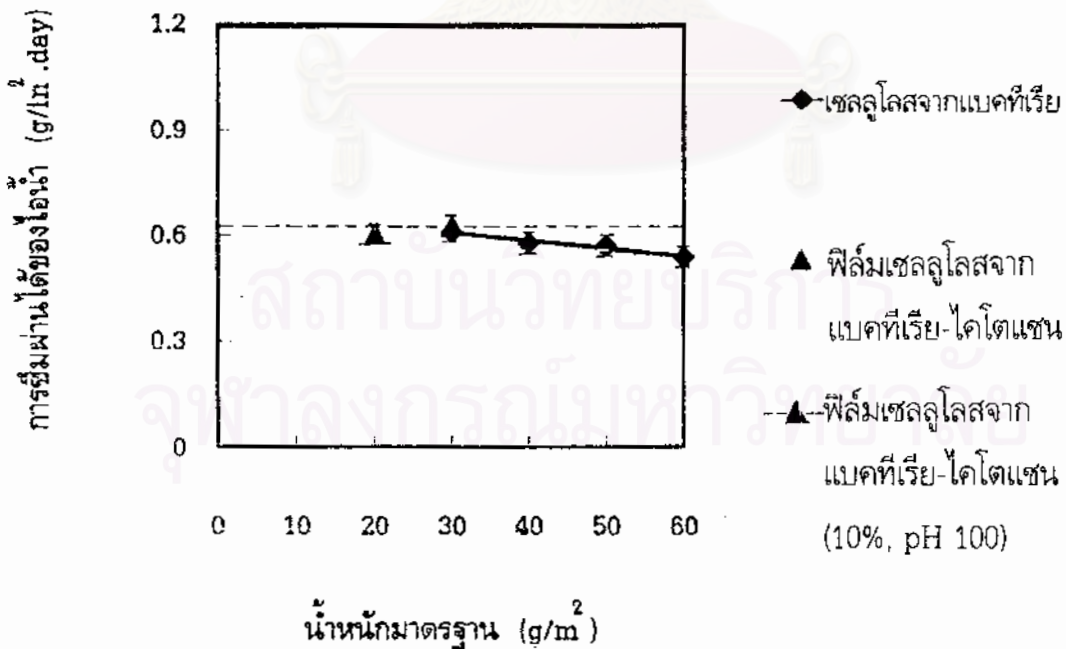
รูปที่ 39 ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ



รูปที่ 40 ความขาวสว่างของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตแซนที่ระดับปริมาณไคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ



รูปที่ 41 ความทึบแสงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคไดแซนที่ระดับปริมาณโคไดแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ



รูปที่ 42 การซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคไดแซนที่ระดับปริมาณโคไดแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่น้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ

#### 4.9 สมบัติของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนกับวัสดุต่างๆ ตามข้อ 3.3.9 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 43-49 ดังนี้

##### 4.9.1 ดัชนีความต้านแรงดึง

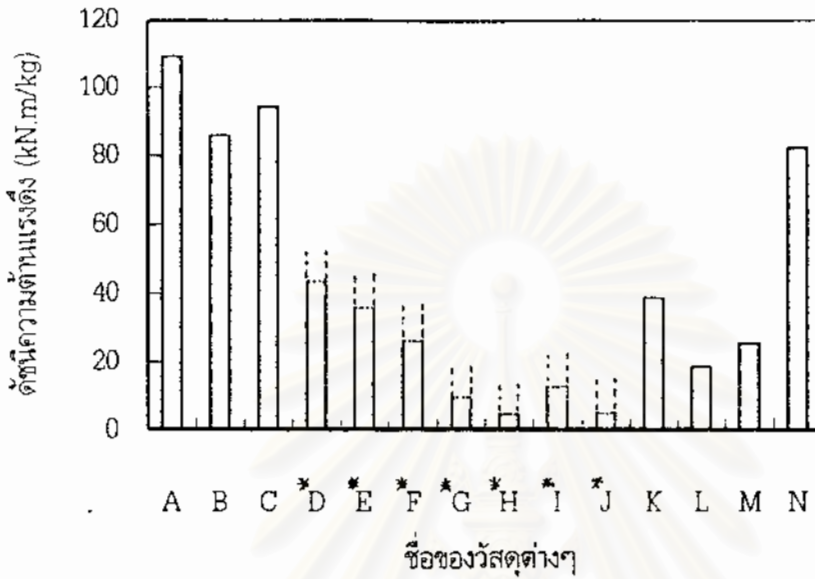
เมื่อเปรียบเทียบดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่ปริมาณการผสมโคโคแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแบคทีเรีย และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 43 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนมีดัชนีความต้านแรงดึงอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และพลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

##### 4.9.2 ความยืด

เมื่อเปรียบเทียบความยืดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่ปริมาณการผสมโคโคแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแบคทีเรีย และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 44 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนมีความยืดอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก กระดาษเวดสเตอร์ และกระดาษถลุง

##### 4.9.3 ยั่งโมดูลัส

เมื่อเปรียบเทียบยั่งโมดูลัสของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่ปริมาณการผสมโคโคแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแบคทีเรีย และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 45 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนมียั่งโมดูลัสอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และพลาสติก polyethylene terephthalate (PET)



เมื่อ \* คือ ดัชนีความต้านแรงดึงต่ำสุดของฟิล์ม

A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแชน

B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

D คือ กระดาษรีดคาร์พด์

E คือ กระดาษเวดสเตอร์ริงท์

F คือ กระดาษถุง

G คือ กระดาษเช็ดปาก

H คือ กระดาษเช็ดหน้า

I คือ กระดาษเช็ดมือ

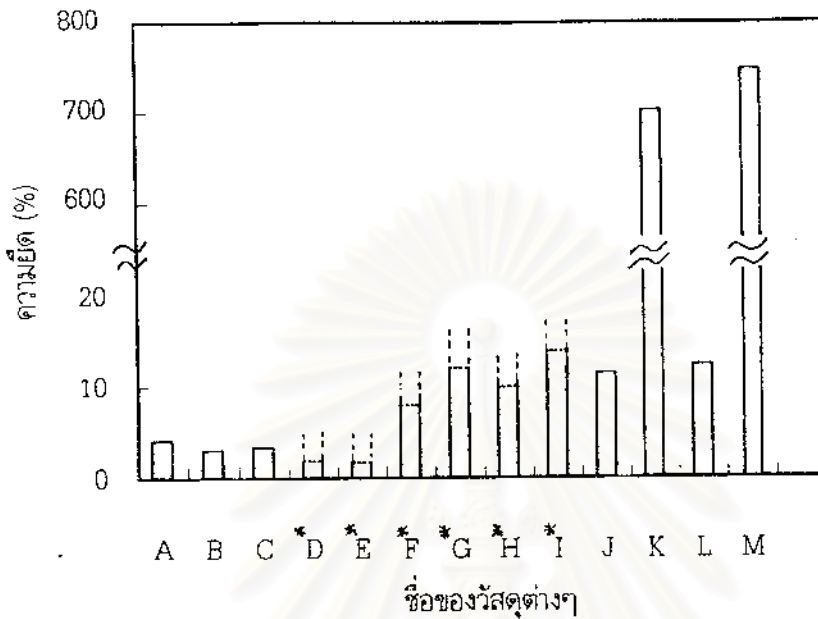
J คือ กระดาษชำระ

K คือ พลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

L คือ พลาสติก polyethylene (PE)

M คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

N คือ พลาสติก polyethylene terephthalate (PET)



เมื่อ \* คือ ความยืดต่ำสุดของฟิล์ม

A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน

B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

D คือ กระดาษเวดสเตรงท์ I คือ กระดาษชำระ

E คือ กระดาษถุง

J คือ พลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

F คือ กระดาษเช็ดปาก

K คือ พลาสติก polyethylene (PE)

G คือ กระดาษเช็ดหน้า

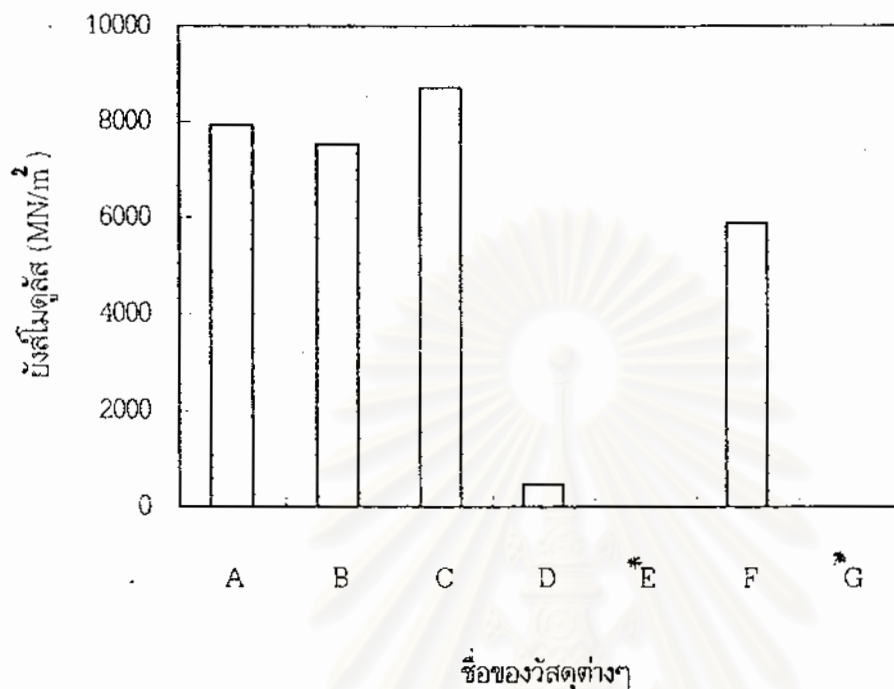
L คือ พลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

H คือ กระดาษเช็ดมือ

M คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

รูปที่ 44 ร้อยละของความยืดของวัสดุต่างๆ





เมื่อ \* คือ ค่าย้งส์โมดูลัสของฟิล์มต่ำกว่า 5 MN/m<sup>2</sup>

A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซน

B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

D คือ พลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

E คือ พลาสติก polyethylene (PE)

F คือ พลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

G คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

รูปที่ 45 ย้งส์โมดูลัสของวัสดุต่างๆ

#### 4.9.4 ดัชนีความต้านแรงดันทะเล

เมื่อเปรียบเทียบดัชนีความต้านแรงดันทะเลของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ปริมาณการผสมโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 46 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนมีดัชนีความต้านแรงดันทะเลอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และพลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

#### 4.9.5 ดัชนีความต้านแรงดึกซาด

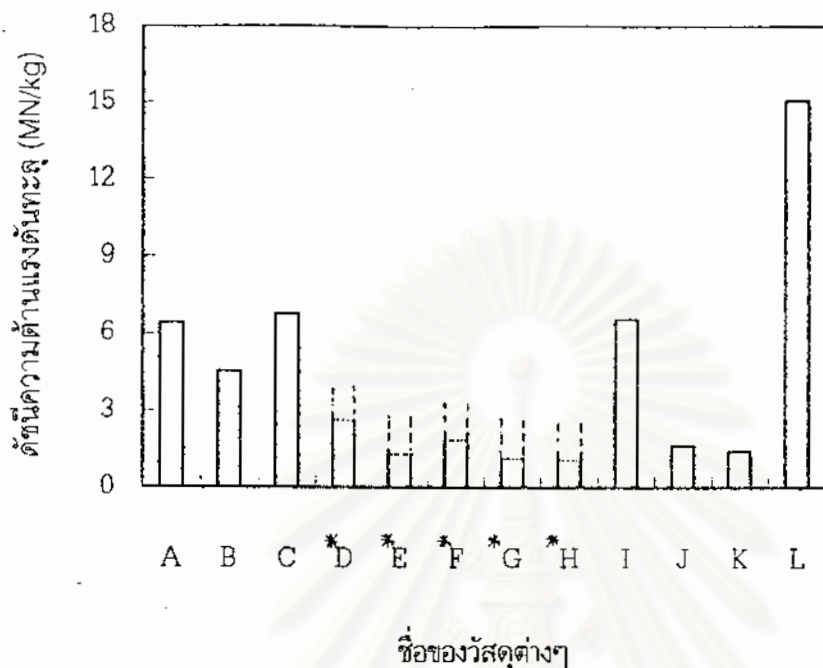
เมื่อเปรียบเทียบดัชนีความต้านแรงดึกซาดของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ปริมาณการผสมโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 47 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนมีดัชนีความต้านแรงดึกซาดอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พลาสติก polyvinyl chloride (PVC) และพลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

#### 4.9.6 ความขาวสว่าง

เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่างของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ปริมาณการผสมโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 48 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนมีความขาวสว่างอยู่ในกลุ่มเดียวกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และกระดาษหนังสือพิมพ์

#### 4.9.7 ความทึบแสง

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของความทึบแสงของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ปริมาณการผสมโคโตแซนร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และความเป็นกรด-ด่างเป็น 10.0 กับวัสดุอื่นๆ ในรูปที่ 49 พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนมีร้อยละของความทึบแสงใกล้เคียงกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย



เมื่อ \* คือ ดัชนีความต้านแรงดึงต่ำสุดของฟิล์ม

A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน

B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

D คือ กระดาษผิวกล่อง

E คือ กระดาษเอ็มจี

F คือ กระดาษดุง

G คือ กระดาษออฟเซต

H คือ กระดาษแมนิโพลด์

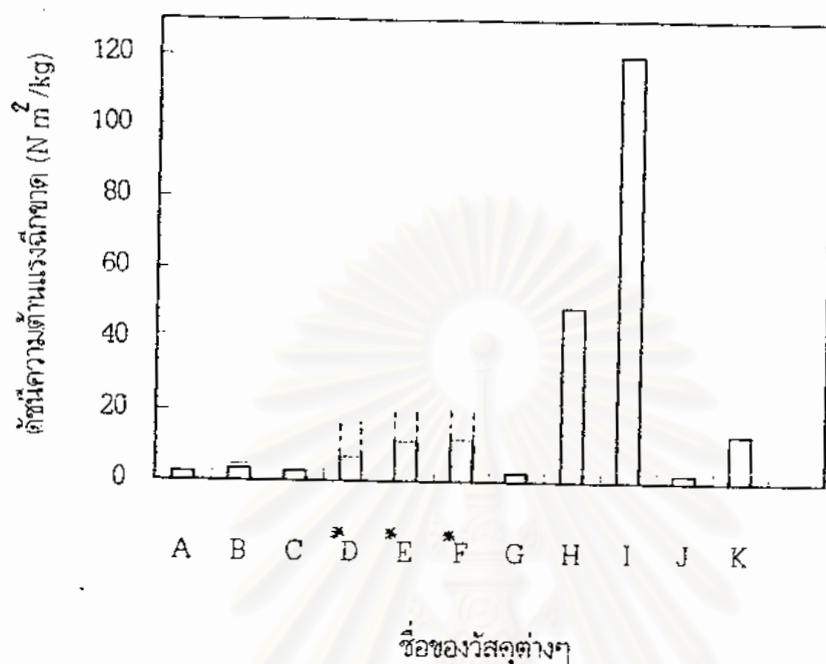
I คือ พลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

J คือ พลาสติก polyethylene (PE)

K คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

L คือ พลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

รูปที่ 46 ดัชนีความต้านแรงดึงของวัสดุต่างๆ



เมื่อ \* คือ ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดต่ำสุดของฟิล์ม

A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแทน

B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอิออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

D คือ กระดาษรีดคราฟต์

E คือ กระดาษเวดสเตอร์

F คือ กระดาษถุง

G คือ พลาสติก polyvinyl chloride (PVC)

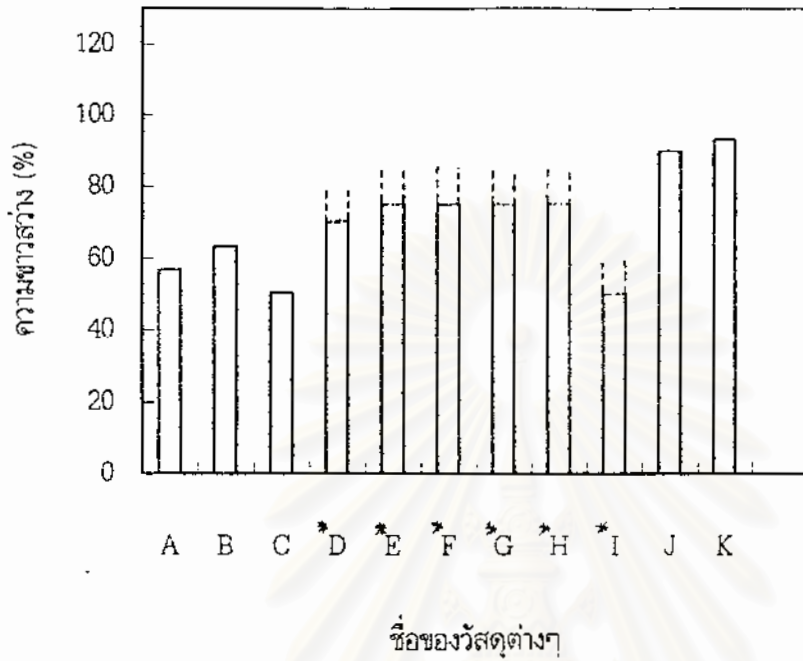
H คือ พลาสติก polyethylene (PE)

I คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

J คือ พลาสติก polyethylene terephthalate (PET)

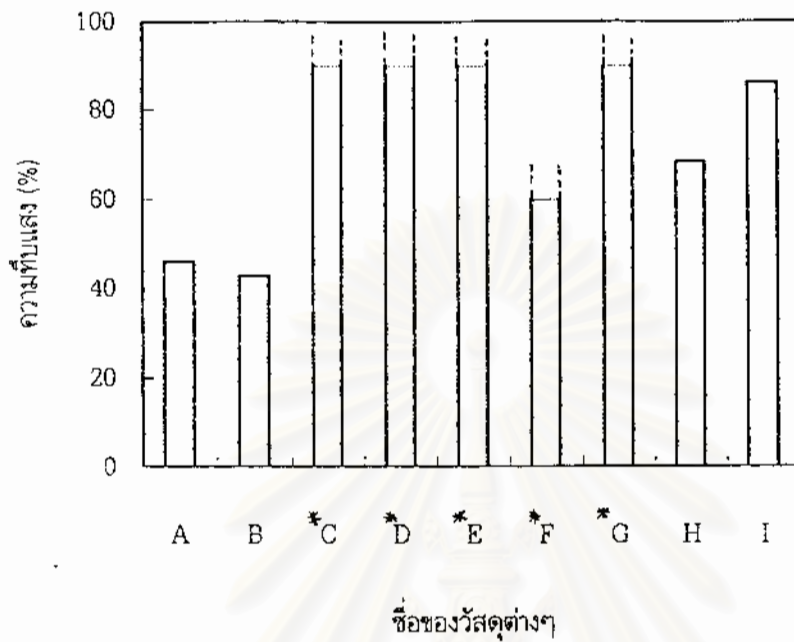
K คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมเยื่อไยยาวร้อยละ 70

รูปที่ 47 ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดของวัสดุต่างๆ



- เมื่อ \* คือ ร้อยละของความขาวสว่างต่ำสุดของฟิล์ม
- A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคไซแน
- B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย
- C คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดแคทไอออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก
- D คือ กระดาษวาดเขียน
- E คือ กระดาษเอ็มจี
- J คือ พลาสติก polyethylene (PE)
- F คือ กระดาษพิมพ์และเขียน
- K คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)
- G คือ กระดาษออฟเซต
- H คือ กระดาษแมนิโฟลด์
- I คือ กระดาษหนังสือพิมพ์

รูปที่ 48 ร้อยละของความขาวสว่างของวัสดุต่างๆ



- เมื่อ \* คือ ร้อยละของความทึบแสงต่ำสุดของฟิล์ม
- A คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโคแชน
- B คือ ฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย
- C คือ กระดาษวาดเขียน
- D คือ กระดาษพิมพ์และเขียน
- E คือ กระดาษออฟเซต
- F คือ กระดาษแมนิโพลด์
- G คือ กระดาษหนังสือพิมพ์
- H คือ พลาสติก polyethylene (PE)
- I คือ พลาสติก linear low density polyethylene (LLDPE)

รูปที่ 49 ร้อยละของความทึบแสงของวัสดุต่างๆ

จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนกับวัสดุต่างๆ พบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนโดยรวมแล้วมีสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียและฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรียผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดแคทอิออนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำมาก และแม้ว่าสมบัติการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนซึ่งวัดได้ในงานวิจัยนี้จะรายงานเป็นช่วงของข้อมูลก็ตาม แต่ก็พบว่าถ้าพิจารณาค่าต่ำสุดในช่วงของข้อมูลการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มแล้วพบว่ามีความต่ำมากเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจพัฒนาฟิล์มชนิดนี้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารหรือยาที่สามารถเสื่อมเสียจากออกซิเจนและไอน้ำได้ง่าย และเนื่องจากฟิล์มชนิดนี้มีค่าดัชนีความต้านแรงดึงอยู่ในกลุ่มเดียวกับพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) ความยืดหยุ่นในกลุ่มเดียวกับกระดาษเวดสเตรทท์และกระดาษงู ค่ายังสีโมดูลัสอยู่ในกลุ่มเดียวกับพลาสติก PET ดัชนีความต้านแรงดันทะลุอยู่ในกลุ่มเดียวกับพลาสติก polyvinyl chloride (PVC) ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดอยู่ในกลุ่มเดียวกับพลาสติก PVC และพลาสติก PET ความขาวสว่างอยู่ในกลุ่มเดียวกับกระดาษหนังสือพิมพ์ จากที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าฟิล์มที่ผลิตอาจสามารถพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ให้ความแข็งแรงในการป้องกันผลิตภัณฑ์ที่เสียหายจากการขนส่งหรือการเรียงซ้อนกันของผลิตภัณฑ์ในคลังสินค้าได้ง่าย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยพบว่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม และปริมาณโคโตแซนที่ผสมกับเซลลูโลส จากแบคทีเรียมีผลต่อสถานภาพ (รูปร่างและขนาด) ของโคโตแซน ในด้านรูปร่างพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 โคโตแซนสามารถละลายในสารแขวนลอยผสมได้ เมื่อผ่านขั้นตอนการทำแห้งของแผ่นฟิล์มโคโตแซนจะอยู่ในรูปของฟิล์มหรือร่างแหปกคลุมโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลส ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 และ 10.0 โคโตแซนตกตะกอนแทรกอยู่ในโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งตะกอนโคโตแซนมีโอกาสปิดช่องว่างระหว่างเส้นใยและสามารถสัมผัสและยึดกับเส้นใยด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ ส่วนในด้านขนาดพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 10.0 ตะกอนโคโตแซนมีขนาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคโตแซนที่ผสมในการผลิตฟิล์ม ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 ขนาดตะกอนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณโคโตแซนที่ผสมในการผลิตฟิล์มเพิ่มขึ้น

ขนาดและรูปร่างของโคโตแซนที่ต่างกันมีผลกระทบต่อความยากง่ายในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม โดยการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 ไม่สามารถทำได้เมื่อระดับปริมาณโคโตแซนที่ผสมกับเซลลูโลสจากแบคทีเรียเกินกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่วนการขึ้นรูปที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 7.0 และ 10.0 กระทำได้ง่ายโดยไม่มีข้อจำกัดของระดับปริมาณโคโตแซนที่ผสม ในด้านปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มไม่ว่าจะผลิตฟิล์มที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 7.0 หรือ 10.0 ก็พบว่าปริมาณโคโตแซนในแผ่นฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อโคโตแซนที่ผสมในการผลิตแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น และในด้านสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพบว่าดัชนีความต้านแรงดึง ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ความยืด และการซึมผ่านได้ของไอน้ำดีขึ้นเมื่อผสมโคโตแซนลงในกระบวนการผลิตฟิล์มทั้งที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยผสม 4.5 และ 10.0 แต่การผสมโคโตแซนในการผลิตฟิล์มมีผลให้ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดต่ำลง

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนที่ผลิตได้ พบว่าฟิล์มชนิดนี้แม้จะไม่สามารถต้านทานการเจริญของเชื้อ *Escherichia coli* ได้ แต่ก็มีสมบัติทางกายภาพอื่นๆ โดยรวมเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและยาได้



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษารูปถ่ายของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในปริมาณมากขึ้นหรือใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) ติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดตะกอนโคโตแซนที่ความเป็นกรด-ด่าง 7.0 และ 10.0 เพื่อนำมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพต่างๆ

5.2.2 ควรศึกษาสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-โคโตแซน โดยเลือกเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ มาทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเชื้อราซึ่งมีงานวิจัยมากมายสนับสนุนว่าโคโตแซนสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราหลายชนิดได้

5.2.3 ควรแปรความเข้มข้นของสารละลายโคโตแซนที่ผสมในกระบวนการผลิตแผ่นฟิล์ม เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มผสมระหว่างเซลลูโลสจากแบคทีเรียและโคโตแซน

5.2.4 ควรแปรค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4.5-7.0 ด้วยเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโคโตแซน และสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ทิพรรัตน์ หงษ์ทรีศรี. 2536. วุ้นสวรรค์: ปัจจัยสำคัญในการผลิตวุ้นสวรรค์. วารสารอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร. 6: 44-50.

พัชรี รัตนวรานันท์ และรัชดา สาดตระกุลวัฒนา. 2538. การผลิตฟิล์มที่บริโภคได้จากไคโตแซน. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรทิวี พึ่งรัศมี และอรัญญา หาญสืบสาย. 2534. สารละลายเรื่องกระดาษพิมพ์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พาสวดี ประทีปะเสน และสุเมท ดันตระเชียร. 2539. การผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากวุ้นนาดา. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2520. กระดาษชำระ, มอก. 214. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2520. กระดาษเช็ดหน้า, มอก. 215. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2520. กระดาษเช็ดมือ, มอก. 239. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2520. กระดาษเช็ดปาก, มอก. 240. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2529. กระดาษเหนียว, มอก. 170. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2531. กระดาษหนังสือพิมพ์, มอก. 758. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2533. กระดาษพิมพ์และเขียน, มอก. 287. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

รังสิมา ชลกุล. 2538. การศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัชนิษฐ์ อัสวเกศมณี และคณะ. 2539. การพัฒนาปรับปรุงเชื้อยีสขั้วลพดฟอกขาวและเชื้อยีสทำใหม่จากกลองลูกฟูกเก่าด้วยไคโตแซน. รายงานวิจัยสำหรับหลักสูตรปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials. 1994. Annual Books of ASTM Standards,  
D 1434-82. Vol. 15.09: Paper; Packaging; Business Copy Products. Philadelphia:  
 American Society for Testing and Materials.
- Blackwell, J., and Marchessault, R. H. 1971. In N. M. Bikales; and L. Segal (ed.), Cellulose  
 and Cellulose Derivatives. p. 1. Part IV. New York: Wiley-Interscience.
- Blackwell, J., Kolpak, F. J., and Gardner, K. H. 1977. In J. C. Arthur (ed.), Cellulose  
 Chemistry and Technology, pp. 42. Washington: American Chemistry Society.
- Bough, W. A., Perkins, B. E., Salter, W. L., and Wu, A. C. M. 1978. Influence of  
 manufacturing variables on the characteristics and effectiveness of chitosan products.  
Biochemistry and Bioengineering. 20: 1930-1943.
- Brown, D. E. 1983. Lignocellulose hydrolysis. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 300: 305-322.
- Brown, R.M., Jr., Willison, J.H.M., and Richardson, C.L. 1976. Cellulose biosynthesis in  
*Acetobacter xylinum*: Visualization of the site of synthesis and direct measurement  
 of the In vivo process. Pro. Natl. Acad. Sci. USA. 72: 4565.
- Bublitz, W. J. 1980. Pulpwood. In J. P. Casey (ed.), Pulp and Paper Chemistry and  
 Chemical Technology, pp. 113-159. Vol.1, 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley &  
 Sons, Inc.
- Cannon, R. E. , and Anderson, S. M. 1991. Biogenesis of bacterial cellulose. Microbiol.  
 17 (6): 435-447.
- Colvin, J. R. 1972. The biosynthesis of cellulose. CRC Crit. Rev. Macromol. Sci. 1: 47-81.
- Conrad, J. 1965. Chitin. In H. F. Mark; N. G. Gaylotd; and N. M. Bikales (eds.),  
Encyclopedia of Polymer Science and Technology: Plastics, Resin, Rubber. Vol. 3.  
 USA: John Willey & Sons, Inc.
- Cowling, E. B., and, Kirk, T. K. 1976. Properties of cellulose and lignocellulose  
 materials as substrates for enzymatic conversion process. Biotech. Bioeng. Symp. 6: 95-123.
- Delmer, D. P. 1983. Biosynthesis of cellulose. Adv. Carbohydr. Chem. Biochem. 41:  
 105-153.
- Flory, P. J. 1953. Principle of Polymer Chemistry. London: Cornell University Press.
- Ghaouth, E. L., Arul, J., and Asselin, A. 1992. Potential use of Chitosan in postharvest  
 preservation of fruits and vegetables. In C. J. Brine (ed.), Advances in Chitin and  
 Chitosan, pp. 440-452. England: Elsevier Science Publisher Ltd.

- Haigler, C. H., and Benziman, M. 1982. Biogenesis of cellulose I microfibrils occurs by Cell-directed self-assembly in *Acetobacter xylinum*. In R. M. Brown, Jr. (eds.), Cellulose and Other Natural Polymer Systems. Chap. 14. New York: Plenum Press.
- Hayes, E. R. 1978. Characterization of chitosan. II: The Determination of the degree of Acetylation of chitosan and chitin. In R. A. A. Muzzarelli, and E. R. Parizer (eds.), Proc. 1<sup>st</sup> Inter. Conf.on Chitin/chitosan, pp. 406-420. Boston: MIT SG 78-7.
- Hestrin, S., and Shramm, M. 1954. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*: preparation of freeze dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose. Biochem J. 58: 345-352.
- Heuser, E. 1944. The Chemistry of Cellulose. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Honeyman, J. 1959. Recent Advances in the Chemistry of Cellulose and Starch. New York: Interscience Publishers, Inc.
- International Organization for Standardization (ISO). 1971. International Standard ISO 2470. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1977. International Standard ISO 2471. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1976. International Standard ISO 536. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1980. International Standard ISO 5269/2. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1983. International Standard ISO 2758. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1988. International Standard ISO 534. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1990. International Standard ISO 1974. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (ISO). 1994. International Standard ISO 1924/2. Switzerland: The International Organization for Standardization.
- Kaushal, R., and Walker, T. K. 1951. Formation of cellulose by certain species of *Acetobacter*. Biochem. J. 48: 618-621.
- Kienzle, S. C., Rodriguze, S. D., and Rha, C. 1982. Dilute solution behavior of a Cationic polyelectrolyte. J. Appl. Polymer Sci. 27: 4467-4470.

- Kleinert, T. N. 1985. Cellulose. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. 5: 70-88.
- Kojiro, N., Takafumi, N., and Takaaki, T. 1996. Antimicrobial Paper Product. JP. Patent 08199497 A.
- Krasig, H. 1985. Structure of cellulose and its relation to properties of cellulose fiber. In J. F. Kennedy; G. O. Phillips; D. J. Wedlock; and P. A. Williams (eds.), Cellulose and Its Derivatives: Chemistry, Biochemistry and Applications, pp. 3-25. New York: Ellis Horwood Limited.
- Lavingue, J. R., and Patrick, K. L. 1993. Pulp & Paper Dictionary. USA: Miller Freeman, Inc.
- Liang, C.Y., and Marchessault, R. H. 1959. Infrared spectra of crystalline polysaccharides. I. Hydrogen bonds in native cellulose. J. Polymer. Sci. 37: 385-395.
- Mark, H. 1940. Intermicellar mole and tube system in fiber structure. J. Phys. Chem. 44: 764-788.
- Mathur, N. K., and Narang, C. K. 1990. Chitin and Chitosan, Versatile Polysaccharides From Marine Animal. J. of Chem. Edu. 67: 938-942.
- McGinnis, G. D., and Shafizadeh, F. 1980. Cellulose and Hemicellulose. In J. P. (ed.), Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, pp. 1-37. Vol.1, 3<sup>rd</sup> Caseyed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- McGovern, J. N. 1980. Pulping. In J. P. Casey (ed.), Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, pp. 301-492. Vol.1, 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Meyer, L. H. 1960. Fats and other lipids. In Food Chemistry. New York: Reinhold Publishing Corporation. p. 13.
- Muzzarelli, R. A. A. 1977. Chitin. Itary: Pergamon press.
- Muzzarelli, R. A. A. 1985. The Polysaccharudes. Vol. 3. Acadamic press.
- Parson, S. R. 1969. Effect of interfiber bonding on tearing strength. Tappi. 52 (7): 1262-1266.
- Perkins, R. M., and Mark, R. E. 1976. On the structure theory of the elastic behavior of paper. Tappi. 59 (12): 1024-1028.
- Preston, R. D. 1974. The Physical Biology of Plant Cell Wall. London: Chapman and Hall.

- Rinaudo, M., and Domard, A. 1989. Solution Properties of Chitosan. In G. S. Braek (ed.), Chitin and Chitosan Sources Chemistry, Biochemistry, Physical Properties, and Application, pp. 71-86. London: Elsevier Science Publisher Ltd.
- Robinson, F. V. 1980. Fiber Bonding. In J. P. Casey (ed.), Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, pp. 915-963. Vol.1, 3 rd ed. New York: John Willey & Son, Inc.
- Savidge, R. A. and Colvin, J. R. 1985. Production of cellulose and soluble polysaccharides By *Acetobacter xylinum*. Can. J. Microbiol. 31: 1019-1025.
- Seo, H., Mitsuhashi, K., and Tanibe, H. 1992. Antibacterial and Antifungal Fiber Blend by Chitosan. In C. J. Brine (ed.), Advances in Chitin and Chitosan, pp. 34-40. England: Elsevier Science Publishers Ltd.
- Slagel, R. C., and Sinkovitz, G. D. 1977. Process for Making Paper Products of Improved Dry Strength. US Patent 4,056,432.
- Tadao, O., Takafumi, M., and Minoru, A. 1995. Production of cellulose from D-Arabitol By *Acetobacter xylinum*. Biosci. Biotech. Biochem. 59 (8): 1564-1565.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 1987. Tappi Standard T456 om-87. Atlanta: USA.
- Wang, D. W. S., Gastineau, F. A., Gregorski, K. S., Tillin, S. J., and Pavlath, A. E. 1992. Chitosan – Lipid Film: Microstructure and Surface Energy. J. Agric. Food. Chem. 40: 540-544.
- Waterhouse, J. F. 1983. Paper Reinforcement by Polymer Addition. In J. P. Casey (ed.), Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, pp. 2400-2427. Vol.4, 3 rd ed. New York: John Willey & Son, Inc.
- Wei, W., Shuqin, B., Shuqing, L., and Wen, Q. 1991. Determination of the Mark-Houwink Equation for Chitosan with Different Degree of Deacetylation. J. Biol. Macromol. 13: 281-285.
- Whistler, R., and Teng, J. 1970. Cellulose chemistry. In W. B. Kenneth (ed.), Handbook of Pulp and Paper Technology, pp. 13-23. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Winterrowd, J. G., and Sandford, P. A. 1995. Chitin and Chitosan. In A. M. Stephen (ed.), Food Polysaccharides and Their Applications, pp. 441-462. New York.

- Yamanaka, S., and others. 1989. The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose. J. Mater. Sci. 24: 3141-3145.
- Yang, T. 1984. Removal of heavy metals from liquids using chitosan and fish scales. Master 's Thesis Cornell University.
- Young, J. H. 1980. Fiber Preparation and Approach Flow. In J. P. Casey (ed.), Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, pp. 822-913. Vol.2, 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Willey & Son, Inc.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

## องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ตารางที่ ก.1 ร้อยละของปริมาณไคโตเซนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตเซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ในระดับปริมาณไคโตเซนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม	ปริมาณไคโตเซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)		
	0	2	4
ปริมาณไคโตเซนในแผ่นฟิล์ม (%)	-	50.23±6.86	59.92±9.96
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตเซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์ม	-	0.01	0.02
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเซลลูโลสต่อไคโตเซนบนแผ่นฟิล์ม	-	100.23	42.35
น้ำหนักไคโตเซนในแผ่นฟิล์ม (g)	-	0.0059	0.0138

ตารางที่ ก.2 ร้อยละของปริมาณไคโตเซนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากแบคทีเรีย-ไคโตเซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ในระดับปริมาณไคโตเซนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม	ปริมาณไคโตเซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)				
	0	4	10	20	30
ปริมาณไคโตเซนในแผ่นฟิล์ม (%)	-	43.21±5.79	43.07±0.04	26.47±6.41	21.40±7.49
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตเซนต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์ม	-	0.02	0.04	0.05	0.05
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเซลลูโลสต่อไคโตเซนบนแผ่นฟิล์ม	-	59.12	24.56	21.67	19.24
น้ำหนักไคโตเซนในแผ่นฟิล์ม (g)	-	0.0100	0.0235	0.0265	0.0296

ตารางที่ ก.3 ร้อยละของปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์มเซลลูโลสจากเบคทีเรีย-ไคโตแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับปริมาณไคโตแซนระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

ปริมาณไคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)				
องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม	0	2	4	6
ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม (%)	-	78.27±0.42	72.27±7.67	100.00±0.78
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซน ต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์ม	-	0.02	0.03	0.06
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเซลลูโลส ต่อไคโตแซนบนแผ่นฟิล์ม	-	63.69	34.94	16.65
น้ำหนักไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม (g)	-	0.0092	0.0167	0.0340

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ปริมาณไคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)			
องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม	10	20	30
ปริมาณไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม (%)	63.33±0.49	45.70±0.10	45.53±0.36
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตแซน ต่อเซลลูโลสบนแผ่นฟิล์ม	0.06	0.08	0.12
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเซลลูโลส ต่อไคโตแซนบนแผ่นฟิล์ม	16.38	12.13	8.51
น้ำหนักไคโตแซนในแผ่นฟิล์ม (g)	0.0345	0.0457	0.0631

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โพลีเอทิลีนจากแบคทีเรีย-ไลโคโดแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ในระดับปริมาณไลโคโดแซนต่างๆ

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณ ไลโคโดแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)		
	0	2	4
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$30.64 \pm 0.21$	$29.60 \pm 0.62$	$30.67 \pm 0.82$
ความหนา (mm)	$0.038 \pm 0.002$	$0.040 \pm 0.002$	$0.037 \pm 0.001$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$806.62 \pm 35.40$	$746.16 \pm 39.48$	$835.74 \pm 27.21$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$81.94 \pm 4.87$	$85.45 \pm 5.90$	$105.12 \pm 2.70$
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$3.75 \pm 0.47$	$3.98 \pm 0.34$	$5.02 \pm 0.70$
ความยืด (%)	$2.78 \pm 0.22$	$3.11 \pm 0.19$	$3.68 \pm 0.18$
ยังส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$6142.11 \pm 339.47$	$7282.50 \pm 397.50$	$8262.16 \pm 486.48$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$3.69 \pm 0.37$	$3.30 \pm 0.37$	$1.79 \pm 0.28$
ความขาวสว่าง (%)	$65.30 \pm 0.28$	$54.82 \pm 0.45$	$55.81 \pm 0.59$
ความทึบแสง (%)	$40.80 \pm 2.19$	$39.34 \pm 1.50$	$39.33 \pm 2.06$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	$0.5398 \pm 0.0220$	$0.5783 \pm 0.0192$	$0.5914 \pm 0.0051$
การซึมผ่านได้ของก๊าซ ออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	4.60-13.31	47.01-28,100.00	16.37-1,250.00

ตารางที่ ก.5 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โกลจากแบคทีเรีย-โคโตแซนซึ่งผลิตโดยการเติมโคโตแซนในระดับต่าง ๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณโคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)		
	0	2	4
ดัชนีความต้านแรงดึง $c/c_0$	1.00	1.04	1.28
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ $c/c_0$	1.00	1.06	1.34
ความยืด $c/c_0$	1.00	1.12	1.32
ยั้งส์โมดูลัส $c/c_0$	1.00	1.19	1.35
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด $c/c_0$	1.00	0.89	0.49
ความยาวสว่าง $c/c_0$	1.00	0.84	0.85
ความทึบแสง $c/c_0$	1.00	0.96	0.96
การซึมผ่านไอน้ำของไอน้ำ $c/c_0$	1.00	1.07	1.10

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โพลีเอทิลีนจากแบคทีเรีย-ไลโคโดแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ในระดับปริมาณไลโคโดแซนต่างๆ

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไลโคโดแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)		
	0	4	10
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$31.85 \pm 0.30$	$30.84 \pm 0.33$	$30.81 \pm 0.32$
ความหนา (mm)	$0.039 \pm 0.002$	$0.039 \pm 0.003$	$0.039 \pm 0.001$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$810.02 \pm 33.39$	$791.05 \pm 63.57$	$792.42 \pm 31.06$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$89.15 \pm 6.66$	$87.53 \pm 7.80$	$87.61 \pm 10.26$
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$4.57 \pm 0.33$	$5.95 \pm 0.49$	$5.79 \pm 0.53$
ความยืด (%)	$3.23 \pm 0.37$	$3.97 \pm 0.48$	$3.48 \pm 0.50$
ยงส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	7269.23	7176.92	7469.23
	$\pm 438.46$	$\pm 646.15$	$\pm 469.23$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$3.19 \pm 0.30$	$2.90 \pm 0.32$	$2.67 \pm 0.35$
ความขาวสว่าง (%)	$60.95 \pm 0.32$	$59.07 \pm 0.24$	$59.18 \pm 0.44$
ความทึบแสง (%)	$41.74 \pm 1.14$	$39.91 \pm 1.59$	$39.80 \pm 1.15$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	0.4928	0.4983	0.5124
	$\pm 0.0175$	$\pm 0.0287$	$\pm 0.0289$
การซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	15.65-1,440.00	27.32-3,800.00	20.41-110.10

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	
	20	30
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$32.35 \pm 0.29$	$30.83 \pm 0.23$
ความหนา (mm)	$0.040 \pm 0.002$	$0.038 \pm 0.003$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$813.85 \pm 32.31$	$816.83 \pm 51.99$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$98.44 \pm 7.05$	$94.71 \pm 9.62$
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$6.34 \pm 0.68$	$6.60 \pm 0.56$
ความยืด (%)	$3.89 \pm 0.42$	$3.58 \pm 0.59$
ยังส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$7637.50 \pm 592.50$	$7694.74 \pm 284.21$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$2.13 \pm 0.21$	$1.88 \pm 0.24$
ความขรุขระ (%)	$54.21 \pm 0.59$	$55.03 \pm 0.14$
ความทึบแสง (%)	$42.34 \pm 1.78$	$41.67 \pm 0.87$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	$0.5271 \pm 0.0063$	$0.5201 \pm 0.0085$
การซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	265.00-310.00	4.40-221.00

ตารางที่ ก.7 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โกลจากแบคทีเรีย-ไลโคแซนซึ่งผลิตโดยการเติมไลโคแซนในระดับต่าง ๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไลโคแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)				
	0	4	10	20	30
ดัชนีความต้านแรงดึง $c/c_0$	1.00	0.98	0.98	1.10	1.06
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ $c/c_0$	1.00	1.30	1.27	1.39	1.44
ความยืด $c/c_0$	1.00	1.23	1.08	1.20	1.11
ยังส์โมดูลัส $c/c_0$	1.00	0.99	1.03	1.05	1.06
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด $c/c_0$	1.00	0.91	0.84	0.67	0.58
ความขาวสว่าง $c/c_0$	1.00	0.97	0.97	0.89	0.90
ความทึบแสง $c/c_0$	1.00	0.96	0.95	1.01	1.00
การซึมผ่านไอน้ำ $c/c_0$	1.00	1.01	1.04	1.07	1.06

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โพลีเอทิลีนจากแบคทีเรีย-ไลโคโดแซนซึ่งผลิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ในระดับปริมาณไลโคโดแซนต่างๆ

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไลโคโดแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง)		
	0	2	4
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$31.78 \pm 0.43$	$30.41 \pm 0.75$	$32.58 \pm 1.37$
ความหนา (mm)	$0.038 \pm 0.002$	$0.040 \pm 0.002$	$0.039 \pm 0.001$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$840.52 \pm 40.50$	$762.36 \pm 47.03$	$835.90 \pm 50.53$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$85.99 \pm 7.70$	$86.51 \pm 5.20$	$102.48 \pm 7.73$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$4.53 \pm 0.35$	$4.71 \pm 0.37$	$5.14 \pm 0.39$
ความยืด (%)	$3.02 \pm 0.36$	$3.35 \pm 0.28$	$3.77 \pm 0.20$
ยังส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$7515.79 \pm 410.53$	$7369.35 \pm 589.88$	$7828.38 \pm 410.28$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$3.45 \pm 0.39$	$2.63 \pm 0.36$	$2.07 \pm 0.24$
ความขาวสว่าง (%)	$63.13 \pm 0.35$	$56.93 \pm 0.24$	$57.84 \pm 0.39$
ความทึบแสง (%)	$42.76 \pm 1.38$	$45.82 \pm 1.70$	$45.52 \pm 1.01$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	$0.5097 \pm 0.0253$	$0.5645 \pm 0.0222$	$0.5633 \pm 0.0112$
การซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	22-4140	1420-2270	342-8940



ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	
	6	10
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$32.42 \pm 1.01$	$30.98 \pm 0.34$
ความหนา (mm)	$0.039 \pm 0.002$	$0.037 \pm 0.001$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$830.97 \pm 48.78$	$837.44 \pm 34.15$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$101.15 \pm 6.25$	$109.25 \pm 10.80$
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$5.48 \pm 0.33$	$6.41 \pm 0.22$
ความยืด (%)	$3.70 \pm 0.14$	$4.07 \pm 0.57$
ยังส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$7812.24 \pm 444.34$	$7921.62 \pm 437.84$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$2.05 \pm 0.48$	$2.33 \pm 0.22$
ความขรุขระ (%)	$56.58 \pm 0.35$	$56.61 \pm 0.37$
ความทึบแสง (%)	$45.38 \pm 1.04$	$45.94 \pm 1.19$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	$0.5653 \pm 0.0239$	$0.6010 \pm 0.0028$
การซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	312-1520	59-1320

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไคโตแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	
	20	30
น้ำหนักมาตรฐาน ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$30.90 \pm 0.32$	$30.44 \pm 0.45$
ความหนา (mm)	$0.037 \pm 0.001$	$0.036 \pm 0.002$
ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$830.32 \pm 20.61$	$839.51 \pm 46.51$
ดัชนีความต้านแรงดึง ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{kg}$ )	$95.15 \pm 6.19$	$86.29 \pm 14.10$
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ ( $\text{MN}/\text{kg}$ )	$6.63 \pm 0.45$	$6.31 \pm 0.24$
ความยืด (%)	$3.76 \pm 0.24$	$3.35 \pm 0.53$
ยังส์โมดูลัส ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$7216.22 \pm 421.62$	$6941.67 \pm 591.67$
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด ( $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ )	$2.15 \pm 0.24$	$2.11 \pm 0.33$
ความขรุขระ (%)	$56.48 \pm 0.24$	$54.74 \pm 0.75$
ความทึบแสง (%)	$42.48 \pm 1.06$	$41.42 \pm 1.22$
การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ( $\text{g}/\text{in}^2\cdot\text{day}$ )	$0.6096 \pm 0.0057$	$0.6038 \pm 0.0104$
การซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$ )	12-1080	47-4020

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 อัตราส่วนระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โกลจากแบคทีเรีย-ไลโคแซนซึ่งผลิตโดยการเติมไลโคแซนในระดับต่าง ๆ ต่อที่ระดับร้อยละ 0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณไลโคแซน (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)						
	0	2	4	6	10	20	30
ดัชนีความต้านแรงดึง $c/c_0$	1.00	1.01	1.19	1.18	1.27	1.11	1.00
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ $c/c_0$	1.00	1.04	1.13	1.21	1.42	1.46	1.39
ความยืด $c/c_0$	1.00	1.11	1.25	1.23	1.35	1.25	1.11
ยังส์โมดูลัส $c/c_0$	1.00	1.02	1.04	1.04	1.05	0.96	0.92
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด $c/c_0$	1.00	0.76	0.60	0.59	0.68	0.62	0.61
ความขาวสว่าง $c/c_0$	1.00	0.90	0.92	0.90	0.90	0.89	0.87
ความทึบแสง $c/c_0$	1.00	1.07	1.06	1.06	1.07	0.99	0.97
การซึมผ่านไอน้ำ $c/c_0$	1.00	1.11	1.11	1.11	1.18	1.20	1.18

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มเซลล์ โลสจากเบคทีเรีย-ไลโคโดแซนซึ่งผลิตโดยการเติมไลโคโดแซน ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ที่น้ำหนักมาตรฐานต่างๆ

	น้ำหนักมาตรฐาน (g/m <sup>2</sup> )				
สมบัติทางกายภาพ	20.84±0.41	30.98±0.34	42.05±0.40	53.55±1.66	67.15±1.84
ความหนา (mm)	0.028±0.001	0.037±0.001	0.050±0.001	0.064±0.001	0.071±0.001
ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m <sup>3</sup> )	758.16 ±43.50	837.44 ±34.15	839.15 ±20.95	834.77 ±30.03	937.41 ±42.12
ดัชนีความต้านแรงดึง (kN.m/kg)	86.93±7.14	109.25±10.8 0	99.89±4.53	112.76±2.35	107.51±8.25
ดัชนีความต้านแรงดัน ทะลุ (MN/kg)	4.16±0.53	6.41±0.22	6.35±0.37	6.54±0.40	6.23±0.39
ความยืด (%)	3.05±0.30	4.07±0.57	3.75±0.30	4.14±0.16	4.00±0.33
ยังส์โมดูลัส (MN/m <sup>2</sup> )	6045.09 ±773.16	7921.62 ±437.84	7821.49 ±442.49	8481.08 ±299.99	9961.94 ±314.16
ดัชนีความต้านแรงฉีก ขาด (N.m <sup>2</sup> /kg)	2.55±0.20	2.33±0.22	3.70±0.29	3.45±0.40	3.60±0.25
ความขาวสว่าง (%)	52.91±0.54	52.61±0.37	52.98±0.32	52.93±0.30	52.44±0.23
ความทึบแสง (%)	31.82±1.81	45.94±1.19	46.92±1.41	54.60±1.34	60.69±1.13
การซึมผ่านไอน้ำของไอ น้ำ (g/in <sup>2</sup> .day)	0.6250 ±0.0102	0.6010 ±0.0028	0.5788 ±0.0145	0.5707 ±0.0228	0.5395 ±0.0073
การซึมผ่านไอน้ำของ ก๊าซ	883.00- 896.00	59.70- 1,320.00	91.20- 4,300.00	2,220.00- 13,500.00	2.90- 311.10
ออกซิเจน (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .day.bar)					

ตารางที่ ก.11 สมบัติทางกายภาพของพลาสติกประเภทต่างๆ

สมบัติทางกายภาพ	ประเภทของพลาสติก			
	PET	PVC	PE	LLDPE
น้ำหนักมาตรฐาน (g/m <sup>2</sup> )	17.41±0.22	54.92±1.67	56.67±0.66	116.49±1.87
ความหนา (mm)	0.012±0.000	0.041±0.001	0.060±0.001	0.119±0.001
ความหนาแน่น ปรากฏ (kg/m <sup>3</sup> )	91.88±1.50	86.72±3.36	61.49±2.20	63.13±1.29
ดัชนีความต้านแรง ดึง (kNm/kg)	82.37±1.11	38.68±4.22	18.59±2.93	25.47±1.19
ดัชนีความต้านแรง ดันทะลุ (MN/kg)	15.10±0.73	6.57±0.23	1.63±0.06	1.40±0.01
ความยืด (%)	12.27±0.24	11.41±1.13	693.89±76.41	752.49±23.60
ยังส์โมดูลัส (MN/m <sup>2</sup> )	5879.70 ±133.51	465.11 ±21.56	2.54 ±0.05	3.29 ±0.04
ดัชนีความต้านแรงฉีก ขาด (Nm <sup>2</sup> /kg)	2.12±0.30	2.49±0.23	48.89±10.67	119.77±3.75
ความขาวสว่าง (%)	-	-	89.88±0.35	93.23±0.21
ความทึบแสง (%)	-	-	68.39±0.48	86.13±0.19
การซึมผ่านไอน้ำของไอ น้ำ (g/in <sup>2</sup> .day)	0.0734 ±0.0081	0.0834 ±0.0072	0.0501 ±0.0026	0.0647 ±0.0077
การซึมผ่านไอน้ำของ กาซออกซิเจน (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .day.bar)	25.05±0.78	27.34±2.06	806.00±35.36	406.00±29.70

เมื่อ ชื่อเต็มของพลาสติก PET คือ Polyethylene terephthalate

ชื่อเต็มของพลาสติก PVC คือ Polyvinyl chloride

ชื่อเต็มของพลาสติก PE คือ Polyethylene

ชื่อเต็มของพลาสติก LLDPE คือ Linear low density polyethylene

## ภาคผนวก ข

### วิธีการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุคิบ

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย คัดแปลงจากวิธี Tadao, Takafumi และ Minoru (1995)

- 1.1 นำเซลลูโลสจากแบคทีเรีย 60 กรัม ล้างน้ำและแบ่งเซลลูโลสจากแบคทีเรียออกเป็น 2 ส่วน โดยนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียส่วนแรกต้มในน้ำเดือดนาน 30 นาที (อย่างต่ำ 2 ครั้ง) จนกระทั่งน้ำที่ต้มมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง จากนั้นแช่เซลลูโลสจากแบคทีเรียในน้ำจนกระทั่งเย็น แล้ววิเคราะห์น้ำหนักแห้งโดยอบที่ 105 องศาเซลเซียส 1 คืน น้ำหนักที่ได้เรียกว่า น้ำหนัก A
- 1.2 นำเซลลูโลสจากแบคทีเรียส่วนที่เหลือต้มในน้ำเดือดนาน 30 นาที (อย่างต่ำ 2 ครั้ง) จนกระทั่งน้ำที่ต้มมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง แล้วแช่เซลลูโลสจากแบคทีเรียในน้ำจนกระทั่งเย็นเช่นเดียวกันกับข้อ 1.1 จากนั้นนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 ที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียแช่ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 0.5 นาน 2 ชั่วโมง ล้างน้ำจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง แล้ววิเคราะห์น้ำหนักแห้งโดยอบที่ 105 องศาเซลเซียส 1 คืน น้ำหนักที่ได้เรียกว่า น้ำหนัก B

#### การคำนวณ

$$\text{ปริมาณเซลล์ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนัก A} - \text{น้ำหนัก B}}{\text{น้ำหนัก A}} * 100$$

$$\text{ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนัก B}}{\text{น้ำหนัก A}} * 100$$

2. การวิเคราะห์ร้อยละการจับหมู่อะซิดิลของไคโตแซน ตามวิธี Hayes (1978)

- 2.1 นำไคโตแซน 2.5 กรัม ละลายในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 200-400 มิลลิลิตร (ขึ้นกับความหนืด) กวนโดยใช้เครื่องกวน (magnetic stirrer) ที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองแยกไคโตแซนที่ไม่ละลายออกโดยใช้ผ้าพอลิเอสเตอร์
- 2.2 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นประมาณ 18 มิลลิลิตร ลงในสารละลายไคโตแซนที่ได้อย่างช้าๆ และกวนอย่างรวดเร็วจนกระทั่งไม่มีตะกอนของไคโตแซนไฮโดรคลอไรด์ (chitosan hydrochloride) เกิดขึ้นอีก

- 2.3 กรองตะกอนไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์
- 2.4 นำตะกอนที่ได้ผสมกับเมทานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองและตรวจสอบคลอไรด์ไอออนของเมทานอลหลังการกรองด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตตามวิธีในข้อ 3 ของภาคผนวก ก ทำขั้นตอนนี้ซ้ำจนกระทั่งไม่พบคลอไรด์ไอออนในเมทานอลหลังการกรอง (อย่างต่ำ 5 ครั้ง)
- 2.5 อบตะกอนไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน จะได้ไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ สีน้ำตาลอ่อน
- 2.6 ชั่งไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ 1 กรัม (น้ำหนักแน่นอน) ละลายในน้ำ และทำให้สารละลายมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตร
- 2.7 เทสารละลายไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เพื่อนำไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานเข้มข้น 0.0876 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ และคำนวณค่าร้อยละการขจัดหมู่อะซิดของไคโตแซน

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ถ้าตะกอนไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ไตเตรตหนัก 1.0130 กรัม ละลายในน้ำ 250 มิลลิลิตร และการไตเตรตแต่ละครั้งใช้สารละลายไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ 50 มิลลิลิตร ไตเตรตพอดีกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0876 โมลาร์ ปริมาตร 7.910 มิลลิลิตร

#### วิธีทำ

ไคโตแซนไฮโดรคอลลอยด์ 1 โมล ( 197.61672 กรัม ) ทำปฏิกิริยาพอดีกับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโมโนเมอร์ที่มีหมู่ } \text{NH}_2 \text{ อิสระในตัวอย่าง 250 มิลลิลิตร} &= \frac{(0.0876 \cdot 7.910)}{1000} \cdot 5 = 3.465 \cdot 10^{-3} \text{ โมล} \\ &= (3.465 \cdot 10^{-3} \cdot 197.61672) = 0.6847 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโมโนเมอร์ที่มีหมู่ } \text{NHCOCH}_3 \text{ ในตัวอย่าง 1.0130 กรัม} &= 1.0130 - 0.6847 = 0.3283 \text{ กรัม} \\ (\text{เมื่อโมโนเมอร์ที่มี } \text{NHCOCH}_3 \text{ 1 โมล} &= 203.19296 \text{ กรัม}) = \frac{0.3283}{203.19296} = 1.616 \cdot 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโมโนเมอร์ในตัวอย่าง 1.0130 กรัม} &= 3.465 \cdot 10^{-3} + 1.616 \cdot 10^{-3} \\ &= 5.081 \cdot 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละการขจัดหมู่อะซิติลของโคโคแซน} = \frac{3.465 \times 10^{-3} * 100}{5.081 \times 10^{-3}} = \text{ร้อยละ } 68.195$$

3. การตรวจหาคลอไรด์ไอออนอย่างง่าย ตามวิธี พรทิพย์ ชัยมณี และคณะ (2534)
  - 3.1 บรรจุสารละลายที่ต้องการทดสอบลงในหลอดทดลอง 10 หยด และเติมกรดไนตริกเข้มข้น 6 โมลาร์ลงไปทีละหยดและตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัสจนกระทั่งสารละลายเป็นกรด
  - 3.2 เติมน้ำกลั่นหรือกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 10 หยด ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน ถ้ามีคลอไรด์ไอออนอยู่จะเกิดตะกอนสีขาวขึ้น
  
4. การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืดของโคโคแซน ตามวิธี Wang และคณะ (1991)
  - 4.1 เตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมอะซีเตรตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ กรดอะซิติกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ในขวดปริมาตร เพื่อใช้เป็นตัวทำละลาย
  - 4.2 เตรียมสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในสารละลายโซเดียมอะซีเตรตเข้มข้น 0.1 โมลาร์-กรดอะซิติกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เขย่าในเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง
  - 4.3 นำตัวทำละลายในข้อ 4.1 และสารละลายโคโคแซนในข้อ 4.2 กรองผ่านไมโครฟิลเตอร์ (microfilter) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในกระดาษกรอง (pore size) 0.45 ไมโครเมตร และนำมาตรวจหาเวลาในการเคลื่อนที่ของสารดังกล่าวภายในเครื่องคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์ (capillary viscometer) ที่ผ่านการทำความสะอาดอย่างดีในแต่ละครั้งของการทดสอบที่อุณหภูมิ  $30 \pm 1$  องศาเซลเซียส (ภายหลังการใช้สารทำความสะอาดล้างเครื่องคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์แล้ว ต้องนำน้ำซึ่งกรองผ่านไมโครฟิลเตอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร มาทำความสะอาด 2 ครั้ง แล้วจึงทำแห้งโดยใช้สารละลายอะซีโตนและลมร้อนจากเครื่องเป่าลมช่วยทำให้เครื่องคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์แห้งเร็วขึ้น)
  - 4.4 เจือจางสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในสารละลายโซเดียมอะซีเตรตเข้มข้น 0.1 โมลาร์-กรดอะซิติกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เพื่อให้ได้ค่า  $\eta_{sp}/c_0$  น้อยกว่า 1.3 แต่มากกว่า 1.1 จำนวน 5 ความเข้มข้น โดยวิธีประมาณจากกราฟระหว่าง  $\eta_{sp}/c_0$  ในแกน Y และความเข้มข้นของสารละลายโคโคแซนในแกน X โดยลงจุดในกราฟ 2 จุด คือที่ความเข้มข้นของสารละลายโคโคแซนเป็นร้อยละ 0 ซึ่งมีค่า  $\eta_{sp}/c_0$  เป็น 1 และที่ความเข้มข้นของสารละลายโคโคแซนเข้มข้นร้อยละ 0.1 เมื่อ  $c_0$  คือ เวลาซึ่งสารละลายโคโคแซนเคลื่อนที่ภายในเครื่องคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์ และ  $t_0$  คือเวลาซึ่งตัวทำละลายเคลื่อนที่ภายในเครื่องคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์



4.5 วัดค่า  $t_s$  ของสารละลายโคโคแซนที่เตรียมได้จากข้อ 4.4

4.6 หาค่าความหนืด (intrinsic viscosity,  $[\eta]$ ) ของสารละลายโคโคแซน โดยสร้างกราฟระหว่าง  $((t_s/t_0) - 1) / C$  ในแกน Y กับค่าความเข้มข้นของสารละลายโคโคแซนต่างๆ (C) ในแกน X ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงโดยที่  $[\eta]$  คือค่าจุดตัดแกน Y

4.7 หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจากสมการ  $[\eta] = K [M_v]^a$

เมื่อ  $[\eta]$  คือ ความหนืด (intrinsic viscosity)

$M_v$  คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด (viscosity average molecular weight)

K คือ ค่าคงที่ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (solute-solvent interaction constant) =  $1.04 \cdot 10^{-6}$

a คือ ค่าคงที่ซึ่งแสดงรูปร่างของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย (conformational constant) = 1.12

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการทดลองพบว่าค่า  $((t_s/t_0) - 1) / C$  กับค่า C มีข้อมูลเป็นไปดังที่แสดงในตารางที่ ข.1 ซึ่งจากข้อมูลนี้สามารถหาความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงได้ดังสมการที่ ข.1

$$Y = 8.9 X + 2.18 \quad R^2 = 0.90 \quad \text{สมการที่ ข.1}$$

เมื่อ จุดตัดแกน Y คือ ความหนืด (intrinsic viscosity)  $[\eta] = 2.18$

จากนั้นหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจากสมการ  $[2.18] = 1.04 \cdot 10^{-6} [M_v]^{1.12}$

ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย = 439,529 ดาลตัน

ตารางที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สารละลายไหลในคาปิลลารีวิสโคมิเตอร์กับความเข้มข้นของสารละลายโคโคแซน

C (%)	0	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
$((t_s/t_0) - 1) / C$	2.18	2.44	2.59	2.56	2.74	2.81

5. การวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดของไคโตแซน ตามวิธี ประเวศ วิศิษฎ์วุฒิกุล (2535)
  - 5.1 เตรียมสารละลายไคโตแซนเข้มข้นร้อยละ 1 ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 1 เข้าในเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
  - 5.2 วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Model DVII + Viscometer หัวเข็ม cp 41 ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ความเร็วรอบของหัวเข็ม 30 รอบต่อนาที อัตราของแรงเฉือน (shear rate)  $60 \text{ วินาที}^{-1}$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

วิธีการทดสอบสมบัติพื้นฐาน

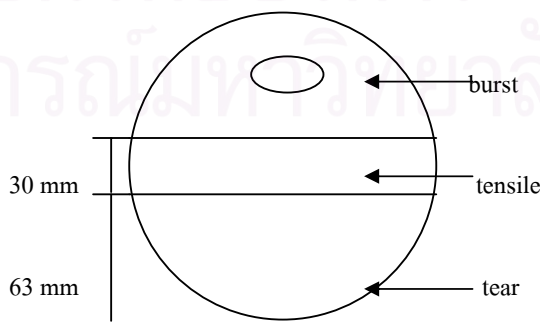
1. น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ตามวิธี ISO 536 (1976)
  - 1.1 ชั่งน้ำหนักของแผ่นฟิล์มทุกแผ่นด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Sartorius MC1 Analytic AC 2105)
  - 1.2 กำหนดน้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร) ของฟิล์ม โดยนำน้ำหนักที่ชั่งได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (200 ตารางเซนติเมตร)
2. ความหนา (thickness) ตามวิธี ISO 534 (1988)
  - 2.1 นำแผ่นฟิล์มจำนวน 5 แผ่น เรียงซ้อนกันวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (Micrometer, Lorentzen & Wettre Co., Ltd., Stockholm, Sweden) วัดเฉลี่ย 5 จุดคือ ตรงกลาง 1 จุด และบริเวณรอบๆ อีก 4 จุด
  - 2.2 นำความหนา 5 จุด มาหาค่าเฉลี่ย และคำนวณความหนาเฉลี่ย 1 แผ่น
3. ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ตามวิธี ISO 534 (1988)

การคำนวณ

$$\frac{\text{ความหนาแน่นปรากฏ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)}}{\text{ความหนา (มิลลิเมตร)}} = \frac{\text{น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)}}{\text{ความหนา (มิลลิเมตร)}}$$

วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการตัดแผ่นฟิล์มที่จะทำการทดสอบตามรูปที่ ข. 1 โดยใช้แผ่นทดสอบ 10 แผ่น สำหรับวัดสมบัติเชิงกลแต่ละค่า



รูปที่ ก. 1 การตัดแผ่นทดสอบที่จะนำไปวัดสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

4. ดัชนีความต้านแรงดึง (tensile index) ความยืด (% elongation) และ ยังส์โมดูลัส (Young 's modulus) ตามวิธี ISO 1924/2 (1994)

4.1 นำแผ่นฟิล์มที่ตัดแล้วมีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ติดไว้กับที่ยึดทั้งสองข้างของเครื่องวัดความต้านแรงดึง (Tensile Strength Tester, Lorentzen & Wettre) ที่มีระยะห่างระหว่างที่ยึดเป็น 100 มิลลิเมตร โดยที่ปลายข้างหนึ่งของแผ่นฟิล์มติดกับโหลดเซลล์ (load cell) ขนาด 500 นิวตัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งที่ยึดแผ่นฟิล์มเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 20 มิลลิเมตร/นาที จนกระทั่งฟิล์มขาด

4.2 เครื่องวัดความต้านแรงดึง จะรายงานค่าแรงที่ใช้ดึงฟิล์มจนกระทั่งขาด ร้อยละการยืดตัว และค่าความแข็งตึงของแผ่นฟิล์ม (stiffness)

#### การคำนวณ

$$\text{ดัชนีความต้านแรงดึง} = \frac{\text{ค่าแรงที่ใช้ดึงฟิล์มจนขาด (N)} * 100 \text{ (cm)}}{\text{1.5 (cm)} * \text{น้ำหนักมาตรฐาน (g/m}^2\text{)} * 1 \text{ (m)}}$$

(กิโลนิวตัน.เมตร/กิโลกรัม)

$$\text{ความยืด (ร้อยละ)} = \text{รายงานที่หน้าจอเครื่องทดสอบ}$$

$$\text{ยังส์โมดูลัส} = \frac{\text{ค่า stiffness index (MNm/kg)} * \text{น้ำหนักมาตรฐาน (g/m}^2\text{)}}{\text{ความหนา (mm)}}$$

(เมกกะนิวตัน/ตารางเมตร)

5. ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ (burst index) ตามวิธี ISO 2758 (1983)

5.1 นำแผ่นฟิล์มที่ตัดได้มาทดสอบด้วยเครื่องวัดความต้านแรงดันทะลุ (auto burst tester, tmi monitor/ burst-200 Model 13-09, Testing Machine Co., Ltd., New York, U.S.A.) ที่ได้ตั้งโปรแกรมไว้แล้ว (ความดันที่ทดสอบได้อยู่ในช่วง 0 - 1,378 กิโลปาสกาล) กดสวิทซ์ให้ลูกยางที่อยู่ใต้แผ่นฟิล์มดันฟิล์มจนแตกทะลุ

5.2 ค่าที่อ่านได้จากเครื่องเป็นค่าความต้านแรงดันทะลุมีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

#### การคำนวณ

$$\text{ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ} = \frac{\text{ความต้านแรงดันทะลุ (kPa)}}{\text{น้ำหนักมาตรฐาน (g/m}^2\text{)}}$$

(เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม)

6. ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (tear index) ตามวิธี ISO 1974 (1990)

6.1 ปรับมาตรฐานของเครื่องวัดความต้านแรงฉีกขาด (Elmendorf tearing tester, tmi monitor/ Tear Model 83-11-00, Testing Machine Inc., Amityville., New York, U.S.A.) โดยเลือก ลูกตุ้มให้เหมาะสม (1,600 มิลลินิวตัน) เพื่อให้ค่าความต้านแรงฉีกขาดได้ในเกณฑ์ที่กำหนดก่อนทำ

การทดสอบแต่ละครั้ง พร้อมกันนั้นจะต้องตรวจสอบเครื่องมือให้อยู่ในแนวระดับ โดยการปล่อย ลูกตุ้มให้แกว่งเพื่อตรวจสอบค่าที่อ่านได้ที่ตำแหน่งศูนย์ แล้วยกลูกตุ้มให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น

6.2 ใส้ฟิล์มที่จะทดสอบขนาดยาว 63 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น ให้ด้านยาวตั้งขึ้น จากนั้นใช้มีดตัดนำ ร่องของแผ่นฟิล์มยาว 20 มิลลิเมตร

6.3 กดสวิทช์เริ่มทดสอบ เครื่องจะแสดงค่าความต้านแรงฉีกขาดที่มีหน่วยเป็น มิลลินิวตัน

#### การคำนวณ

$$\text{ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (นิวตัน.ตารางเมตร/กิโลกรัม)} = \frac{\text{ความต้านแรงฉีกขาด (mN)}}{\text{น้ำหนักมาตรฐาน (g/m}^2\text{)}}$$

7. ความขาวสว่าง (brightness) ตามวิธี ISO 2470 (1971)

7.1 ทำการปรับมาตรฐานเครื่องวัดสี (Elrepho 2000 datacolor) โดยใส่อุปกรณ์เทียบมาตรฐานของสีดำ (black standard) กดสวิทช์ให้เครื่องทำการปรับมาตรฐานของสีดำ (calibrate) จากนั้นใส่อุปกรณ์เทียบมาตรฐานของสีขาว (white standard) กดสวิทช์ให้เครื่องทำการปรับมาตรฐานของสีขาว ตรวจสอบค่าต่างๆ ที่ปรากฏบนหน้าจอกับค่าจากตารางมาตรฐาน โดยค่าต่างๆ ยอมให้ผิดพลาดจากค่าอ้างอิงได้  $\pm 0.3$  กดเป็น shift 7 เพื่อเข้าสู่โปรแกรมการวัดความขาวสว่าง

7.2 นำแผ่นฟิล์มเรียงซ้อนกันแล้ววัดค่าแผ่นบน สลับแผ่นไปเรื่อยๆ จนครบทุกแผ่น เครื่องจะคำนวณอัตราส่วนร้อยละของค่าสะท้อนแสงของแผ่นฟิล์มที่แสงไม่สามารถทะลุผ่าน ต่อค่าสะท้อนแสงของวัตถุที่สะท้อนแสงได้โดยสมบูรณ์ และเครื่องจะรายงานค่าความขาวสว่างในหน่วย ร้อยละ

8. ความทึบแสง (opacity) ตามวิธี ISO 2471 (1977)

8.1 ทำการปรับมาตรฐานเครื่องวัดสี (Elrepho 2000 datacolor) โดยใส่อุปกรณ์เทียบมาตรฐานของสีดำ กดสวิทช์ให้เครื่องทำการปรับมาตรฐานของสีดำ จากนั้นใส่อุปกรณ์เทียบมาตรฐานของสีขาว กดสวิทช์ให้เครื่องทำการปรับมาตรฐานของสีขาว ตรวจสอบค่าต่างๆ ที่ปรากฏบนหน้าจอกับค่าจากตารางมาตรฐาน โดยค่าต่างๆ ยอมให้ผิดพลาดจากค่าอ้างอิงได้  $\pm 0.3$  กด shift 8 เพื่อเข้าสู่โปรแกรมการวัดความทึบแสง

8.2 นำแผ่นฟิล์ม 1 แผ่น ที่จะทดสอบวางบนพื้นสีดำ (black body) กดสวิทช์ให้เครื่องวัดการสะท้อนแสงของแผ่นฟิล์มดังกล่าว

8.3 นำแผ่นฟิล์มมาวางเรียงซ้อนกัน แล้วกดสวิทช์ให้เครื่องวัดการสะท้อนแสงของแผ่นฟิล์มในลักษณะดังกล่าว

8.4 เครื่องจะทำการหาอัตราส่วนร้อยละของค่าสะท้อนแสงของแผ่นฟิล์มชั้นเดียวซึ่งรองรับด้วยพื้นดำ ต่อค่าสะท้อนแสงของแผ่นฟิล์มที่มีความหนาพอที่แสงไม่สามารถทะลุผ่าน และเครื่องจะรายงานค่าความทึบแสงในหน่วย ร้อยละ

9. การซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water transmission) ตามวิธี พัชรี รัตนวานันท์ และรัชดา สาดตระกุล วัฒนา (2530)
  - 9.1 ชั่งถ้วย (dish) เป่าจืดน้ำหนัก
  - 9.2 ใส่สารดูดความชื้น (desiccant) ในถ้วยแล้วตัดฟิล์มเป็นวงกลม ปิดฟิล์มบนถ้วยด้วยกระดาษกาว โดยรอบไม่ให้มีรอยร้าว นำไปชั่งน้ำหนัก
  - 9.3 นำถ้วยไปเก็บไว้ในชุดอุปกรณ์ที่อ้อมด้วยไอน้ำ (humidity cabinet) ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน
  - 9.4 นำถ้วยไปชั่งน้ำหนัก

#### การคำนวณ

$$\frac{\text{การซึมผ่านได้ของไอน้ำ (กรัม/วัน.ตารางนิ้ว)}}{\text{การซึมผ่านได้ของไอน้ำ}} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (g) * 24 hr}}{\text{เวลาที่ใช้ในการทดลอง (hr) * พื้นที่ที่น้ำซึมผ่าน (in}^2\text{)}}$$

10. การซึมผ่านได้ของกาซออกซิเจน (oxygen gas permeability) ตามวิธี ASTM D 1434-82 (1994)
  - 10.1 ตัดแผ่นฟิล์มให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร ปรับสภาวะโดยเก็บแผ่นฟิล์มไว้ในเคซิเคเตอร์ที่บรรจุแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) อยู่เต็ม ที่อุณหภูมิ 23±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 48 ชั่วโมง
  - 10.2 หางส่วนบนของ permeability cell (No. CS-135-194, Custom Scientific Instruments Co., Ltd., Whippany, N.J.) พร้อมหลอดคาปิลลารีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขึ้นแล้วทาจาระบี (grease) ที่ผิวเรียบวงนอกของเซลล์และที่ประกนยาง แล้ววางกระดาษกรอง (Glass fiber paper) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ที่กึ่งกลางของเซลล์ และต้องระวังไม่ให้มีรอยย่นของแผ่นฟิล์ม
  - 10.3 วางแผ่นฟิล์มตามโดยหันเอาผิวสัมผัสที่ด้านเข้าหาคาซกระดาษกรอง และติดแผ่นฟิล์มบนจาระบี ไม่ให้มีรอยย่นหรือฟองอากาศ แล้ววางประกนยางทาให้สนิทลงบนแผ่นฟิล์ม
  - 10.4 ประกบส่วนบนของ permeability cell กับส่วนล่างของเซลล์ แล้วขันสกรูให้แน่น
  - 10.5 ต่อท่อกาซจากถังเข้ากับท่อทางเข้าของชุด permeability cell เปิดวาล์วที่ท่อกาซและปรับความดันให้กาซไหลเข้าที่ท่อทางเข้าของเซลล์ให้ได้ 2.5 บาร์ เปิดวาล์วที่ vent line และปิดวาล์วที่ permeate vent line เพื่อปล่อยกาซไหลทิ้ง แล้วปรับความดันเกจและอัตราการไหลของกาซให้ได้ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ทิ้งไว้นาน 10 นาที เพื่อปรับความดันของกาซให้สมดุล
  - 10.6 เปิดวาล์วที่ permeate vent line และปิดวาล์วที่ท่อกาซที่เข้า permeability cell เพื่อลดความดันของระบบให้เป็นศูนย์ ทิ้งไว้ 10 นาที

- 10.7 ปิดวาล์วที่ permeate vent line เครื่องจะเริ่มบันทึกระยะทางที่เคลื่อนที่ขึ้นของของเหลวสีในหลอดคาปิลลารีที่เวลาต่างๆ แล้วเครื่องจะคำนวณและรายงานค่าการซึมผ่านได้ของกาซออกซิเจนในหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร.วัน.บาร์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม

#### การวิเคราะห์ปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์ม

การวิเคราะห์ปริมาณโคโคแซนที่ค้างอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (EA1110 CHNS-O CE Instruments) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบ
  - 1.1 ตักสารมาตรฐานซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิกรัม ใส่ถ้วยดีบุก (tin capsule) แล้วพับปิดถ้วยให้สนิท นำไปวางในช่องของงานใส่ตัวอย่างช่องแรก เพื่อเป็นตัวอย่างทดลองเริ่มต้นสำหรับประเมินสภาวะที่ใช้ทดลองว่าเหมาะสมหรือไม่ (by-pass)
  - 1.2 พับถ้วยดีบุกปิดให้สนิทและนำไปวางในช่องของงานใส่ตัวอย่างช่องถัดไป เพื่อเป็น blank
  - 1.3 ตักสารมาตรฐานซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิกรัม (น้ำหนักแน่นอน) ใส่ถ้วยดีบุกแล้วพับปิดถ้วยให้สนิท 3 ตัวอย่าง โดยกำหนดให้แต่ละถ้วยมีน้ำหนักแตกต่างกัน นำไปวางในช่องของงานใส่ตัวอย่างช่องถัดไป เพื่อทำการหาปริมาณ
  - 1.4 ตักตัวอย่างโคโคแซน และตัวอย่างฟิล์มเซลล์จากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่จะทดสอบซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิกรัม (น้ำหนักแน่นอน) ใส่ถ้วยดีบุกแล้วพับปิดถ้วยให้สนิท นำไปวางในช่องของงานใส่ตัวอย่างช่องถัดไป เพื่อเป็นตัวอย่างทดสอบ (unknown)
2. เตรียมความพร้อมของเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
  - 2.1 เปิดวาล์วของถังแก๊ซออกซิเจนและฮีเลียม
  - 2.2 เปิดเครื่องวิเคราะห์ธาตุ และคอมพิวเตอร์
  - 2.3 ตั้งอุณหภูมิของเตาเผา (furnace) ตู้อบ (oven) และอัตราการไหลของแก๊ซต่างๆ
3. การวิเคราะห์ปริมาณโคโคแซนที่ค้างอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
  - 3.1 เครื่องวิเคราะห์ธาตุจะเผาตัวอย่างด้วยความร้อนจากเตาเผาและแก๊ซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ตามเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นตัวอย่างจะกลายเป็นแก๊ซที่มีองค์ประกอบเป็น ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และ/หรือ ซัลเฟอร์ ซึ่งแก๊ซต่างๆ จะถูกแก๊ซฮีเลียมพาเข้าสู่เครื่องแก๊ซโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และแสดงการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ตามพื้นที่ได้ peak ของธาตุต่างๆ ตาม retention time ของธาตุนั้นๆ ภายใน cycle ที่กำหนดไว้



- 3.2 เครื่องวิเคราะห์ธาตุจะวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆ โดยนำพื้นที่ใต้ peak ของธาตุนั้นๆ ลบกับ blank แล้วนำพื้นที่ของ peak ที่ retention time ของแต่ละธาตุมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานที่รู้ร้อยละของธาตุไนโตรเจน คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ/หรือซัลเฟอร์แน่นอนเพื่อคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างโคโคแซนและฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนต่างๆ

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ถ้าโคโคแซนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 5.5500 ฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีปริมาณโคโคแซนร้อยละ 0 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10 น้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัม/ตารางเมตร มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.5459 และฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีปริมาณโคโคแซนร้อยละ 2 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10 น้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัม/ตารางเมตร มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.6206 (พื้นที่ฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนเป็น 200 ตารางเซนติเมตร)

#### วิธีทำ

ถ้าไม่มีการรั่ว (leak) ของโคโคแซนในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์ม ฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีปริมาณโคโคแซนร้อยละ 2 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10 น้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัม/ตารางเมตร ควรจะมีปริมาณไนโตรเจน =

$$\frac{(0.5882 \cdot 0.5459)}{100} + \frac{(0.0118 \cdot 5.5500)}{100} = 3.2110 \cdot 10^{-3} + 6.5490 \cdot 10^{-4}$$

$$= 3.8659 \cdot 10^{-3} \text{ กรัม}$$

แต่ฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-โคโคแซนที่มีปริมาณโคโคแซนร้อยละ 2 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 10 น้ำหนักมาตรฐาน 30 กรัม/ตารางเมตร มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.6206 แสดง

$$\text{ว่าแผ่นฟิล์มนี้มีไนโตรเจน} = \frac{0.6206 \cdot 0.6}{100} = 3.7236 \cdot 10^{-3} \text{ กรัม}$$

แสดงว่าในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์มต้องมีการรั่วของโคโคแซนร้อยละ =  $(3.8659 \cdot 10^{-3} - 3.7236 \cdot 10^{-3}) \cdot 100$

$$\frac{6.5940 \cdot 10^{-4}}{6.5940 \cdot 10^{-4}} = 21.7285 \approx 22.73$$

แสดงว่ามีปริมาณโคโคแซนในแผ่นฟิล์มร้อยละ

$$= 100 - 22.73 = 78.27$$

แสดงว่าฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-ไลโตแซนที่มีปริมาณไลโตแซนร้อยละ 2 ของน้ำหนักเชื้อแห้งมี  
ไลโตแซนอยู่จริง =  $\frac{78.27 * 0.0118}{100} = 9.24 * 10^{-3}$  กรัม

และฟิล์มเซลล์โลสจากแบคทีเรีย-ไลโตแซนที่มีปริมาณไลโตแซนร้อยละ 2 ของน้ำหนักเชื้อแห้งมี  
เซลล์โลสอยู่จริง =  $0.60 - 9.24 * 10^{-3} = 0.59$  กรัม

ดังนั้นฟิล์มนี้จึงมีอัตราส่วนระหว่างไลโตแซนต่อเซลล์โลส =  $\frac{9.24 * 10^{-3}}{0.59} = 1.57 * 10^{-2}$

และมีอัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสต่อไลโตแซน =  $\frac{1}{1.57 * 10^{-2}} = 63.69$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

## รายการรูปประกอบ

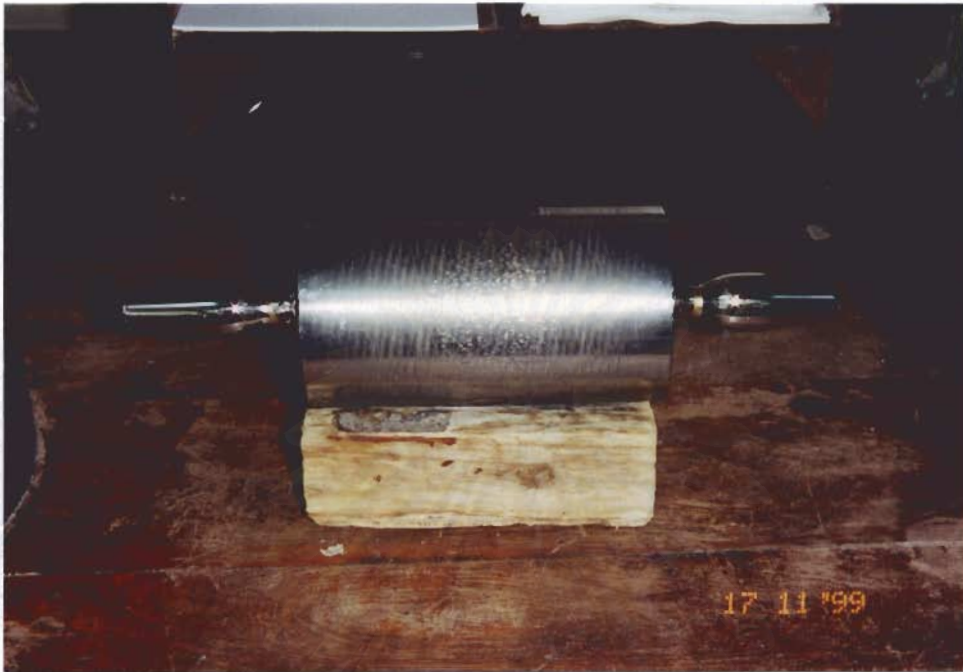


รูปที่ จ.1 เครื่องกระจายเยื่อ (disintegrator, Marvis Engineering Co., Ltd., England)



รูปที่ จ.2 เครื่องกวน (mixer, type EURO-HT D, IKA Laboratechnik)





รูป จ.4 แท่งน้ำหนัก (couch roll)



รูปที่ จ.5 เครื่องอัดแผ่นฟิล์ม (sheet press, Toyo Seiki Seisakusho, Tokyo, Japan)



สถาบันราชภัฏวชิรเวศน์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ จ.6 การทำแห้งของแผ่นฟิล์ม

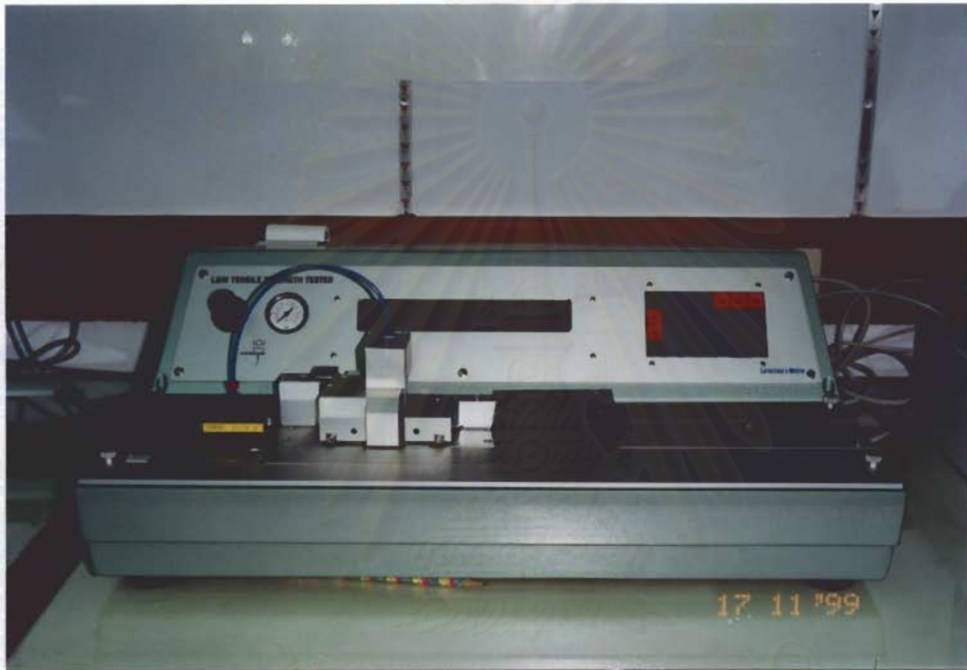


รูปที่ จ.7 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Sartorius MC1 Analytic AC 2105)





รูปที่ จ.8 เครื่องวัดความหนา (Micrometer, Lorentzen & Wettre Co., Ltd., Stock Holm, Sweden)



รูปที่ ๑.๑ เครื่องวัดความต้านแรงดึง (Tensile Strength Tester, Lorentzen & Wettre)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.10 เครื่องวัดความต้านแรงฉีกทะลุ (auto burst tester, tmi monitor/ burst-200 Model 13-09, Testing Machine Co., Ltd., New York, U.S.A.)



รูปที่ จ.11 เครื่องวัดความต้านแรงฉีกขาด (Elemendorf tearing tester, tmi monitor/Tear Model 83-11-00, Testing Machine Inc., Amityville., New York, U.S.A.)



รูปที่ จ.12 เครื่องวัดสี (Elrepho 2000 datacolor)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.13 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Model DVII + Viscometer)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

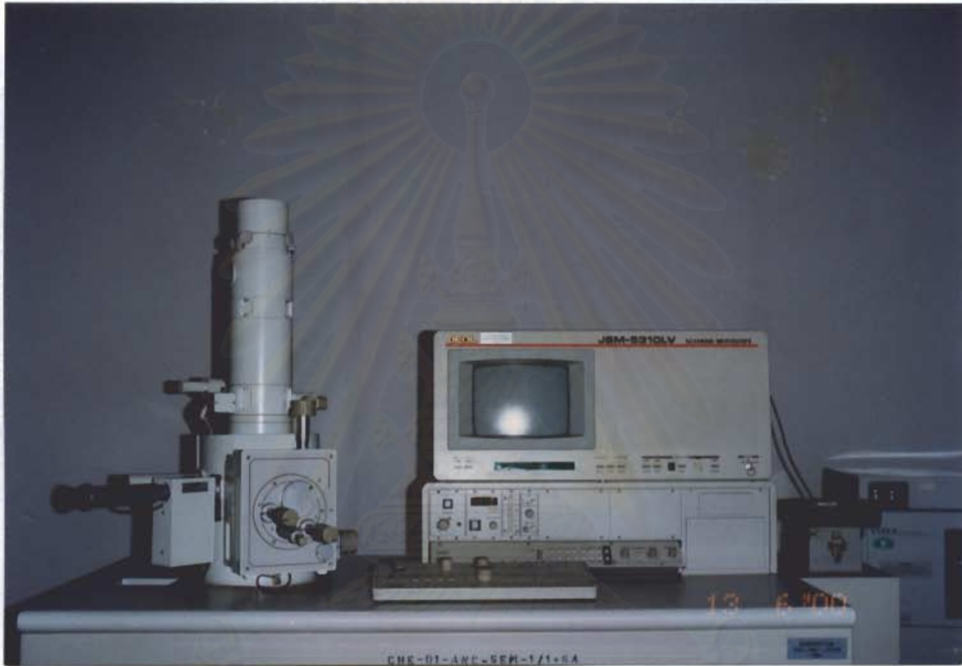


รูปที่ จ.14 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (EA1110 CHNS-O CE Instruments)



สถาบันวิทยบริการ  
รูปที่ จ.15 เครื่องฉาบทอง (Quick Auto Coater, JEOL JFC-1500 Ion Sputtering Device)  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ จ.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JSM-5310LV Scanning Microscope, JEOL)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียน

นางสาว ทิพวัลย์ วัชรอาภาณุกร เกิดวันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2517 ที่กรุงเทพมหานคร ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2540 และเริ่มศึกษาต่อปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย