

ผลของพลาสติกไซเซอร์และแทรนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มจาก
โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

นางสาวอรนันท เลิศศรีธัญญ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF PLASTICIZERS AND MICROBIAL TRANSGLUTAMINASE ON
PROPERTIES OF SOY PROTEIN ISOLATE FILM

Miss Oranun Learthsarun

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

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของพลาสติกไซเซออร์และแทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัด
โดย	นางสาวอรนันท์ เลิศศรีณีย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวณิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเธียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวณิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. วาณี ชนเห็นชอบ)

อรนันท์ เลิศศรีธัญญ์ : ผลของพลาสติกไซเซอรและทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัด. (EFFECTS OF PLASTICIZERS AND MICROBIAL TRANSGLUTAMINASE ON PROPERTIES OF SOY PROTEIN ISOLATE FILM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย. 90 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) อัตราส่วนของผสมพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอลและซอร์บิทอล) และการเติมทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัด รวมทั้งการนำฟิล์มที่พัฒนาได้ไปใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร งานวิจัยในส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 50, 55, 60, 65 และ 70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยทั่วไปพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength, TS) ของตัวอย่างฟิล์มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ความหนา ปริมาณความชื้น ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สำหรับการยืดตัวถึงจุดขาด (elongation at break, EB) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นในช่วง 50-65% แต่เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงถึง 70% EB มีค่าลดลง ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรเท่ากับ 65% ซึ่งให้ EB สูงสุดเพื่อทำการศึกษาในขั้นต่อไป งานวิจัยส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของผสมพลาสติกไซเซอรและการเติมทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเป็น 6 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 ความเข้มข้นโดยรวมของพลาสติกไซเซอรเท่ากับ 65% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พร้อมทั้งศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความหนา ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลลดลง ปริมาณความชื้น และ EB ของตัวอย่างฟิล์มมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) แต่ TS มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนส พบว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีความหนาและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณความชื้น EB และความโปร่งแสงมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้พบว่าที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 และ 80:20 การเติมทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้ฟิล์มมี TS สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 การเติมทรานส์กลูตามิเนสไม่มีผลต่อ TS ของตัวอย่างฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การติดตามการเชื่อมข้ามสายโปรตีนโดยทรานส์กลูตามิเนสโดยวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนโดยวิธี SDS-PAGE พบว่าในตัวอย่างฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนส แถบของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 84, 66 และ 45 kDa ซึ่งได้แก่หน่วยย่อยแอลฟาไพรม์ แอลฟา และเบต้า ของเบต้า-คอนไกลูซินมีความเข้มข้นลดลง และปรากฏแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ด้านบนของเจล ส่วนอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อความเข้มของแถบโปรตีน จากงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัดมี TS และ EB ที่สูง โดยมีค่าเท่ากับ 1.23 MPa และ 244.31% ตามลำดับ จึงเลือกตัวอย่างฟิล์มดังกล่าวไปศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นและใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร (กล้วยกวน) จากเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นพบว่าตัวอย่างฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในอัตราที่ต่ำในช่วงวอเตอร์แอกทิวิตีเท่ากับ 0.1-0.8 ในส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มดังกล่าวเปรียบเทียบกับกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีการเพิ่มขึ้นของค่ากรดไฮโดรอกซิดในอัตราที่ต่ำกว่ากล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน ทั้งนี้เนื่องมาจากฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนที่ต่ำกว่าฟิล์มพอลิพรอพิลีน

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5072611723 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : PROTEIN FILM/ SOY PROTEIN ISOLATE/ PLASTICIZER/ TRANSGLUTAMINASE

ORANUN LEARTHSARUN : EFFECTS OF PLASTICIZERS AND MICROBIAL TRANSGLUTAMINASE ON PROPERTIES OF SOY PROTEIN ISOLATE FILM. ADVISOR : THANACHAN MAHAWANICH, Ph. D., CO-ADVISOR : ASST. PROF. KIATTISAK DUANGMAL, Ph. D., 90 pp.

This research aimed to study the effects of plasticizer (glycerol) concentration, plasticizer ratio (glycerol-to-sorbitol) and microbial transglutaminase on properties of soy protein isolate film, as well as the application of such film to food product. The effect of different glycerol concentrations (50, 55, 60, 65 and 70% by weight of soy protein isolate) on film properties was investigated in the first part of this study. In general, as glycerol concentration increased, the film tensile strength (TS) was found to significantly decrease ($p \leq 0.05$) while the film thickness, moisture content, transparency and water vapor permeability were found to significantly increase ($p \leq 0.05$). Increased elongation at break (EB) with increasing glycerol concentration was demonstrated in the 50-65% glycerol concentration range. However, the film containing 70% glycerol possessed lower EB than that containing 65% glycerol. The film containing 65% plasticizer, which yielded the highest EB, was therefore chosen for further study. The second part of this research aimed to examine the effects of plasticizer ratio and transglutaminase treatment on properties of soy protein isolate film. Six different glycerol-to-sorbitol ratios (100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 and 20:80) as well as the addition of 4 units of transglutaminase/g soy protein isolate were used in this study. Different plasticizer ratios did not significantly affect film thickness, transparency and water vapor permeability ($p > 0.05$). Meanwhile, decreases in moisture content and EB, together with an increase in TS, were observed in those films with decreasing glycerol concentration. For the effect of transglutaminase treatment, the enzyme-treated films were higher in thickness and water vapor permeability, while lower in moisture content, EB and transparency, as compared to the untreated films ($p \leq 0.05$). At the glycerol-to-sorbitol ratios of 100:0 and 80:20, transglutaminase-treated film exhibited increased TS. However, no significant difference ($p > 0.05$) in TS was observed between the enzyme-treated and untreated films with glycerol-to-sorbitol ratios of 60:40, 50:50, 40:60 and 20:80. Protein pattern as studied using SDS-PAGE showed a decrease in band intensity of 84, 66 and 45 kDa proteins, corresponding to the α' -, α - and β -subunits of soy β -conglycinin, with a presence of proteins of higher molecular weight at the top of the gel. On the other hand, different plasticizer ratios appeared to have no effect on the protein pattern. From this study, the film with glycerol-to-sorbitol ratio of 80:20 which was treated with 4 units of transglutaminase/g soy protein isolate exhibited high values of both TS and EB (1.23 MPa and 244.31%, respectively). The film sample was therefore used to investigate moisture sorption isotherm and storage stability of a food product (*Gluy Guan*, banana-and-coconut milk candy). From moisture sorption isotherm, the soy protein isolate film exhibited reduced rate of moisture change in the 0.1-0.8 water activity range. *Gluy Guan* wrapped with the soy protein isolate film demonstrated slower changes in moisture content, water activity, hardness and color than the unwrapped one. However, the rates of these changes were still higher as compared to that wrapped with polypropylene film. Interestingly, thiobarbituric acid value was lower in *Gluy Guan* wrapped with the soy protein isolate film, as compared to that wrapped with polypropylene film. This coincided with lower oxygen permeability of the soy protein isolate film.

Department : Food Technology Student's Signature

Field of Study : Food Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิด ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด รวมถึงตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเธียร อาจารย์ ดร. ซาลีดา บรมพิชัยชาติกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. วาณี ชนเห็นชอบ ที่ให้ความรู้ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพี่อ้อด เสกสรร วงศ์ศิริ สำหรับคำแนะนำด้านเทคนิคการทำ SDS-PAGE

ขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนปริญญาโทภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวกและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และความห่วงใยพร้อมทั้งสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์ให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 फिल्मย่อยสลายได้.....	3
2.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตฟิล์มและสารเคลือบ (coating) ที่ย่อยสลายได้	3
2.1.2 การผลิตฟิล์มโปรตีน	4
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน.....	4
2.1.4 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน	5
2.1.4.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนโดยใช้สารเคมี	5
2.1.4.2 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนโดยใช้เอนไซม์	10
2.2 แทรนส์กลูทามิเนส	11
2.3 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	14
2.3.1 การผลิตโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	14
2.3.2 การเกิดเป็นฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	15
2.4 พลาสติไซเซอร์	15
3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	20
3.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตฟิล์ม	20
3.1.2 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตกัวยกวน	20
3.1.3 สารเคมี.....	20
3.2 อุปกรณ์.....	21
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	22
3.3.1 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	22
3.3.2 ผลของอัตราส่วนของพลาสติไซเซอร์และการเติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์	
ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	23

บทที่	หน้า
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	24
3.3.3.1 ความหนา	24
3.3.3.2 ปริมาณความชื้น	24
3.3.3.3 สมบัติเชิงกล.....	25
3.3.3.4 ความโปร่งแสง.....	25
3.3.3.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ.....	25
3.3.3.6 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง	26
3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและรูปแบบของแถบโปรตีน (protein pattern) ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	26
3.3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีน	26
3.3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี modified Lowry.....	27
3.3.4.3 การวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนด้วย SDS-PAGE	28
3.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้น (moisture sorption isotherm) ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	29
3.3.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กัด้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	30
3.3.6.1 ปริมาณความชื้น	30
3.3.6.2 วอเตอร์แอกทิวิตี.....	31
3.3.6.3 ความแข็ง.....	31
3.3.6.4 สี.....	31
3.3.6.5 ค่ากรดไโอบาพิทริก.....	31
3.3.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	32
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.1 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	33
4.1.1 ความหนา.....	33
4.1.2 ปริมาณความชื้น	34
4.1.3 ความต้านทานแรงดึงขาด	35
4.1.4 การยืดตัวถึงจุดขาด.....	36
4.1.5 ความโปร่งแสง	38
4.1.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ	39
4.2 ผลของอัตราส่วนของพลาสติกไฮเซอรและคาร์ตีเมแทนส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	40

บทที่	หน้า
4.2.1 ความหนา.....	41
4.2.2 ปริมาณความชื้น.....	42
4.2.3 ความต้านทานแรงดึงขาด.....	43
4.2.4 การยืดตัวถึงจุดขาด.....	45
4.2.5 ความโปร่งแสง.....	46
4.2.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ.....	48
4.2.7 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง.....	49
4.3 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมแทนนินสกัดจาก จุลินทรีย์.....	55
4.4 พฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	59
4.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กัถั่วถั่วที่ห่อด้วยฟิล์ม โปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	60
4.5.1 ปริมาณความชื้น.....	60
4.5.2 วอเตอร์แอคทิวิตี.....	61
4.5.3 ความแข็ง.....	62
4.5.4 สี.....	63
4.5.5 ค่ากรดไทโอบาบิฟูริก.....	65
5 สรุปผลการทดลอง.....	67
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	80
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐาน.....	82
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอล	22
3.2 ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์และ ไม่เติมแทนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์	24
3.3 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียมสารละลาย separating gel เข้มข้น 10% และสารละลาย stacking gel เข้มข้น 4%	28
3.4 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียม electrophoresis buffer ปริมาตร 3,000 ml	29
3.5 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียม staining solution และ destaining solution ปริมาตร 1,000 ml	29
4.1 ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปร อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	55
ค.1 สมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	83
ค.2 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและ ไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	83
ค.3 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	84
ค.4 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	84
ค.5 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	84
ค.6 ความโปร่งแสงของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	85
ค.7 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส	85
ค.8 พฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีน	85
ค.9 ปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	86
ค.10 วอเตอร์แอกทิวิตีในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	86
ค.11 ความแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	87

ตารางที่	หน้า
ค.12 ค่า L^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	87
ค.13 ค่า a^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	88
ค.14 ค่า b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	88
ค.15 ค่ากรดไธโอบาบิฟูริกในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนและไทโรซีน และพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยกันเอง	6
2.2 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับกลูทาราลดีไฮด์ โดยเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยกันเอง	7
2.3 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับไกลออกซัล โดยไกลออกซัลทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยกันเอง แต่สำหรับอาร์จินีน ไกลออกซัลจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่กวินิดิเนียมได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบวงซึ่งไม่มีบทบาทในการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน	7
2.4 กรดเฟอูลิก	9
2.5 กรดแทนนิน	10
2.6 การเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนโดยการทำงานของแทรนส์กลูทามิเนส .	11
2.7 กลีเซอรอล	16
2.8 ซอร์บิทอล	16
4.1 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	34
4.2 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	35
4.3 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	35
4.4 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	37
4.5 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	39
4.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ	40
4.7 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	41
4.8 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	42
4.9 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	44
4.10 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	45
4.11 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	47
4.12 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามิเนส	48

รูปที่	หน้า
4.13 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	50
4.14 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	50
4.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 20:80 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	51
4.16 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล เท่ากับ 100:0 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลือง สกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	52
4.17 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล เท่ากับ 80:20 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลือง สกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	53
4.18 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล เท่ากับ 20:80 ที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนสและเติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลือง สกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	53
4.19 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 และ 80:20 ที่เติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	57
4.20 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลเท่ากับ 50:50 และ 20:80 ที่เติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	58
4.21 เส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ ซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ 25 °C.....	59
4.22 ปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม.....	60
4.23 วอเตอร์แอคทิวิตีในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม.....	61
4.24 ความแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม.....	62

รูปที่	หน้า
4.25 ค่า L^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	64
4.26 ค่า a^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	64
4.27 ค่า b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์ม พอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	65
4.28 ค่ากรดไฮโดรบาบิฟูริกในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลือง สกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม	66
ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี modified Lowry	82

บทที่ 1

บทนำ

บรรจุภัณฑ์มีบทบาทที่สำคัญในการรักษาคุณภาพและควบคุมการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บรักษา ที่ผ่านมามีวัสดุจากปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิเอสเตอร์ พอลิเมทิล ไดร์บได้รับความนิยมในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อย่างมาก เนื่องจากมีวัตถุดิบในปริมาณมากและมีราคาต่ำ นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุประเภทนี้ยังมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ได้แก่ ความแข็งแรง การป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ออกซิเจน และสารระเหยได้อื่นๆ รวมทั้งการปิดผนึกได้ด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามวัสดุจากปิโตรเลียมย่อยสลายได้ยากจึงไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการในแง่การรักษาสิ่งแวดล้อมและการกำจัดขยะซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน จึงมีความพยายามในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์มย่อยสลายได้ (biodegradable film) จากพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน สำหรับฟิล์มโปรตีนได้มีการนำโปรตีนต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบ เช่น คอลลาเจน เจลาติน โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากปลา เคราติน โปรตีนไข่ขาว เคซีน เวย์โปรตีน ซีน กลูเตน โปรตีนถั่วลิสง โปรตีนเมล็ดฝ้าย รวมถึงโปรตีนถั่วเหลือง (Krochta, 2002) ฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไปมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ไอสารอินทรีย์ และน้ำมันค่อนข้างดี อย่างไรก็ตามฟิล์มโปรตีนมีข้อจำกัดสำคัญในด้านสมบัติเชิงกลและการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Chambi and Grosso, 2006; Jiang *et al.*, 2007) สำหรับความพยายามในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนได้มีการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์เพื่อทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสายพอลิเพปไทด์ มีรายงานว่าการใช้สารเคมี เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์และกลูทาราลดีไฮด์ สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีหลักฐานยืนยันความปลอดภัยของฟิล์มที่เติมสารเคมีเหล่านี้ (Carvalho and Grosso, 2004; Jiang *et al.*, 2007) การใช้เอนไซม์เพื่อเร่งการเกิดพันธะเชื่อมข้ามจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ แทรนส์กลูตามิเนส (transglutaminase) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยกลูตามีนและไลซีนของสายพอลิเพปไทด์ จึงสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของโปรตีนที่สัมพันธ์กับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายพอลิเพปไทด์ เช่น ความแข็งแรงของเจล (สุนันทาทรงกัลยาณวัตร, 2550; Lauber, Henle and Klostermeyer, 2000) และความแข็งแรงของฟิล์ม (Motoki *et al.*, 1987; Di Pierro *et al.*, 2007; Tang and Jiang, 2007)

เนื่องจากฟิล์มโปรตีนส่วนใหญ่มีความเปราะซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ในการผลิตฟิล์มโปรตีนจึงมักมีการเติมพลาสติกไซเซอร์เพื่อทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

พลาสติกไซเซอรที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน โพลีโพรพิลีน ไนลอน แซกคาไรด์ ไดแซกคาไรด์ และโพลิโกลิแซกคาไรด์ (Galiotta *et al.*, 1998; Lim, Mine and Tung, 1998) ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรมีผลโดยตรงต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม ได้แก่ ความต้านทานเชิงกล (mechanical resistance) ความยืดหยุ่น (extensibility) ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (flexibility) และสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของสารต่างๆ (barrier property)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) อัตราส่วนของผสมพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอลและซอร์บิทอล) และการเติมแทนส์กลูทามีนเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด รวมทั้งการนำฟิล์มที่พัฒนาได้ไปใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้

สำหรับงานวิจัยนี้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ หมายถึงพอลิเมอร์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพจากธรรมชาติ (naturally occurring biopolymer) ซึ่งถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ มีเทน และกากชีวมวล (biomass residue) (Anonymous, 1993) โดยมีได้หมายความรวมถึงพอลิเมอร์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ (synthetic biodegradable polymer) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทำหน้าที่หลากหลาย ได้แก่ ป้องกันการซึมผ่านของสารต่างๆ (เช่น ความชื้น ออกซิเจน ไอสารอินทรีย์ และน้ำมัน) เป็นตัวพา (carrier) ของสารต่างๆ (เช่น สารยับยั้งจุลินทรีย์ และสารยับยั้งออกซิเดชัน) ให้ความแข็งแรงเชิงกล และปรับปรุงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ (เช่น ความเงา และสี) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้มีข้อดีคือสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ในภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดต่าง สารอาหาร และออกซิเจนที่เหมาะสม จึงช่วยลดมลภาวะซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกตระหนักอยู่ในปัจจุบัน

2.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตฟิล์มและสารเคลือบ (coating) ที่ย่อยสลายได้

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มและสารเคลือบที่ย่อยสลายได้มี 3 ชนิดหลัก ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ ลิพิด และโปรตีน

พอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุประสงค์ในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ เช่น แอลจีเนต เพกติน คาราจีแนน สตาร์ช สตาร์ชไฮโดรไลเสต เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส รวมทั้งเส้นใย (สารประกอบเชิงซ้อนของเซลลูโลสและลิกนิน) (Tharanathan, 2003) เนื่องจากพอลิแซ็กคาไรด์มีหมู่เคมีที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) อยู่ในปริมาณมาก ฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์จึงมีข้อจำกัดในด้านการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ อย่างไรก็ตาม พอลิแซ็กคาไรด์บางชนิดที่สามารถเกิดเป็นเจลได้สามารถช่วยป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ในช่วงอายุการเก็บรักษาสั้นๆ (Kester and Fennema, 1986)

สำหรับลิพิดนั้นไม่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแต่มักใช้เป็นสารเคลือบ สารเคลือบลิพิดนิยมใช้มากกับผลไม้สด โดยช่วยลดการเสียดสีของผิวผลไม้ระหว่างการขนส่ง ป้องกันการเกิดสีน้ำตาล และลดการสูญเสียน้ำ นอกจากนี้เนื่องจากลิพิดมีสมบัติไม่ชอบน้ำ

(hydrophobic) จึงมีการนำมาใช้ในการผลิตเป็นฟิล์มเชิงประกอบร่วมกับพอลิแซ็กคาไรด์หรือโปรตีนเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ลิพิดที่นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นฟิล์มย่อยสลายได้ ได้แก่ ไขผึ้งและไขคาร์นูบา (Tharanathan, 2003)

ฟิล์มโปรตีนมีสมบัติในด้านการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ไอสารอินทรีย์ และน้ำมันค่อนข้างดี แต่มีข้อจำกัดสำคัญในด้านสมบัติเชิงกลและการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Chambi and Grosso, 2006; Jiang *et al.*, 2007) โปรตีนที่มีการนำมาผลิตเป็นฟิล์มย่อยสลายได้ ได้แก่ คอลลาเจน เจลาติน โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากปลา ไคติน เคราติน โปรตีนไข่ขาว เคซีน เวย์โปรตีน ซีน กลูเตน โปรตีนถั่วลิสง โปรตีนเมล็ดฝ้าย รวมทั้งโปรตีนถั่วเหลือง (Krochta, 2002; Tharanathan, 2003)

2.1.2 การผลิตฟิล์มโปรตีน

การผลิตฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไปเริ่มจากการเตรียมสารละลายโปรตีนและปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เหมาะสมสำหรับโปรตีนแต่ละชนิด จากนั้นจึงเติมพลาสติกไซเซอร์แล้วให้ความร้อน โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนแตกต่างกันไปตามชนิดของโปรตีน การปรับค่าความเป็นกรดต่างและการให้ความร้อนมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โมเลกุลของโปรตีนเสียสภาพธรรมชาติบางส่วน เกิดการคลายตัวออกและมีการปรากฏของหมู่เคมีต่างๆ ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาที่จำเป็นต่อการเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของสายพอลิเพปไทด์ (Oakenfull, Pearce and Burley, 1997) หลังจากให้ความร้อนแล้วจึงนำสารละลายไปขึ้นรูปเป็นแผ่นบางแล้วจึงระเหยตัวทำละลายออกบางส่วน ฟิล์มที่ได้มีองค์ประกอบหลักคือพอลิเพปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง รวมทั้งตัวทำละลายและวัตถุเจือปน (additive) ที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม ดังนั้นอันตรกิริยาในการเกิดเป็นฟิล์มจะมีทั้งอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยกันเอง (ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจน) และอันตรกิริยาของโมเลกุลพอลิเมอร์กับโมเลกุลอื่น เช่น พลาสติกไซเซอร์ ซึ่งชนิดของอันตรกิริยาขึ้นกับชนิดของหมู่เคมีของโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง (Banker, 1966)

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน

ปัจจัยหลายประการมีผลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน ได้แก่

1. โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของโปรตีน น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของโมเลกุลโปรตีนมีผลโดยตรงต่อสมบัติของฟิล์ม โดยโปรตีนที่เป็นพอลิเมอร์สายยาวจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลได้ดี หมู่ที่มีขั้วบนโมเลกุลโปรตีนสามารถเกิดพันธะ

ไฮโดรเจนและพันธะไอออนิกระหว่างกัน ในขณะที่หมู่ที่ไม่มีขั้วสามารถเกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกได้ (Banker, 1966)

2.การละลายหรือการแขวนลอยของโปรตีน โปรตีนที่มีความสามารถในการละลายหรือแขวนลอยสูงจะกระจายตัวอยู่ในสารละลายที่ใช้เตรียมฟิล์มได้ดี ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลได้ดี (Banker, 1966)

3.ภาวะในการเตรียมฟิล์ม อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่สารละลายมีผลต่อการเสถียรภาพธรรมชาติและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเพปไทด์ในเวลาต่อมา นอกจากนี้อัตราการทำแห้งฟิล์มยังส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มด้วยการทำแห้งฟิล์มอย่างรวดเร็วจะทำให้โมเลกุลพอลิเพปไทด์รวมตัวกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโครงสร้างเหล่านี้มีขนาดใหญ่ ฟิล์มที่ได้จะมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และทำให้การซึมผ่านของสารต่างๆ เพิ่มสูงขึ้น (Jiang et al., 2007)

2.1.4 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน

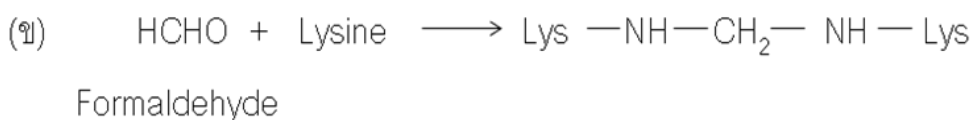
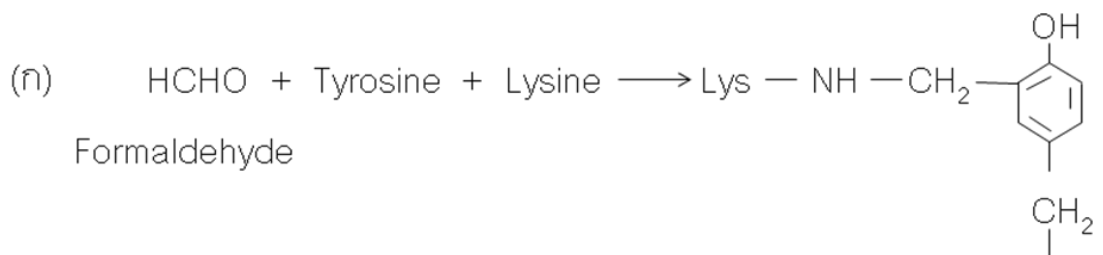
เนื่องจากฟิล์มโปรตีนมีข้อจำกัดสำคัญในด้านสมบัติเชิงกล จึงมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งวิธีที่ใช้กันมาก ได้แก่ การใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้สารเคมีอาจมีปัญหาด้านความเป็นพิษ จึงมีความพยายามในการใช้วิธีที่มีความปลอดภัยมากกว่า ซึ่งการใช้เอนไซม์เป็นวิธีหนึ่งที่มีรายงานว่าสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนได้และมีความปลอดภัยสูง

2.1.4.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนโดยใช้สารเคมี

โครงสร้างของโปรตีนโดยทั่วไปมีหมู่สายข้างจำนวนมากซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดอันตรกิริยาทางเคมี การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน (cross-linking agent) โดยสารเคมีที่มีการใช้กันมาก ได้แก่ แอลดีไฮด์และไดแอลดีไฮด์ เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์และกลูทาราลดีไฮด์ อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานยืนยันความปลอดภัยของการใช้สารเคมีเหล่านี้ (Cao, Fu and He, 2007)

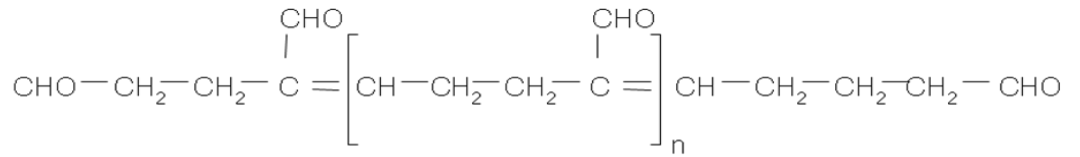
Marquié และคณะ (1997) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไลซีนที่เกิดปฏิกิริยาได้ (reactive lysine) เพื่อติดตามการเกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนในฟิล์มโปรตีนเมล็ดฝ้ายด้วยฟอรัมาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัล (glyoxal) โดยแปร

อัตราส่วนโมลาร์ (molar ratio) ของสารเชื่อมข้ามต่อไลซีนที่เกิดปฏิกิริยาได้ตั้งแต่ 0-44 พบว่าเมื่อระดับการเชื่อมข้ามเพิ่มสูงขึ้น ไลซีนที่เกิดปฏิกิริยาได้มีปริมาณลดลง ชนิดของสารเชื่อมข้ามมีผลสำคัญต่อค่าแรงสูงสุดที่ใช้เจาะฟิล์ม (maximum puncture force) โดยพบว่าฟอร์มาลดีไฮด์มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มแรงสูงสุดที่ใช้เจาะฟิล์ม แม้ว่าฟอร์มาลดีไฮด์จะเกิดปฏิกิริยากับไลซีนเพียง 50% จากปริมาณไลซีนทั้งหมด ในขณะที่กลูทาราลดีไฮด์ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับไลซีนเกือบ 100% จากปริมาณไลซีนทั้งหมด แต่ให้ฟิล์มที่มีค่าแรงสูงสุดที่ใช้เจาะต่ำกว่า ผลที่ได้นี้ถูกศึกษาในรายละเอียดต่อมาโดย Marquié (2001) ซึ่งรายงานว่าการเกิดพันธะเชื่อมข้ามในฟิล์มโปรตีนเมล็ดฝ้ายอันเนื่องมาจากฟอร์มาลดีไฮด์พบว่ามีหน่วยย่อยกรดอะมิโนที่เกี่ยวข้อง 2 ชนิด ได้แก่ ไลซีนและไทโรซีน ความแข็งแรงที่สูงของฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์เป็นผลมาจากทั้งพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนและไทโรซีน (รูปที่ 2.1 ก) และพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง (รูปที่ 2.1 ข) ส่วนกลูทาราลดีไฮด์เกิดปฏิกิริยาได้กับไลซีนเท่านั้นจึงทำให้เกิดเพียงพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง (รูปที่ 2.2) ในขณะที่ไกลออกซัลแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้กับทั้งไลซีนและอาร์จินีน แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของฟิล์มคือการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง (รูปที่ 2.3 ก) ในส่วนของอาร์จินีนแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้กับไกลออกซัล แต่ไม่มีบทบาทในการเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน เนื่องจากหมู่กวินิดิเนียมของอาร์จินีนเมื่อเกิดปฏิกิริยากับไกลออกซัลจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบวง (cyclized product) (รูปที่ 2.3 ข)



รูปที่ 2.1 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ โดยเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนและไทโรซีน (ก) และพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง (ข)

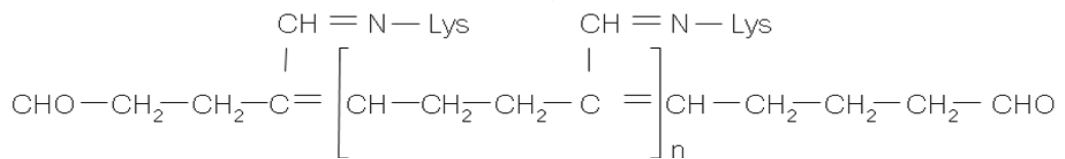
ที่มา: ดัดแปลงจาก Marquié (2001)



Polymerized glutaraldehyde under alkaline conditions

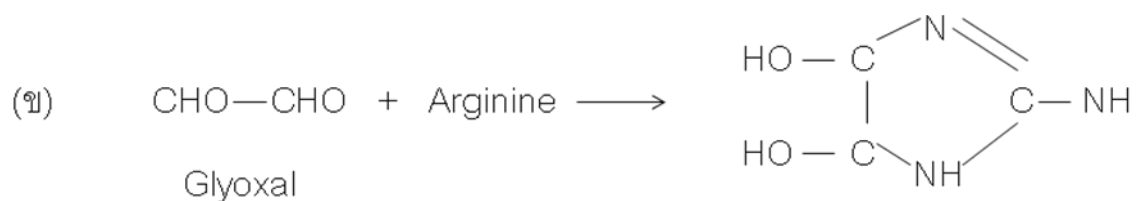
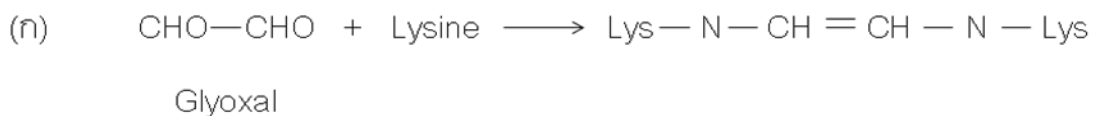
+

Lysine



รูปที่ 2.2 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับกลูทาราลดีไฮด์ โดยเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Marquié (2001) และ Migneault และคณะ (2004)



รูปที่ 2.3 พันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากับไกลออกซัล โดยไกลออกซัลทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนด้วยตัวเอง (ก) แต่สำหรับอาร์จินีนไกลออกซัลจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบวง ซึ่งไม่มีบทบาทในการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน (ข)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Marquié (2001)

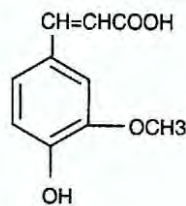
Parris และ Coffin (1997) ศึกษาผลของการเติมสารเชื่อมข้าม ได้แก่ พอร์มาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ต่อสมบัติของฟิล์มชีน พบว่าการเติมสารเชื่อมข้ามสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength, TS)

ของฟิล์มได้ 2-3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมสารเชื่อมข้าม โดยฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และอีพิกลอโรไฮดรินมีค่า TS เท่ากับ 28.9, 21.4 และ 19.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารเชื่อมข้าม (10.9 MPa) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนการยืดตัวถึงจุดขาด (elongation at break, EB) ของฟิล์มที่เติมกลูทาราลดีไฮด์ มีค่าเท่ากับ 4.1% ซึ่งไม่แตกต่างจากฟิล์มที่ไม่เติมสารเชื่อมข้าม (3.4%) ($p > 0.05$) ในขณะที่ฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์และอีพิกลอโรไฮดรินมีค่า EB เท่ากับ 2.4 และ 2.1% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารเชื่อมข้ามอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

Rhim และคณะ (2000) ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยเติมฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 3 และ 5% ของสารละลายฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์ทั้งสองระดับมีค่า TS ไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมฟอร์มาลดีไฮด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดย TS มีค่าอยู่ในช่วง 8.2-8.3 MPa อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 5% มีค่า EB และความหนาสูงกว่าฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 3% และฟิล์มควบคุม ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 3% มีค่า EB และความหนาไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

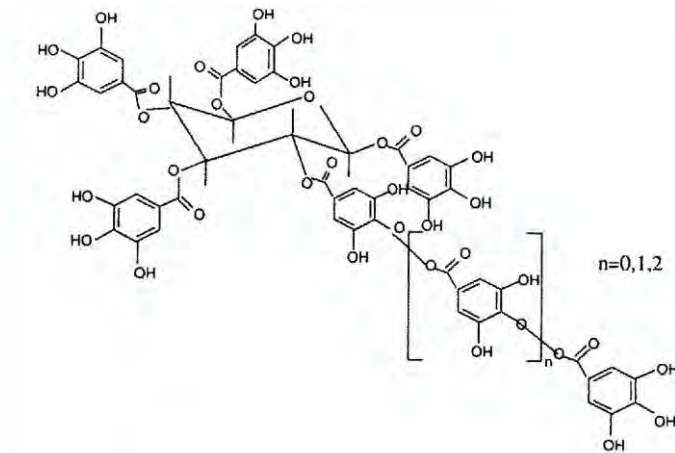
Carvalho และ Grosso (2004) ศึกษาผลของการเติมสารเชื่อมข้ามต่อสมบัติของฟิล์มเจลาติน สารเชื่อมข้ามที่ศึกษา ได้แก่ ฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 8.8 mmol/สารละลายฟิล์ม 100 ml และไกลออกซัลเข้มข้น 26.5 mmol/สารละลายฟิล์ม 100 ml พบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของฟิล์มเจลาติน โดยฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์มีค่า TS สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.10 MPa ในขณะที่ฟิล์มที่เติมไกลออกซัลมีค่า TS เท่ากับ 14.97 MPa ซึ่งไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมสารเชื่อมข้าม (15.12 MPa) อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยนี้พบว่าการเติมสารเชื่อมข้ามไม่มีผลต่อค่า EB ของฟิล์มเจลาติน โดยฟิล์มที่เติมสารเชื่อมข้ามและฟิล์มควบคุมมีค่า EB อยู่ในช่วง 37.70-39.24% ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สำหรับสภาพให้ซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability) ฟิล์มที่เติมฟอร์มาลดีไฮด์และไกลออกซัลมีค่าสภาพให้ซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ 0.155 และ 0.174 g mm/m² h kPa ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าฟิล์มควบคุม (0.198 g mm/m² h kPa) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนสภาพให้ซึมผ่านไอน้ำของออกซิเจน (oxygen permeability) ของฟิล์มทุกตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 22.62-23.16 cm³ μm/m² dia kPa

เนื่องจากการใช้แอลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมข้ามอาจมีปัญหาในด้านความเป็นพิษ จึงมีความพยายามในการใช้สารเคมีอื่นที่มีความเป็นพิษต่ำกว่า กรดเฟอร์ulik (ferulic acid) (รูปที่ 2.4) เป็นกรดฟีนอลิกที่เป็นองค์ประกอบตามธรรมชาติของผนังเซลล์พืชหลายชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต อาร์ทิโช๊ค กาแฟ แอปเปิ้ล ถั่วลิสง ส้ม และสับปะรด กรดเฟอร์ulik และออกไซด์ของกรดเฟอร์ulik คือ ควินอยด์เฟอร์ulik แอซิด เกิดปฏิกิริยาได้กับกรดอะมิโนบางชนิด เช่น ไทโรซีน ไลซีน ฮิสทีน และทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน (Ou and Kwok, 2004) Ou และคณะ (2005) ศึกษาผลของการเติมกรดเฟอร์ulik ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรความเข้มข้นของกรดเฟอร์ulik เป็น 4 ระดับ ได้แก่ 50, 100, 150 และ 200 mg/สารละลายฟิล์ม 100 g พบว่ากรดเฟอร์ulik เข้มข้น 100 mg/สารละลายฟิล์ม 100 g เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมซึ่งให้ฟิล์มที่มีค่า TS และ EB ที่สูง โดยฟิล์มที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.0 และ 9.0 มีค่า TS เท่ากับ 1.622 และ 2.602 MPa ตามลำดับ และมีค่า EB เท่ากับ 85.1 และ 165.3% ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 กรดเฟอร์ulik

กรดแทนนิน (tannin acid) (รูปที่ 2.5) เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้เป็นสารเชื่อมข้าม กรดแทนนินเป็นกรดพอลิฟีนอลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและสามารถเชื่อมข้ามโมเลกุลโปรตีนได้ Cao และคณะ (2007) ศึกษาการใช้กรดเฟอร์ulik และกรดแทนนินเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเจลาติน โดยแปรปริมาณกรดเฟอร์ulik และกรดแทนนิน ตั้งแต่ 0-40 mg/g เจลาติน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเชื่อมข้ามเพิ่มสูงขึ้น TS มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ EB มีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า TS ของฟิล์มที่เติมกรดเฟอร์ulik มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่เติมกรดแทนนินที่ความเข้มข้นเท่ากัน ตัวอย่างเช่นฟิล์มที่เติมกรดเฟอร์ulik และกรดแทนนินเข้มข้น 40 mg/g เจลาตินมีค่า TS ประมาณ 96 และ 88 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 กรดแทนนิน

2.1.4.2 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนโดยใช้เอนไซม์

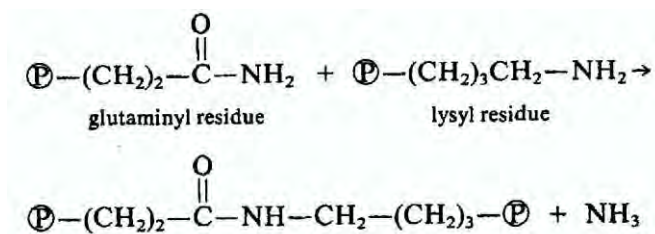
การใช้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนได้ ข้อดีของการใช้เอนไซม์คือมีความจำเพาะสูงทั้งในแง่ความจำเพาะต่อสับสเตรท ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ยังใช้ภาวะที่ไม่รุนแรงและควบคุมปฏิกริยาได้ง่ายกว่าการใช้สารเคมี อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มมีข้อจำกัดสำคัญในด้านต้นทุนของเอนไซม์ (Cao และคณะ, 2007) แทรนส์กลูตามิเนสเป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.2 นอกจากนี้จากแทรนส์กลูตามิเนสแล้วยังมีการใช้เอนไซม์อื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์อื่นนอกจากแทรนส์กลูตามิเนสเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด

เพอร์ออกซิเดสเป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่สามารถเชื่อมข้ามโมเลกุลโปรตีนได้ การเกิดปฏิกริยาของโปรตีนกับเพอร์ออกซิเดสและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทำให้เกิดออกซิเดชันของหน่วยย่อยของโปรตีน โดยไทโรซีนเป็นหน่วยย่อยที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกริยากับเพอร์ออกซิเดสมากที่สุด (Matheis and Whitaker, 1984) ซึ่งยืนยันได้จากการที่นำโปรตีนที่เกิดการเชื่อมข้ามด้วยเพอร์ออกซิเดสมาไฮโดรไลส์ด้วยกรดจะได้ไทโรซีน (dityrosine) และเทอร์ไทโรซีน (tertyrosine) เป็นผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างการใช้เพอร์ออกซิเดสเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโปรตีน ได้แก่ งานวิจัยของ Stuchell และ Krochta (1994) ซึ่งใช้เพอร์ออกซิเดสจากฮอร์สแรดซ์ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ใช้เพอร์ออกซิเดสในอัตราส่วน 1:1000 โดยน้ำหนักของโปรตีน พบว่าฟิล์มที่เติมเพอร์ออกซิเดสมีค่า TS เพิ่มขึ้น

ในขณะที่ค่า EB ลดลง ผู้วิจัยเสนอว่านอกจากเพอร์ออกซิเดสจะช่วยให้เกิดการเชื่อมข้ามแล้ว ยังทำให้เกิดดีเกรเดชันของโปรตีนด้วย

2.2 แทรนส์กลูตามิเนส

แทรนส์กลูตามิเนส (E.C.2.3.2.13, protein-glutamine γ -glutamyltransferase) เป็น เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย้ายหมู่เอซิลของแกมมา-คาร์บอกซีเอมีดบนหน่วยย่อยกลูตามีนซึ่ง ทำหน้าที่เป็นตัวให้หมู่เอซิล (acyl donor) ไปยังหมู่อะมิโนปฐมภูมิหรือเอพซิลอน-อะมิโนของ หน่วยย่อยไลซีนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับหมู่เอซิล (acyl acceptor) เกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อม ข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน เรียก ϵ -(γ -glutamyl)lysine isopeptide bond (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนโดยการทำงานของ แทรนส์กลูตามิเนส

ที่มา: Matheis และ Whitaker (1984)

จากความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้มีความเป็นไปได้สูงในการนำ แทรนส์กลูตามิเนสมาประยุกต์ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของโปรตีน โดยการเชื่อมข้ามของ โมเลกุลโปรตีนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งเชิงกายภาพและเชิงหน้าที่ เช่น ความสามารถในการเกิดเจล ความหนืด ความเสถียรต่อความร้อน ความสามารถในการอุ้มน้ำ รวมทั้งความสามารถในการเกิดเป็นฟิล์ม

แทรนส์กลูตามิเนสพบได้ทั่วไปในเนื้อเยื่อและของเหลวในร่างกายของสัตว์ชั้นสูง โดย ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่างๆ ในร่างกาย เช่น การแข็งตัวของเลือด กระบวนการสร้าง เซลล์ผิวหนังและเยื่อหุ้มเซลล์ การควบคุมการเจริญเติบโต และการเพิ่มจำนวนของเซลล์ (Aeschlimann and Paulsson, 1994) อย่างไรก็ตามการสกัดแทรนส์กลูตามิเนสจากสัตว์และ การทำให้บริสุทธิ์นั้น มีขั้นตอนค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้เอนไซม์ที่ได้มีราคาสูง (Motoki and Segero, 1998) จึงมีความพยายามเสาะหาแหล่งที่สามารถผลิตเอนไซม์ได้ในปริมาณมาก การผลิตแทรนส์กลูตามิเนสโดยใช้จุลินทรีย์เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากใช้เพียง เทคโนโลยีการหมักที่ไม่ซับซ้อนและสามารถผลิตเอนไซม์ได้ในปริมาณมาก

แทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ในทางการค้าส่วนใหญ่ผลิตโดยใช้ *Streptoverticillum mobaraense* (Ando et al., 1989; Wachizu et al., 1994) จุลินทรีย์ชนิดนี้ผลิตแทรนส์กลูตามิเนสและหลั่งออกสู่ภายนอกเซลล์ การสกัดเอนไซม์จึงทำได้ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำให้เซลล์แตกออก นอกจากนี้ยังให้ผลผลิตในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับการสกัดจากแหล่งอื่น ลักษณะเด่นของแทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ที่แตกต่างจากแทรนส์กลูตามิเนสจากแหล่งอื่นคือ ไม่ต้องการ Ca^{2+} ในการเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แทรนส์กลูตามิเนสทั่วไปจำเป็นต้องมี Ca^{2+} เป็นโคแฟกเตอร์ (Motoki and Seguro, 1998) สมบัติดังกล่าวนับว่าเป็นข้อได้เปรียบในการนำแทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ เนื่องจากโปรตีนหลายชนิด เช่น เคซีน ไมโอซิน รวมถึงโปรตีนโกลบูลินของถั่วเหลือง สามารถเกิดการตกตะกอนได้ในภาวะที่มี Ca^{2+} ในแง่การผลิตฟิล์มโปรตีน ได้มีการศึกษาผลของการใช้แทรนส์กลูตามิเนสที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนต่างๆ ดังนี้

Mariniello และคณะ (2003) ศึกษาผลของการเติมแทรนส์กลูตามิเนสในฟิล์มเชิงประกอบจากเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน (defatted soy flour) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีค่า TS เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า EB ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ โดยฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีค่า TS และ EB เท่ากับ 12.4 MPa และ 7.2% ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์มีค่า TS และ EB เท่ากับ 6.8 MPa และ 11.6% ตามลำดับ

Carvalho และ Grosso (2004) ศึกษาสมบัติของฟิล์มเจลาตินที่เติมแทรนส์กลูตามิเนส พบว่าฟิล์มที่เติมแทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 10 หน่วย/g โปรตีนมีค่า TS ไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมแทรนส์กลูตามิเนสและฟิล์มควบคุมมีค่า TS เท่ากับ 14.63 และ 15.12 MPa ตามลำดับ ฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีค่า EB และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีค่า EB และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ 33.21% และ 0.120 g mm² h kPa ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มควบคุมมีค่า EB และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ 39.24% และ 0.198 g mm² h kPa ตามลำดับ ฟิล์มที่เติมเอนไซม์และฟิล์มควบคุมมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนเท่ากับ 22.86 และ 22.62 ml μm² dia kPa ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

Di Piero และคณะ (2005) ศึกษาสภาพให้ซึมผ่านได้ของฟิล์มเชิงประกอบจากเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันที่เติมแทรนส์กลูตามิเนส พบว่าการเติมเอนไซม์ทำให้

สภาพให้ซึมผ่านได้ของฟิล์มมีค่าลดลง โดยฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำเท่ากับ 38.5, 74.6 และ 316.3 $\text{cm}^3 \mu\text{m}/\text{m}^2 \text{ day kPa}$ ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ดังกล่าวเท่ากับ 449.8, 854.3 และ 549.5 $\text{cm}^3 \mu\text{m}/\text{m}^2 \text{ day kPa}$ ตามลำดับ ในด้านความหนา ฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีความหนาเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 94.8 μm เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 79.3 μm

Chambi และ Grosso (2006) ศึกษาฟิล์มบริเวณโคโคที่ได้ผลิตจากเคซีนและเจลาตินที่เชื่อมข้ามด้วยทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 10 หน่วย/g โปรตีน แปรอัตราส่วนของเคซีนต่อเจลาตินเป็น 5 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 พบว่าฟิล์มทุกตัวอย่าง (ยกเว้นอัตราส่วน 75:25) มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมทรานส์กลูตามิเนส โดยฟิล์มที่ใช้อัตราส่วน 100:0 และเติมเอนไซม์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงที่สุดคือ 7.5 $\text{g mm}/\text{m}^2 \text{ day kPa}$ นอกจากนี้เมื่อเติมเอนไซม์ TS ของฟิล์มทุกตัวอย่างมีค่าลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของเคซีนต่อเจลาตินต่างกัน ($p>0.05$) ในขณะที่ EB มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเอนไซม์ โดยฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของเคซีนต่อเจลาตินเท่ากับ 75:25 และเติมเอนไซม์มีค่า EB สูงที่สุดเท่ากับ 56.79%

Di Piero และคณะ (2006) ศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเชิงประกอบจากโคโคซานและเวย์โปรตีน พบว่าฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีค่า TS เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่า EB ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ ในด้านสมบัติการให้ซึมผ่านได้ ฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนและไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์

Yi และคณะ (2006) ศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินปลา พบว่าเมื่อเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 10 หน่วย/g โปรตีน ฟิล์มที่เติมเอนไซม์มี TS เพิ่มขึ้นจาก 48.03 เป็น 68.00 MPa และสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 7.24 เป็น 17.69 $\text{cm}^3 \text{m}/\text{m}^2 \text{ day}$ อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมทรานส์กลูตามิเนสไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ในด้านความขุ่น (opacity) พบว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์มีความขุ่นสูงกว่า (2.87%) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ (1.43%)

Jiang และคณะ (2007) รายงานว่าการเติมทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (4-10 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด) ทำให้ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า TS เพิ่มขึ้นจาก 3.75 เป็น 3.98 MPa ในขณะที่ EB มีค่าลดลงจาก 124.5 เป็น 108.1% ส่วน

ปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญคือมีค่าอยู่ในช่วง 21.3-21.6% เมื่อเติม แทรนส์กลูตามิเนสในระดับความเข้มข้นสูงขึ้นไป (20-60 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด) พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า TS, EB และปริมาณความชื้นลดลงจาก 2.29 เป็น 0.95 MPa, 84.4 เป็น 57.4% และ 21.2 เป็น 19.1% ตามลำดับ

Tang และ Jiang (2007) ศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าเมื่อเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 8 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ฟิล์มที่ได้มีความหนาและ TS เพิ่มขึ้นจาก 0.083 เป็น 0.101 mm และ 3.6 เป็น 4.3 MPa ตามลำดับ ส่วน EB มีค่าลดลงจาก 120.3 เป็น 111.3% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์

Bruno และคณะ (2008) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเคซีนด้วยทรานส์กลูตามิเนสและรายงานว่าการเพิ่มปริมาณทรานส์กลูตามิเนสจาก 0 เป็น 8.3 mg/g โซเดียมเคซีนเต ตัวอย่างฟิล์มมี TS เพิ่มขึ้นจาก 3.5 เป็น 6.5 MPa ส่วน EB มีแนวโน้มลดลงจาก 167 เป็น 134%

2.3 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SOY PROTEIN ISOLATE)

เมล็ดถั่วเหลืองเป็นแหล่งสำคัญของโปรตีน ประกอบด้วยโปรตีนสูงถึงประมาณ 40% โดยน้ำหนักแห้ง จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนหลายประเภท เช่น แป้งถั่วเหลืองที่มีอนุภาคขนาดต่างๆ (soy flour and grit) โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อเทียม (textured soy protein)

2.3.1 การผลิตโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

โปรตีนถั่วเหลืองสกัดผลิตโดยนำถั่วเหลืองที่สกัดไขมันออกแล้วมาปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วง 7-9 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50-55 °C แยกส่วนที่ไม่ละลายน้ำออกไปซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ จากนั้นนำเอาส่วนสารละลายมาปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วงไอโซอิเล็กทริกของโปรตีน (ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 4.5) แล้วจึงนำตะกอนโปรตีนที่ได้มาล้างด้วยน้ำ หากนำตะกอนมาทำให้แห้งเลยจะได้เป็น isoelectric soy protein isolate แต่หากนำตะกอนที่ล้างแล้วมาละลายน้ำโดยปรับภาวะให้เป็นกลางก่อน แล้วจึงนำไปทำให้แห้งจะได้เป็น neutralized soy protein isolate ซึ่งละลายน้ำได้ดีกว่า ผลิตภัณฑ์โปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ได้มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 90% มีสีและกลิ่นเฉพาะตัว ไม่มีกลิ่นรสของถั่วเหลือง มีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน มีปริมาณไขมันและ

คาร์โบไฮเดรตต่ำ โปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลาย ได้แก่ การละลาย ความสามารถในการอุ้มน้ำ การเป็นอิมัลซิไฟเออร์ การจับไขมัน การเกิดโฟม การเกิดเจล รวมถึงการเกิดเป็นฟิล์ม จึงมีการนำมาโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมาใช้ในการอาหารหลายชนิด (Zayas, 1997; United Soybean Board, 2004)

2.3.2 การเกิดเป็นฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

โปรตีนถั่วเหลืองสกัดประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด ได้แก่ ไกลซินิน และเบต้า-คอนไกลซินิน ซึ่งเป็นโปรตีนประเภทโกลบูลิน ทั้งไกลซินินและเบต้า-คอนไกลซินินมีโครงสร้างถึงระดับจตุรภูมิ ในการเกิดเป็นฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองจำเป็นต้องทำให้โปรตีนเหล่านี้เกิดการเสียสภาพธรรมชาติบางส่วน (partial denaturation) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C ทำให้เกิดการคลายตัวของโมเลกุลโปรตีน เป็นผลให้หมู่ซัลไฟไฮดริลและหมู่ไฮโดรโฟบิกที่อยู่ภายในปรากฏขึ้นที่ด้านนอกของโมเลกุล ในระหว่างที่สารละลายฟิล์มแห้งตัวลง สายพอลิเพปไทด์ที่คลายตัวเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน และเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (Anonymous, 1997) อันตรกิริยาระหว่างสายพอลิเพปไทด์นี้ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟิล์มได้

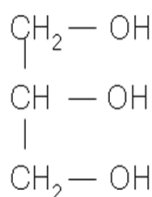
2.4 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์เป็นวัตถุเจือปนที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ฟิล์ม โดยสมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่เป็นที่ต้องการคือ สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม มีจุดเดือดสูง ระเหยได้ยาก และละลายในตัวทำละลายที่ใช้เตรียมฟิล์มได้ดี (Banker, 1966) เมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ลงในสารละลายที่ใช้เตรียมฟิล์ม โมเลกุลพลาสติไซเซอร์จะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยพันธะทุติยภูมิ ได้แก่ อันตรกิริยาไฮโดรเจนและพันธะไฮโดรเจน ซึ่งอันตรกิริยาเหล่านี้มีค่าพลังงานพันธะต่ำกว่าพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยตัวเอง มีผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ลดลงและฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

ฟิล์มโปรตีนบางชนิด เช่น ฟิล์มเวย์โปรตีน ฟิล์มซีเรียล ฟิล์มโปรตีนถั่วลิสง รวมทั้งฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองมีลักษณะที่เปราะ ทำให้จำกัดการนำไปใช้ประโยชน์ ในการผลิตฟิล์มโปรตีนเหล่านี้จึงมักมีการเติมพลาสติไซเซอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้ พลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ พอลิแอลกอฮอล์

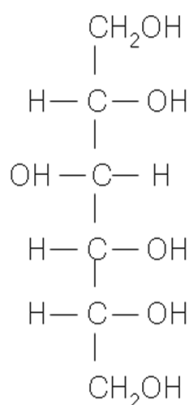
โมโนแซกคาไรด์ ไดแซกคาไรด์ และโอลิโกแซกคาไรด์ สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาพลาสติกไซเซออร์ 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล

กลีเซอรอลหรือกลีเซอริน (รูปที่ 2.7) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 3 อะตอม มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ มีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ โมลาร์แมสเท่ากับ 92 g/mol มีจุดเดือดที่ $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และละลายได้ในน้ำ E number ของกลีเซอรอลคือ E422



รูปที่ 2.7 กลีเซอรอล

ซอร์บิทอล (รูปที่ 2.8) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 6 อะตอม มีหมู่ไฮดรอกซิล 6 หมู่ มีสูตรโมเลกุล $C_6H_{14}O_6$ โมลาร์แมสเท่ากับ 182 g/mol มีจุดเดือดที่ $296\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของแข็ง เป็นผลึกสีขาวหรือไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และละลายได้ในน้ำ E number ของกลีเซอรอลคือ E420



รูปที่ 2.8 ซอร์บิทอล

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาการใช้พลาสติกไซเซออร์ในฟิล์มโปรตีนนั้น Mahmoud และ Savello (1992) ศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มเวียโปรตีน โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วง 0.2-2.0% ของเวียโปรตีน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ

กลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.0 เป็น 27.5% และความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 75 เป็น 125 μm

Gontard, Guilbert และ Cuq (1993) ศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อความต้านทานแรงเจาะทะลุ (puncture strength) ของฟิล์มกัญชง โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วง 0-33.3 g/100 g ของแห้ง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 15.0-33.3 g/100 g ของแห้ง ความต้านทานแรงเจาะทะลุมีค่าลดลงจาก 2.00 เป็น 0.25 N และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.00345 เป็น 0.00545 g mm/cm² day

McHugh และ Krochta (1994) ศึกษาผลของซอร์บิทอลและกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มเวย์โปรตีน แปรความเข้มข้นของซอร์บิทอลเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักของเวย์โปรตีน และแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 15 และ 30% โดยน้ำหนักของเวย์โปรตีน พบว่าที่ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลและกลีเซอรอลเข้มข้น 30% มีค่า TS ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลมีค่า EB และสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนสูงกว่าฟิล์มที่เติมซอร์บิทอล

McHugh, Aujard and Krochta (1994) ศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มเวย์โปรตีน โดยใช้พลาสติกไซเซออร์ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล และซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 37.5 และ 50.0% โดยน้ำหนักของเวย์โปรตีน พบว่าที่ความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เท่ากัน ฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลและกลีเซอรอลอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มที่ใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดเดียวกัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้น สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

Gennadios และคณะ (1996) ศึกษาสมบัติของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวที่เติมกลีเซอรอล พอลิเอทิลีนไกลคอล และซอร์บิทอล โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 20, 40 และ 50% โดยน้ำหนักของโปรตีน และแปรความเข้มข้นของพอลิเอทิลีนไกลคอลและซอร์บิทอลเป็น 50 และ 60% โดยน้ำหนักของโปรตีน พบว่าฟิล์มที่เติมซอร์บิทอล 50% มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำที่สุด ฟิล์มที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล 60% มีค่า EB สูงที่สุด และฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลและฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลมีค่า TS สูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเท่ากัน

Jangchud และ Chinnan (1999) ศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วลิสง แปรระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.67, 1.17 และ 1.67 g/g โปรตีนถั่วลิสง พบว่า TS ของฟิล์มทุกตัวอย่างใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.10-5.14 MPa ค่า EB เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 105.00, 124.50 และ 163.93% ตามลำดับ ส่วนสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มทั้งสามตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

Cho และ Rhee (2002) แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เติมลงในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.3, 0.5 และ 0.7 g/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และรายงานว่ามีปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น TS ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าลดลง ในขณะที่ EB และปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 0.7 g/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า EB และปริมาณความชื้นสูงที่สุด

Sobral, Santos และ Garcia (2005) ศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากปลานิล โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วง 15-65 g/100 g โปรตีน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น TS มีค่าลดลง ในขณะที่ EB มีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานว่าการเพิ่มความหนืดของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น

Bourtoom และคณะ (2006) ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากโปรตีนที่ละลายน้ำได้จากน้ำล้างปลาจากการผลิตซูริมิ พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล แปรความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 25, 50 และ 75% พบว่า TS มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลมีค่า TS สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอลตามลำดับ โดยฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 25% มีค่า TS สูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.14 MPa ในขณะที่ EB มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลมีค่า EB สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลและซอร์บิทอลตามลำดับ โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 75% มีค่า EB สูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 61.01% สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลและฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงที่สุด โดย

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำที่สุด โดยฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 25% มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ $30.41 \text{ g mm/m}^2 \text{ day kPa}$

Bourtoom (2008) ศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอรต์ต่อสมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ชข้าวและโคโคซาน โดยใช้พลาสติกไฮเซอรต์ 3 ชนิด ได้แก่ ซอร์บิทอล กลีเซอรอล และ พอลิเอทิลีนไกลคอล และแปรความเข้มข้นของพลาสติกไฮเซอรต์ในช่วง 20-60% พบว่าฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 20% มีค่า TS สูงที่สุด (26.06 MPa) และมีค่า EB และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำที่สุด (7.36% และ $5.45 \text{ g mm/m}^2 \text{ day kPa}$ ตามลำดับ)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัสดุดิบสำหรับผลิตฟิล์ม

โปรตีนถั่วเหลืองสกัด เกรดสำหรับอาหาร (บริษัท ไมท์ดี อินเทอร์เน็ตชั่นแนล จำกัด, กรุงเทพฯ)

แพรอนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ ACTIVA™ TG-AK เกรดสำหรับอาหาร (บริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ จำกัด, กรุงเทพฯ)

3.1.2 วัสดุดิบสำหรับผลิตกัลวยกวน

กัลวย่น้ำว้าสุก (ตลาดสดสามย่าน, กรุงเทพฯ)

เกลือป่นเสริมไอโอดีน ตรารุ่งทิพย์ (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, นครราชสีมา)

น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ตรามิตรผล (บริษัท รวมเกษตรกรรมอุตสาหกรรม จำกัด, ชัยภูมิ)

น้ำตาลมะพร้าว (ร้านสุทธิพันธ์, กรุงเทพฯ)

หัวกะทิยูเอชที ตรารอภัย-ดี (บริษัท ไทย อกริ ฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน), สมุทรปราการ)

3.1.3 สารเคมี

Acrylamide gel, 40% solution, AR grade (Pharmacia, Uppsala, Sweden)

Ammonium persulfate, AR grade (USB Corporation, Cleveland, OH)

Bromophenol blue, AR grade (USB Corporation, Cleveland, OH)

Butan-1-ol, AR grade (Univar, Seven Hills, Australia)

Coomassie blue R-250, AR grade (Fluka, Buchs, Switzerland)

Copper (II) sulfate, AR grade (Univar, Seven Hills, Australia)

Ethanol, 95%, AR grade (Carlo Erba Reagenti, Rodano, Italy)

Folin-Ciocalteu's phenol reagent, AR grade (Carlo Erba Reagenti, Rodano, Italy)

Glycine, AR grade (USB Corporation, Cleveland, OH)

N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED), AR grade (USB Corporation, Cleveland, OH)

2-mercaptoethanol, AR grade (Loba Chemie, Mumbai, India)

Potassium sodium tartrate, AR grade (Univar, Seven Hills, Australia)

Protein molecular weight marker, wide range (molecular weight 6,500-200,000 Da), AR Grade (Sigma-Aldrich, Munich, Germany)

Sodium carbonate anhydrous, AR grade (Univar, Seven Hills, Australia)

Sodium dodecyl sulfate (SDS), AR grade (USB Corporation, Cleveland, OH)

Sodium hydroxide anhydrous, pellets, AR grade (Carlo Erba Reagenti, Rodano, Italy)

2-thiobarbituric acid (Sigma-Aldrich, Steinheim, Germany)

Tris-(hydroxymethyl)-methylamine, AR grade (Fisher Scientific, Leicestershire, UK)

3.2 อุปกรณ์

Color meter system, Chroma meter CR-400 series (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan)

Gel electrophoresis system (รุ่น miniVE, Hoefer, Holliston, MA)

Homogenizer, model X10/25 (Ystral, Ballrechten-Dottingen, Germany)

Laboratory hot air oven, model 600 (Memmert, Schwabach, Germany)

Micrometer, model 7301 (Mitutoyo, Tokyo, Japan)

Scanning electron microscope, model JSM-5410 LV (JEOL, Tokyo, Japan)

Shaking water bath, model SW23 (Julabo Labortechnik GMBH, Seelbach, Germany)

Ultrasonic bath, UltrasonikTM, model 136H (Fisher Scientific, Schwerte, Germany)

Universal materials testing machine, Instron[®], model 5565 (Instron, Norwood, MA)

UV/Vis spectrophotometer, model V-530 (Jasco, Easton, MD)

Water activity meter, AquaLab[®], series 3TE (Decagon Devices, Pullman, WA)

3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

เตรียมฟิล์มถั่วเหลืองสกัดโดยดัดแปลงจากวิธีของ Jiang และคณะ (2007) โดยเตรียมสารละลายของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 5.0 g ในสารละลายบัฟเฟอร์ Tris-HCl เข้มข้น 0.05 โมลาร์ (ค่าความเป็นกรดต่าง 8.0) ปริมาตร 100.0 ml ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 50, 55, 60, 65 และ 70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอล

ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (% โดยน้ำหนักของโปรตีน ถั่วเหลืองสกัด)	ส่วนผสม		
	โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (g)	กลีเซอรอล (g)	Tris-HCl (ml)
50	5.0	2.50	100.0
55	5.0	2.75	100.0
60	5.0	3.00	100.0
65	5.0	3.25	100.0
70	5.0	3.50	100.0

เตรียมสารละลายฟิล์มโดยละลายโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในสารละลายบัฟเฟอร์ Tris-HCl จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน เติมพลาสติกไซเซอร์แล้วนำสารละลายฟิล์มมาโฮโมจีไนส์ด้วย Ystral homogenizer (รุ่น X10/25, Ballrechten-Dottingen, Germany) จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่สารละลายฟิล์มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น SW23, Julabo Labortechnik GMBH, Seelbach, Germany) ที่ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลาย

ฟิล์มที่ได้ไปกำจัดฟองอากาศโดยใช้ ultrasonic bath (รุ่น 136H, Fisher Scientific, Schwerte, Germany) แล้วจึงขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยบีเบ็ดสารละลายฟิล์ม 25 ml ลงบนจานเลี้ยงเชื้อ (Petri dish) ที่ทำด้วยแก้วซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 mm วางจานเลี้ยงเชื้อที่บรรจุสารละลายฟิล์มไว้บนพื้นระนาบ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออกและนำไปเก็บรักษาในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 2 วัน ก่อนนำมาวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มตามข้อ 3.3.3.1-3.3.3.5 วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design, CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ

3.3.2 ผลของอัตราส่วนของพลาสติกไฮเซอรและ การเติม แทรนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

ศึกษาผลของอัตราส่วนของพลาสติกไฮเซอร 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล และการเติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยเลือกความเข้มข้นของพลาสติกไฮเซอรในข้อ 3.3.1 ที่ให้ค่า EB สูงที่สุดมาใช้ในการเตรียมฟิล์ม แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 (โดยจากการทดลองก่อนการวิจัยพบว่าการใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 0:100 ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเปราะมากและไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากพื้นผิวที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มได้โดยที่ฟิล์มไม่แตก) ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของพลาสติกไฮเซอรและไม่เติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 3.2 สำหรับตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูทามิเนสเตรียมฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดตามวิธีการในข้อ 3.3.1

สำหรับตัวอย่างฟิล์มที่เติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ใช้ส่วนผสมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและของผสมพลาสติกไฮเซอรเช่นเดียวกับตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูทามิเนส (ตารางที่ 3.2) อย่างไรก็ตามมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มที่ต่างไปคือ หลังจากให้ความร้อนแก่สารละลายฟิล์มที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาทีแล้ว ทำสารละลายฟิล์มที่ได้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิ 50 °C และเติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ (ACTIVA™ TG-AK, บริษัท อายิโนะโมะไตะ จำกัด, กรุงเทพฯ) เข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัดผสมให้เข้ากัน นำสารละลายฟิล์มไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาทีในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น SW23, Julabo Labortechnik GMBH, Seelbach, Germany) จากนั้นจึงนำสารละลายฟิล์มที่บ่มแล้วมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อหยุดการ

ทำงานของเอนไซม์ นำสารละลายฟิล์มที่ได้ไปกำจัดฟองอากาศโดยใช้ ultrasonic bath (Fisher Scientific, Schwerte, Germany) ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและทำให้แห้งตามรายละเอียดในข้อ 3.3.1 จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออกและนำไปเก็บรักษาในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 2 วัน วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มตามข้อ 3.3.3.1-3.3.3.5 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของ กลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0, 80:20 และ 20:80 ซึ่งไม่เติมและเติม แทรนส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์เข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด นำไปศึกษาลักษณะ พื้นผิวและภาคตัดขวางเพิ่มเติมตามข้อ 3.3.3.6

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมสำหรับสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของ พลาสติไซเซอร์และไม่เติมทรานส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์

อัตราส่วนของ กลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล	ส่วนผสม			
	โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (g)	กลีเซอรอล (g)	ซอร์บิทอล (g)	Tris-HCl (ml)
100:0	5.0	3.25	0	100.0
80:20	5.0	2.60	0.65	100.0
60:40	5.0	1.95	1.30	100.0
50:50	5.0	1.63	1.63	100.0
40:60	5.0	1.30	1.95	100.0
20:80	5.0	0.65	2.60	100.0

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

3.3.3.1 ความหนา

ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 30x150 mm² วัดความหนาของฟิล์มโดยใช้ไมโครมิเตอร์ (รุ่น 7301, Mitutoyo, Tokyo, Japan) วัดความหนาชั้นละ 15 จุดนับเป็น 1 ซ้ำ

3.3.3.2 ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC (2000) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นชิ้นเล็กๆ ชั่งตัวอย่างฟิล์มประมาณ 5 g ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน บรรจุลงในจานอลูมิเนียมที่อบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบ (รุ่น 600, Memmert, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 105±2 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ หลังจาก

นั้นทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นและนำมาชั่งน้ำหนักหลังการอบ คำนวณปริมาณความชื้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนักสด

3.3.3.3 สมบัติเชิงกล

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่อง Instron® universal materials testing machine (รุ่น 5565, Instron, Norwood, MA) ซึ่งติดตั้งด้วย load cell ขนาด 5 kg ใช้หัววัด pneumatic side-action grips ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนยึดจับ 2 ชิ้นติดตั้งในตำแหน่งตรงกันในแนวตั้ง ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 30x100 mm² ติดตั้งลงบนส่วนยึดจับทั้งสองด้าน กำหนดระยะห่างของส่วนยึดจับเท่ากับ 50 mm ดึงตัวอย่างฟิล์มด้วยความเร็ว 5.0 mm/วินาที จนกระทั่งขาดออกจากกัน ได้ผลการวัดในรูปของแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน (หน่วยเป็น g force) และระยะทางที่สามารถดึงขึ้นตัวอย่างให้ยืดออกไปได้มากที่สุดก่อนที่จะขาดออกจากกัน (หน่วยเป็น mm) คำนวณความต้านทานแรงดึงขาด (TS) และการยืดตัวถึงจุดขาด (EB) โดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$TS \text{ (MPa)} = \frac{\text{แรงที่ใช้ในการดึงตัวอย่างให้ขาด (gforce)} \times 0.009807 \times 10^{-6}}{\text{ความกว้างของตัวอย่าง (m)} \times \text{ความหนาของตัวอย่าง (m)}} \quad (3.1)$$

$$EB \text{ (\%)} = \frac{\text{ระยะการยืดของตัวอย่าง (mm)}}{\text{ความยาวเดิมของตัวอย่าง (mm)}} \times 100 \quad (3.2)$$

สำหรับตัวอย่างฟิล์มแต่ละซ้ำ วัดตัวอย่างละ 8 ชิ้น นับเป็น 1 ซ้ำ

3.3.3.4 ความโปร่งแสง

วัดความโปร่งแสงของตัวอย่างฟิล์มโดยดัดแปลงจากวิธีของ Tang และคณะ (2005) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดพอดีกับด้านที่แสงส่องผ่านของคิวเวร์ตต์บรรจุฟิล์มลงในคิวเวร์ตต์ แล้วนำไปวัดค่าร้อยละของแสงส่องผ่าน (%transmittance) ที่ความยาวคลื่น 500 nm โดยใช้ UV/Vis spectrophotometer (รุ่น V-530, Jasco, Easton, MD) ใช้คิวเวร์ตต์เปล่า (คิวเวร์ตต์ที่มีอากาศภายใน) เป็นแบล็ก โดยกำหนดให้ร้อยละของแสงส่องผ่านของแบล็กมีค่าเท่ากับ 100

3.3.3.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

วิเคราะห์สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของตัวอย่างฟิล์มตามวิธีของ ASTM E96-95 (1999) (ภาคผนวก ก.1)

3.3.3.6 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง

ศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0, 80:20 และ 20:80 ซึ่งไม่เติมและเติม แทรนส์กลูตามีนสจากจุลินทรีย์เข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่มีซิลิกาเจลเป็นเวลา 1 สัปดาห์ สำหรับตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวเตรียมตัวอย่างโดยติดเทปกาวสองหน้าแบบบางลงบนแท่งทองเหลืองสำหรับวางตัวอย่าง วางตัวอย่างฟิล์มลงไปและตัดแต่งขอบให้เรียบโดยใช้กรรไกร ส่วนตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ศึกษาลักษณะภาคตัดขวางใช้แท่งทองเหลืองสำหรับวางตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นร่องตั้งฉากกับพื้นผิวสำหรับติดตัวอย่าง นำตัวอย่างฟิล์มแช่ลงในไนโตรเจนเหลวให้ฟิล์มแข็งตัว แล้วหักตัวอย่างฟิล์ม ทิ้งตัวอย่างฟิล์มให้อ่อนตัวลง ติดเทปกาวสองหน้าแบบบางลงบนแท่งทองเหลืองบริเวณที่เป็นร่องที่ตั้งฉาก แล้วติดตัวอย่างฟิล์มให้ด้านที่ถูกหักวางตั้งฉากกับแท่งทองเหลือง นำตัวอย่างไปฉาบด้วยทอง แล้วศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของตัวอย่างฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รุ่น JSM-5410 LV, JEOL, Tokyo, Japan) ใช้กำลังขยาย 750 เท่า

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและรูปแบบของแถบโปรตีน (protein pattern) ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

รูปแบบของแถบโปรตีนวิเคราะห์โดยใช้วิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ศึกษาในตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0, 80:20, 50:50 และ 20:80 ซึ่งไม่เติมและเติมทรานส์กลูตามีนสจากจุลินทรีย์เข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

3.3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดด้วย SDS-PAGE ดัดแปลงจากวิธีของ Tang และ Jiang (2007) โดยตัดชิ้นตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดให้ละเอียด จากนั้นชั่งตัวอย่างฟิล์ม 10.5 mg ใส่ลงในสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งประกอบด้วย Tris-HCl เข้มข้น 0.125 โมลาร์, SDS เข้มข้น 4%,

2-mercaptoethanol เข้มข้น 3.1%, glycerol เข้มข้น 20% และ bromophenol blue เข้มข้น 0.01% ปริมาตร 1.5 ml ที่บรรจุใน Eppendorf tube ผสมให้เข้ากัน จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น และนำไปเหวี่ยงแยกที่ 12,000×g เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C เก็บส่วนใส (supernatant) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนต่อไป

3.3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี modified Lowry

เตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนในข้อ 3.3.4.1 แต่สารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ไม่มีส่วนประกอบของ bromophenol blue

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธี modified Lowry ดัดแปลงจากวิธีของ Peterson (1983) โดยในขั้นแรกเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยสารละลายโปรตีนมาตรฐาน bovine serum albumin (BSA) โดยชั่ง BSA ปริมาณ 10 mg ละลายในน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 ml ปิ่เปิดสารละลาย BSA ปริมาตรต่างๆ ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ml โดยให้มีความเข้มข้นของ BSA อยู่ในช่วง 0-120 µg/ml เติมสารละลาย sodium deoxycholate เข้มข้น 0.15% ปริมาตร 0.1 ml ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 10 นาที เติมสารละลาย trichloroacetic acid เข้มข้น 72% ปริมาตร 0.1 ml ผสมให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงแยกที่ 12,000×g เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสที่นำตะกอนที่ได้มาเติม Reagent A (sodium deoxycholate เข้มข้น 0.8 N, SDS เข้มข้น 10%, น้ำกลั่น และสารละลาย copper tartrate carbonate (CTC) ที่ประกอบด้วย copper sulfate เข้มข้น 0.1%, potassium tartrate เข้มข้น 0.2% และ sodium carbonate เข้มข้น 10% ในอัตราส่วน 1:1) ปริมาตร 1 ml ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 10 นาที จากนั้นเติม Reagent B (Folin-Ciocalteu's phenol reagent และน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:5) ปริมาตร 0.5 ml ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบล็ก กกราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน แสดงในภาคผนวก ข.1

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดใช้วิธีการเช่นเดียวกับการเตรียมกราฟมาตรฐาน แต่ใช้สารละลายตัวอย่างแทนสารละลาย BSA และใช้น้ำกลั่นเป็นแบล็ก คำนวณปริมาณโปรตีนในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

3.3.4.3 การวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนด้วย SDS-PAGE

การตรวจสอบรูปแบบของแถบโปรตีนด้วย SDS-PAGE ดัดแปลงจากวิธีของ Laemmli (1970) ในขั้นแรกเตรียมเจลโดยล้างแผ่นกระจกสำหรับหล่อเจลด้วยน้ำสะอาด จากนั้นชะอีกครั้งด้วยน้ำปราศจากอิออน (deionized water) แล้วเช็ดด้วยเอทานอล วางแผ่นกระจกที่มีรอยเว้าเข้าด้านในของตัวเครื่อง Hoefer gel electrophoresis system (รุ่น miniVE, Hoefer, Holliston, MA) วางแผ่นพลาสติกสีขาว (spacer) ที่มีความหนา 1 mm คั่นไว้ที่ขอบทั้งสองด้าน ประกบแผ่นกระจกอีกแผ่นเข้าหากัน จากนั้นประกอบแผ่นกระจกเข้ากับตัวเครื่อง ปิดเปิดสารละลาย separating gel เข้มข้น 10% (ตารางที่ 3.3) เติมนลงในช่องระหว่างแผ่นกระจกอย่างช้าๆ ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ จนสารละลายอยู่ต่ำกว่าขอบบนของแผ่นกระจกที่มีรอยเว้าประมาณ 1.5 cm หยดสารละลายบิวทานอลปิดทับหน้า separating gel ตั้งทิ้งไว้บนพื้นระนาบเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงจนกระทั่งเจลแข็งตัว

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียมสารละลาย separating gel เข้มข้น 10% และสารละลาย stacking gel เข้มข้น 4%*

สารเคมี	Separating gel	Stacking gel
Acrylamide stock solution เข้มข้น 30%	6.7 ml	0.88 ml
Separating gel buffer เข้มข้น 1.5 โมลาร์ pH 8.8	5 ml	-
Stacking gel buffer เข้มข้น 1.5 โมลาร์ pH 6.8	-	1.66 ml
Sodium dodecyl sulfate เข้มข้น 10%	0.2 ml	66 μ l
Ammonium persulfate เข้มข้น 10%	8 ml	33.4 μ l
TEMED	100 μ l	3.3 μ l
น้ำกลั่น	6.7 μ l	4.06 ml

*สำหรับเตรียมเป็นแผ่นเจลหนา 1 mm จำนวน 2 แผ่น

เทสารละลายบิวทานอลที่อยู่บนผิวหน้าเจลออก แล้วล้างเจลด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง จากนั้นเปิดสารละลาย stacking gel เข้มข้น 4% (ตารางที่ 3.3) เติมนลงในช่องระหว่างแผ่นกระจกอย่างช้าๆ ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ จนสารละลายสูงถึงขอบบนของกระจก จากนั้นสอด comb ลงในช่องระหว่างแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งเจลชั้นบนแข็งตัว

จากนั้นถอด comb ออกซึ่งจะเกิดเป็นช่องสำหรับบรรจุตัวอย่าง เตรียมต่อ gel electrophoresis system เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Amersham Bioscience,

San Francisco, CA) บีเบ็ดสารละลายตัวอย่างที่มีโปรตีนปริมาณ 5 μg และสารละลายโปรตีนมาตรฐาน (protein molecular weight marker) (Sigma-Aldrich, Munich, Germany) ลงในช่องด้านบนของ stacking gel ช่องละ 1 ตัวอย่าง เติม electrophoresis buffer (ตารางที่ 3.4) ลงใน chamber และระหว่างแผ่นกระจกจนสารละลายท่วมแผ่นเจล กำหนดกระแสไฟฟ้า 40 mA ต่อแผ่นเจล 2 แผ่น เปิดกระแสไฟฟ้าจนสังเกตเห็นแถบโปรตีนเคลื่อนที่ลงมาจนถึงระยะประมาณ 1 cm จากขอบล่างของแผ่นเจลจึงปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถอดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก แล้วแกะเจลออกจากแผ่นกระจก

ตารางที่ 3.4 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียม electrophoresis buffer ปริมาตร 3,000 ml

สารเคมี	ปริมาณ
Tris เข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์	9.06 g
Glycine เข้มข้น 15%	43.2 g
Sodium dodecyl sulfate เข้มข้น 1%	3 g
น้ำกลั่น	เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 3,000 ml

นำแผ่นเจลที่ได้มาแช่ใน staining solution (ตารางที่ 3.5) เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจึงนำไปแช่ใน destaining solution (ตารางที่ 3.5) จนแถบโปรตีนปรากฏขึ้น เทสารละลายทิ้ง และล้างแผ่นเจลด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบสารเคมีที่ใช้เตรียม staining solution และ destaining solution ปริมาตร 1,000 ml

สารเคมี	Staining solution	Destaining solution
Coomassie blue R-250	1 g	-
Ethanol เข้มข้น 95%	500 ml	250 ml
Acetic acid, glacial	100 ml	100 ml
น้ำกลั่น	เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 ml	เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 ml

3.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้น (moisture sorption isotherm) ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

เลือกตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในข้อ 3.3.2 ที่มีค่า TS และ EB สูง มาศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิคงที่ โดยตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นชิ้นเล็กๆ นำไป

เก็บไว้ในภาชนะปิดสนิทที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้แก่ 12.0, 22.5, 33.0, 43.0, 51.0, 57.6, 66.0, 74.9, 84.3, 90.0 และ 94.0% ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 7 วัน นำตัวอย่างฟิล์มมาวัดเพื่อยืนยันค่าวอเตอร์แอกทิวิตีโดยใช้เครื่อง AquaLab® (รุ่น 3TE, Decagon Devices, Pullman, WA) แล้ววิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีในข้อ 3.3.3.2 นำข้อมูลของวอเตอร์แอกทิวิตีที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้นมาสร้างเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้น

3.3.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด

นำตัวอย่างฟิล์มที่มีค่า TS และ EB สูงซึ่งเลือกมาจากข้อ 3.3.2 มาใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่เลือกเป็นตัวแทนได้แก่กล้วยกวน ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดเปรียบเทียบกับกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้มและกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน

สำหรับกล้วยกวนเตรียมโดยนำกล้วยน้ำว้าสุกบดละเอียดปริมาณ 1095.0 g บรรจุลงในกระทะทองเหลือง เดิมหั่วกะทิ 342.5 g น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ 160.0 g น้ำตาลมะพร้าว 102.5 g และเกลือป่น 3.5 g นำไปให้ความร้อนพร้อมกับกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พักไว้ให้เย็น นวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 15 mm

สำหรับฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดและฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่จะนำมาใช้ห่อขึ้นกล้วยกวน ตัดฟิล์มให้มีขนาด 6x6 cm² แล้วจึงนำมาห่อขึ้นกล้วยกวนโดยห่อในลักษณะบิดหัวท้าย (twist wrap) บรรจุขึ้นกล้วยกวนลงในถุงพอลิพรอพิลีนขนาด 6x9 นิ้ว จำนวน 15 ชิ้น/ถุง ปิดผนึกด้วยความร้อน เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ทุก 1 สัปดาห์สุ่มตัวอย่างกล้วยกวนมาวิเคราะห์สมบัติในข้อ 3.3.6.1-3.3.6.5 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดลอง 3 ซ้ำ

3.3.6.1 ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC (2000) โดยหั่นตัวอย่างกล้วยกวนเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งตัวอย่างประมาณ 5 g ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน บรรจุลงในจานอลูมิเนียมที่อบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบ (รุ่น 600, Memmert, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 105±2 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ หลังจาก

นั้นทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นและนำมาชั่งน้ำหนักหลังการอบ คำนวณปริมาณความชื้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนักสด

3.3.6.2 วอเตอร์แอกทิวิตี

วัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของกล้วยกวนที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้เครื่อง AquaLab[®] (รุ่น 3TE, Decagon Devices, Pullman, WA)

3.3.6.3 ความแข็ง (hardness)

วิเคราะห์รูปแบบเนื้อสัมผัส (texture profile analysis) ของกล้วยกวนด้วยเครื่อง Instron[®] universal materials testing machine (รุ่น 5565, Instron, Norwood, MA) ซึ่งติดตั้งด้วย load cell ขนาด 5 kg นำขึ้นกล้วยกวนมาทดสอบตามแนวความยาว โดยใช้หัววัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm กดด้วยความเร็ว 3.0 mm/วินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการยุบตัว (deformation) 70% คำนวณค่าความแข็งโดยใช้ Merlin[™] materials testing software (version 8.30.00, Instron, Norwood, MA)

3.3.6.4 สี

วัดค่า L^* , a^* และ b^* ของกล้วยกวนในระบบ CIELAB โดยใช้ chroma meter (รุ่น CR-400, Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 วัดค่าสีของตัวอย่างชิ้นละ 5 จุดนับเป็น 1 ซ้ำ

3.3.6.5 ค่ากรดไทโอบาพิทริก [thiobarbituric acid (TBA) value]

ติดตามการเกิดออกซิเดชันของไขมันในกล้วยกวนโดยวัดค่า TBA ตามวิธีที่อธิบายโดย Pikul, Leszezynski และ Kummerow (1989) โดยบดตัวอย่างกล้วยกวน 10.0 g กับน้ำกลั่น 50.0 ml เป็นเวลา 2 นาที บรรจุตัวอย่างลงในขวดกั้นกลมแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 47.5 ml และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 4 โมลาร์ปริมาตร 2.5 ml ใส่ glass bead ต่อขวดกั้นกลมเข้ากับชุดกลั่น และรองรับที่ปลายชุดกลั่นด้วยขวดรูปชมพู่ จากนั้นให้ความร้อนจนกระทั่งตัวอย่างที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่มีปริมาตรเท่ากับ 50 ml หยุดให้ความร้อนและปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอลูมิเนียมฟอล์ย ผสมสารที่กลั่นได้ให้เข้ากันแล้วบีบเปิดมา 5.0 ml บรรจุลงในหลอดทดลอง พร้อมทั้งเตรียมแบลลงก์โดยใช้น้ำกลั่น 5.0 ml เตรียม thiobarbituric acid reagent โดยนำ 2-thiobarbituric acid ปริมาณ 0.2883 g ละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 90% ปริมาตร 100 ml บีบเปิด thiobarbituric acid reagent ปริมาตร 5.0 ml ใส่ลงใน

หลอดทดลองที่บรรจุสารที่กลั่นได้และหลอดที่เป็นแบล็ก ผสมให้เข้ากันและนำไปให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลา 35 นาที จากนั้นจึงทำให้เย็นลงทันทีและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 538 nm คำนวณค่า TBA ตามสมการที่ 3.3

$$\text{TBA value (mg malonaldehyde/kg sample)} = 7.8 A_{538} \quad (3.3)$$

เมื่อ A_{538} คือค่าการดูดกลืนแสงที่ 538 nm

3.3.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan' s new multiple range test ที่ $p=0.05$

บทที่ 4

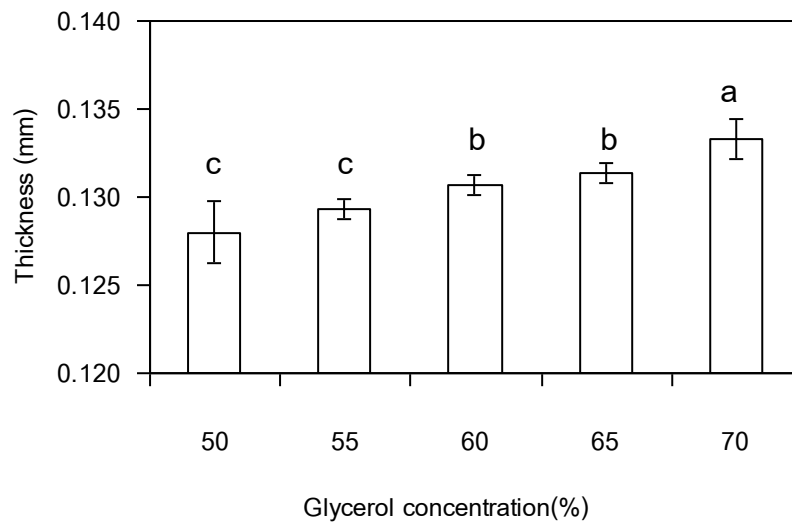
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

สำหรับการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 50, 55, 60, 65 และ 70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด วิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม ได้แก่ ความหนา ปริมาณความชื้น ความต้านทานแรงดึงขาด (TS) การยืดตัวถึงจุดขาด (EB) ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

4.1.1 ความหนา

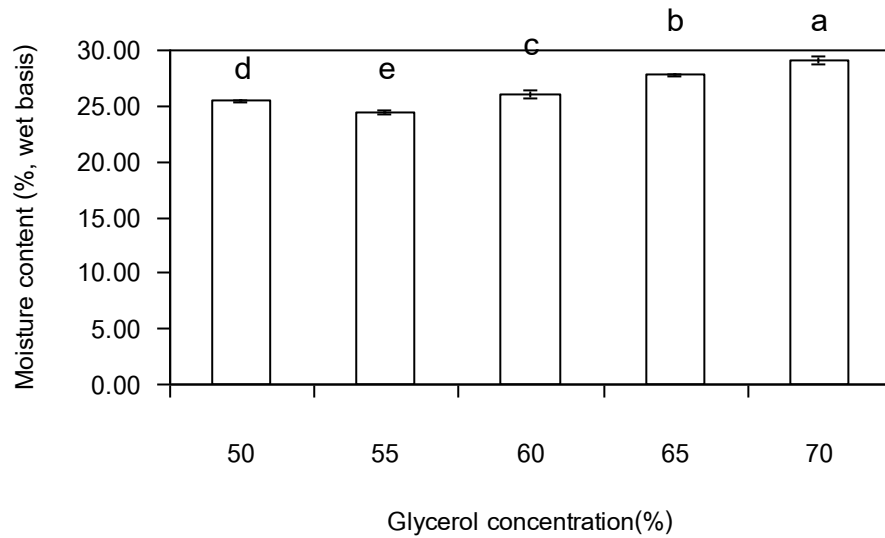
สำหรับงานวิจัยนี้ ในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มได้ควบคุมปริมาตรของสารละลายฟิล์มให้คงที่ โดยใช้สารละลายฟิล์มปริมาตร 25 ml ต่อพื้นที่ผิวรูปวงกลมขนาด $17,671 \text{ mm}^2$ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm) พบว่าความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.128-0.133 mm (รูปที่ 4.1 และตารางที่ ค.1) ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 50% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความหนาค่าต่ำที่สุด ($0.128 \pm 0.002 \text{ mm}$) และเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 70% มีความหนาสูงที่สุดคือ $0.133 \pm 0.001 \text{ mm}$ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์ (2545) ซึ่งรายงานว่เมื่อปริมาณกลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล เพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 60% โดยน้ำหนักของโปรตีน ความหนาของฟิล์มโปรตีนที่ละลายน้ำได้จากปลาทรายแดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งของแข็งที่ละลายน้ำได้หลักในสารละลายฟิล์มได้แก่พอลิเมอร์และพลาสติกไซเซอร์ Mahmoud และ Savello (1992) รายงานว่าความหนาของฟิล์มเบต้า-แลคโตโกลบูลินมีความสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้



รูปที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

4.1.2 ปริมาณความชื้น

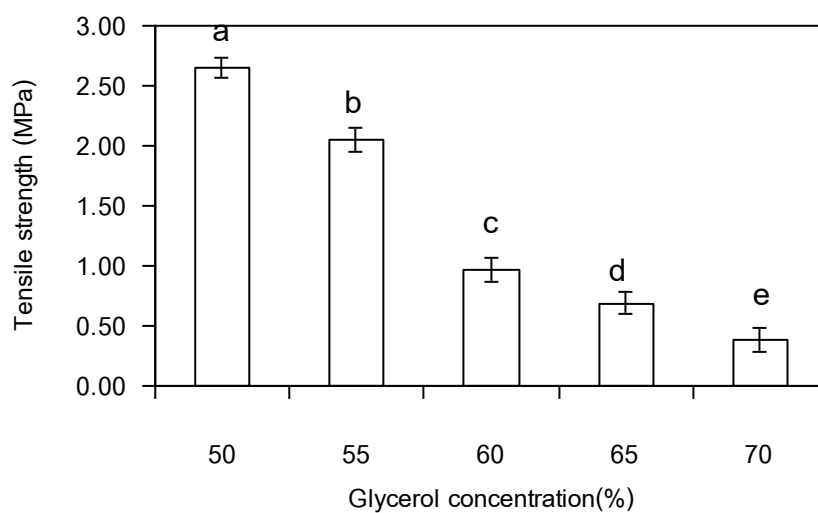
ความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลต่อปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ ค.1 พบว่าปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าอยู่ในช่วง 24.44-29.12% โดยน้ำหนักสด เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $25.46 \pm 0.10\%$ ในฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 50% เป็น $29.12 \pm 0.42\%$ ในฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 70% จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Cho และ Rhee (2002) เสนอว่าสาเหตุที่ปริมาณความชื้นของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการที่กลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีสมบัติชอบน้ำอยู่ในโครงสร้างจำนวนมาก ทำให้ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลสามารถเก็บกักความชื้นไว้ได้มาก โดยผู้วิจัยกลุ่มนี้รายงานว่ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.7 g/g โปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Mahmoud และ Savello (1992) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจาก 0.12 เป็น 2.0% ปริมาณความชื้นของฟิล์มเวย์โปรตีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 5.0 เป็น 27.5%



รูปที่ 4.2 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

4.1.3 ความต้านทานแรงดึงขาด

TS คือความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะดึงที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของแผ่นฟิล์มที่มีความกว้างคงที่จนแผ่นฟิล์มนั้นขาด Guilbert (1986) เสนอว่า TS ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์มากกว่าความแข็งแรงของพันธะภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ รูปที่ 4.3 และตารางที่ ค.1 แสดง TS ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



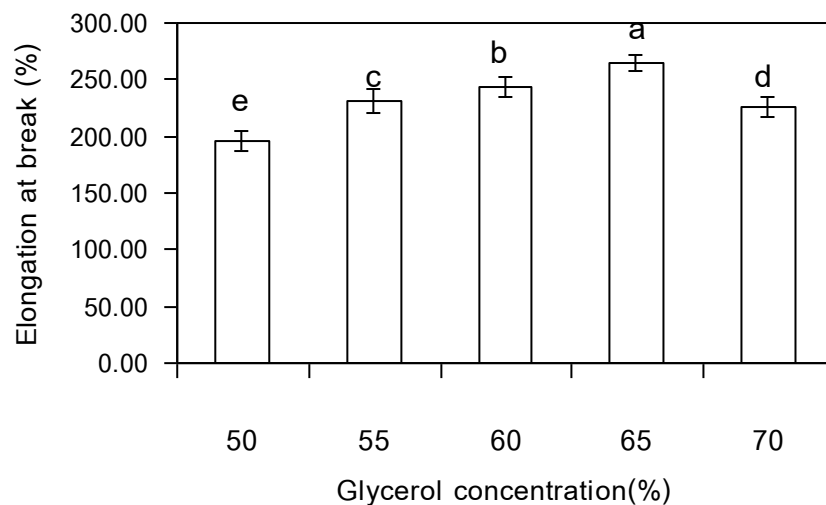
รูป 4.3 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

จากการวิจัยนี้พบว่า TS ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.38-2.65 MPa โดยเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น TS ของฟิล์มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 50 และ 70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า TS สูงสุด (2.65 ± 0.08 MPa) และต่ำสุด (0.38 ± 0.10 MPa) ตามลำดับ การที่กลีเซอรอลทำให้ TS ของฟิล์มมีค่าลดลงเนื่องมาจากกลีเซอรอลเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและมีสมบัติชอบน้ำจึงสามารถแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลโปรตีนได้ดีและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่เคมีที่เกิดอันตรกิริยาได้บนโมเลกุลโปรตีน การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและพลาสติกไซเซอรัจจึงมีผลขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนด้วยตัวเอง TS ของฟิล์มจึงลดต่ำลง (Galiotta *et al.*, 1998)

Jangchud และ Chinnan (1999) รายงานผลเช่นเดียวกันสำหรับฟิล์มโปรตีนถั่วลิสงที่แปรความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วง 0.67-1.67 g/g โปรตีน ซึ่งพบว่า TS ของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 0.67 และ 1.67 g/g โปรตีน มีค่า TS เท่ากับ 4.35 และ 4.10 MPa ตามลำดับ และก่อนหน้านี้ McHugh และ Krochta (1994) รายงานว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลให้ TS ของฟิล์มเวย์โปรตีนมีค่าลดลง โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 15 และ 30% โดยน้ำหนักของโปรตีนมีค่า TS ประมาณ 29 และ 14 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่รายงานผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรัจต่อความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโปรตีนและฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ในทำนองเดียวกัน (ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์, 2545; Gennadios, Park and Weller, 1993; Cherian *et al.*, 1995; Fairley *et al.*, 1996; Cuq *et al.*, 1997; Debeaufort and Voilley, 1997; Galiotta *et al.*, 1998; Cho and Rhee, 2002; Sobral *et al.*, 2005; Bourtoom *et al.*, 2006; Bourtoom, 2008)

4.1.4 การยืดตัวถึงจุดขาด

EB คือร้อยละของระยะทางที่ฟิล์มยืดออกด้วยแรงดึงจนขาดต่อความยาวเดิม EB ของฟิล์มขึ้นอยู่กับระยะระหว่างหมู่ที่เกิดอันตรกิริยาของโมเลกุลพอลิเมอร์ หากระยะระหว่างหมู่เคมีที่เกิดอันตรกิริยามีค่าน้อย EB ของฟิล์มจะมีค่าต่ำ (Guilbert, 1986; Greener-Donhowe and Fennema, 1994) รูปที่ 4.4 และตารางที่ ค.1 แสดง EB ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



รูปที่ 4.4 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

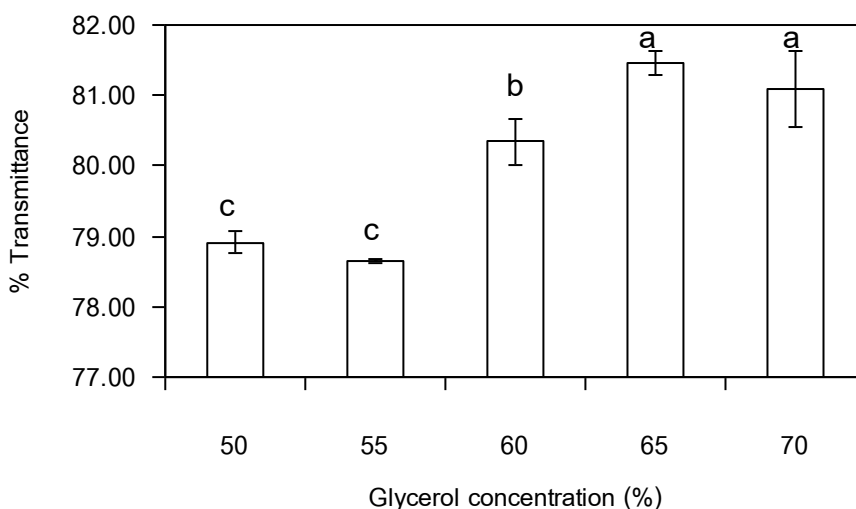
จากผลการวิจัยพบว่าในช่วงความเข้มข้นของกลีเซอรอลเท่ากับ 50-65% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด EB ของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 196.55-264.94% ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 65% มี EB สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ $264.94 \pm 6.83\%$ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bourtoom และคณะ (2006) ซึ่งรายงานว่ฟิล์มโปรตีนที่ละลายน้ำได้จากน้ำล้างปลาจากการผลิตซูริมีมี EB เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลพลาสติกไซเซอร์จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างสายโปรตีนและมีผลขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโปรตีนด้วยตัวเอง ทำให้ระยะระหว่างหมู่ที่เกิดอันตรกิริยาของโปรตีนเพิ่มขึ้นและฟิล์มมีการยืดตัวได้มากขึ้น Sobral และคณะ (2005) รายงานผลในทำนองเดียวกันสำหรับฟิล์มที่ผลิตจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากปลานิล โดยพบว่า EB ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 65 g/100 g ของโปรตีน นอกจากนี้ Cho และ Rhee (2002) รายงานว่ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองมีค่า EB เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอล ซอร์บิทอล และของผสมของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.7 g/g โปรตีน โดยเสนอว่พลาสติกไซเซอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำจะสามารถเก็บกักความชื้นไว้ได้ในปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของ EB รวมทั้งการลดลงของ TS เมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มสูงขึ้นจึงเป็นผลร่วมของทั้งการขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ของพลาสติกไซเซอร์และความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นของฟิล์ม

ซึ่ง Mali และคณะ (2005) กล่าวไว้ว่านอกจากน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายแล้วยังมีบทบาทในการเป็นพลาสติกไซเซอรด์ด้วย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่รายงานผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรด์ต่อความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มโปรตีนและฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ในทำนองเดียวกัน (ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์, 2545; Gennadios *et al.*, 1993; Cherian *et al.*, 1995; Cuq *et al.*, 1997; Debeaufort and Voilley, 1997; Galletta *et al.*, 1998; Cho and Rhee, 2002; Sobral *et al.*, 2005; Bourtoom *et al.*, 2006; Bourtoom, 2008)

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจนถึง 70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด EB ของฟิล์มมีค่าลดลง ($225.29 \pm 8.72\%$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 65% ($264.94 \pm 6.83\%$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่สูงเกินไปทำให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนเกิดขึ้นต่ำมาก ฟิล์มจึงขาดออกได้ง่ายเมื่อถูกดึง (Hernandez-Izquierdo *et al.*, 2008)

4.1.5 ความโปร่งแสง

ลักษณะปรากฏของฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติของพอลิเมอร์ วัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการเตรียมฟิล์ม (Gontard *et al.*, 1992) ความโปร่งแสง (transparency)/ความขุ่น (opacity) เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มซึ่งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ที่นำฟิล์มไปใช้ด้วย สำหรับงานวิจัยนี้วัดความโปร่งแสงของฟิล์มในรูปของร้อยละของแสงที่ส่องผ่านตัวอย่างฟิล์มที่บรรจุอยู่ในคิวเว็ตต์ โดยกำหนดให้ร้อยละของแสงที่ส่องผ่านคิวเว็ตต์เปล่า (คิวเว็ตต์ที่มีอากาศภายใน) มีค่าเท่ากับ 100 รูปที่ 4.5 และตารางที่ ค.1 แสดงร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 50-70% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าค่าแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดอยู่ในช่วง 78.64-81.47% โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 65% มีค่าแสงส่องผ่านสูงที่สุดเท่ากับ $81.47 \pm 0.17\%$ การที่ฟิล์มมีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปัจจัยสองประการคือปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น (4.1.2) ทำให้มีผลเจือจางโปรตีนถั่วเหลือง (dilution effect) (Paschoalick *et al.*, 2003; Vanin *et al.*, 2005) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sobral และคณะ (2005) ซึ่งรายงานว่เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.65 g/g โปรตีน ความขุ่นของฟิล์มไมโอไฟบริลลาร์จากปลานิลมีค่าลดลงจาก 45 เป็น 5%



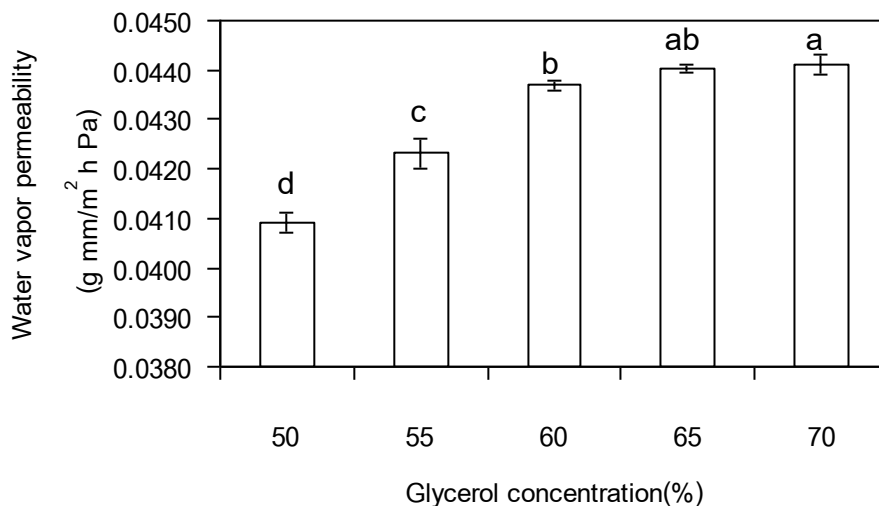
รูปที่ 4.5 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

4.1.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำวัดในรูปน้ำหนักของไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยความหนา ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้ภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดแสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ ค.1

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 50 ไปเป็น 60% โดยน้ำหนักของโปรตีน สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเข้มข้น 50, 55 และ 60% มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ 0.0409, 0.0423 และ 0.0437 g mm/m² h Pa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นสูงกว่า 60% สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าค่อนข้างคงที่ (0.0440-0.0441 g mm/m² h Pa) สาเหตุที่สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการที่โมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลโปรตีนทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลโปรตีนเพิ่มขึ้น ไอน้ำจึงซึมผ่านช่องระหว่างโมเลกุลโปรตีนได้เพิ่มขึ้น (McHugh *et al.*, 1994; Vanin *et al.*, 2005) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanaka และคณะ (2001) ซึ่งรายงานว่าฟิล์มโปรตีนที่ละลายน้ำได้จากปลากระโทงแทงสีน้ำเงิน (blue marlin) มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 40, 50 และ 70% โดยน้ำหนักของ

โปรตีน มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ 0.950×10^{-10} , 1.195×10^{-10} และ 1.164×10^{-10} g/m s Pa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่รายงานผลในการทำงานของเดียวกันสำหรับฟิล์มโปรตีนอื่นๆ (Arvanitoyannis, Nakayama and Aiba, 1998; Martelli, Moore and Laurindo, 2006; Martelli *et al.*, 2006)



รูปที่ 4.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

เนื่องจากฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีข้อจำกัดสำคัญในด้านความเปราะเช่นเดียวกับฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไป (Jiang *et al.*, 2007) ในขั้นตอนนี้จึงเลือกความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ให้ฟิล์มที่มีค่า EB สูงสุดซึ่งได้แก่กลีเซอรอลเข้มข้น 65% เพื่อนำไปศึกษาในขั้นตอนนี้ต่อไป ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงขาดโดยศึกษาผลของอัตราส่วนของผสมพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอลและซอร์บิทอล) และการเติมทรานส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่มีค่า TS และ EB ที่สูงเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหารต่อไป

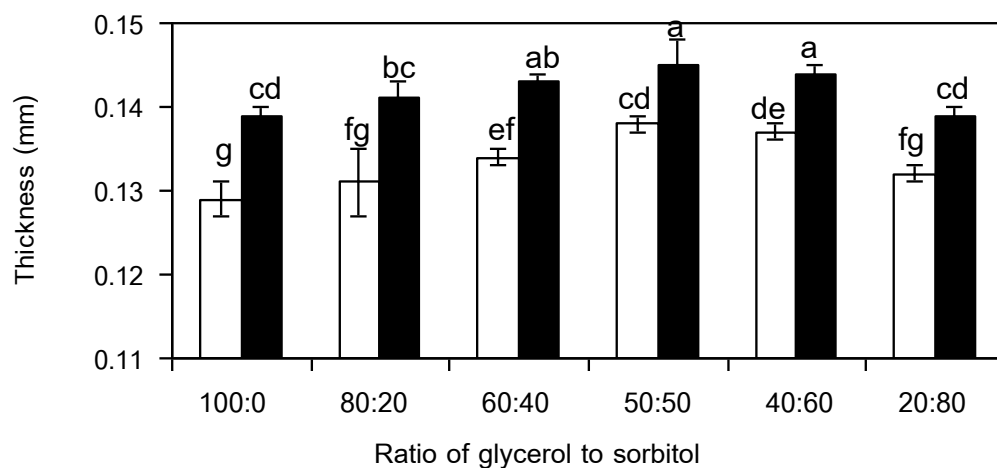
4.2 ผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์และการเติมทรานส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของผสมพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอลและซอร์บิทอล) และการเติมทรานส์กลูตามีนเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยเติมพลาสติกไซเซออร์เข้มข้น 65% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลือง

สกัด แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 (โดยจากการทดลองก่อนการวิจัยพบว่าการใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 0:100 ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเปราะมากและไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากพื้นผิวที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มได้โดยที่ฟิล์มไม่แตก) พร้อมทั้งศึกษาผลของการเติมแทนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ (4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม ได้แก่ ความหนา ปริมาณความชื้น TS EB ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ นอกจากนี้ยังคัดเลือกฟิล์มบางตัวอย่างไปศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2.1 ความหนา

รูปที่ 4.7 และตารางที่ ค.2 แสดงความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามิเนส



รูปที่ 4.7 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) แทนส์กลูทามิเนส

จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์เท่ากับ 65% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ปริมาณของแข็ง

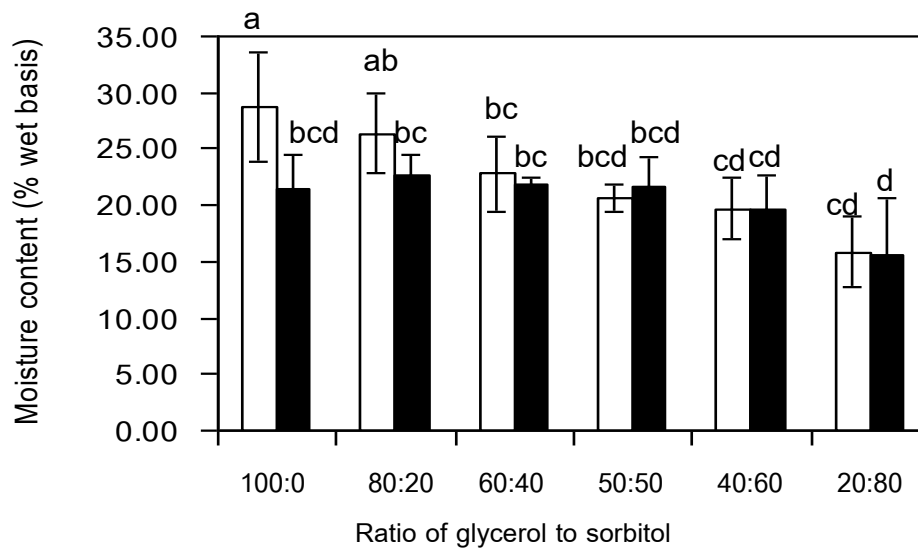
ที่ละลายน้ำได้ที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาใกล้เคียงกัน (ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์, 2545; Mahmoud and Savello, 1992)

สำหรับผลของการเติมแทนส์กลูตามิเนส พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมแทนส์กลูตามิเนสมีความหนามากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ฟิล์มที่ไม่เติมแทนส์กลูตามิเนสมีความหนาอยู่ในช่วง 0.129-0.138 mm ในขณะที่ฟิล์มที่เติมแทนส์กลูตามิเนสมีความหนาอยู่ในช่วง 0.132-0.145 mm การที่ฟิล์มที่เติมแทนส์กลูตามิเนสมีความหนามากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์เนื่องจากแทนส์กลูตามิเนสช่วยเร่งการเกิดพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลโปรตีน (Folk and Finlayson, 1977; DeJong and Koppelman, 2002) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Di Pierro และคณะ (2005) ที่รายงานว่าฟิล์มเชิงประกอบของเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันที่เติมแทนส์กลูตามิเนสมีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 0.079 เป็น 0.095 mm นอกจากนี้ Tang และ Jiang (2007) ยังรายงานผลที่สอดคล้องกันสำหรับฟิล์มโปรตีนชนิดต่างๆ ได้แก่ ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ฟิล์มโปรตีนถั่วลิสงสกัด ฟิล์มกลูเต็น ฟิล์มเวย์โปรตีนเข้มข้น ฟิล์มโซเดียมเคซีน และฟิล์มเจลาติน

4.2.2 ปริมาณความชื้น

อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์และการเติมแทนส์กลูตามิเนสมีผลต่อปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดดังแสดงในรูปที่ 4.8 และตารางที่ ค.3

สำหรับผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์พบว่าเมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลลดลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างฟิล์มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลมีโมลาร์แมสต่ำกว่าซอร์บิทอล (92 และ 182 g/mol ตามลำดับ) ดังนั้นเมื่อเติมในน้ำหนัที่เท่ากันกลีเซอรอลจึงมีจำนวนโมลมากกว่าซอร์บิทอล มีผลให้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลสูงสามารถดูดซึมและเก็บกักความชื้นได้มากกว่า (Cuq *et al.*, 1997; Mali *et al.*, 2005) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahmoud และ Savello (1992) และ Cho และ Rhee (2002) ซึ่งศึกษาในฟิล์มเบต้า-แลกโตโกลบูลินและฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) แทรนส์กลูตามิเนส

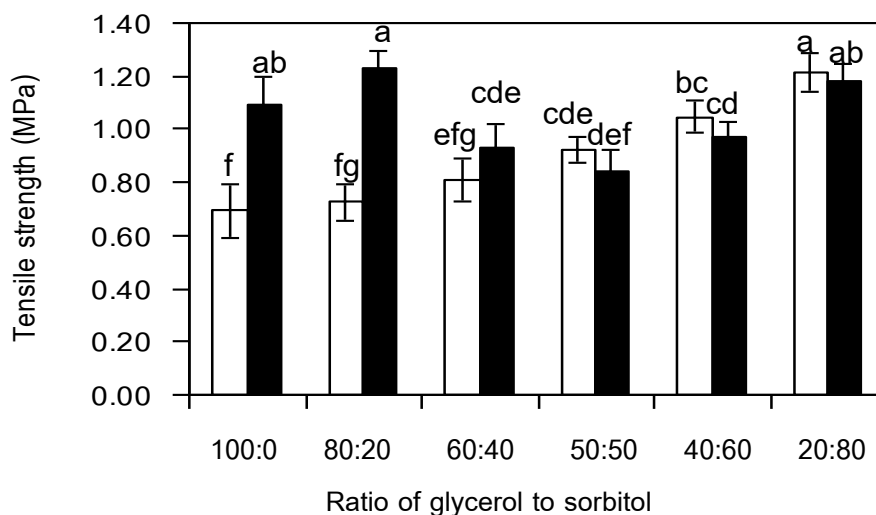
สำหรับผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนส โดยทั่วไปพบว่าที่อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์เท่ากัน ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ไม่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีความชื้นสูงกว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์ ซึ่งความแตกต่างนี้เห็นได้ชัดในตัวอย่างฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่สูง ตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีความชื้นอยู่ในช่วง 17.70-28.71% โดยน้ำหนักสด ในขณะที่ตัวอย่างฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีความชื้นอยู่ในช่วง 15.58-22.58% โดยน้ำหนักสด Jiang และคณะ (2007) เสนอว่าการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโปรตีนอันเนื่องมาจากการทำงานของทรานส์กลูตามิเนสมีผลให้หมู่อะมิโนอิสระซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมู่เอพิซิลอน-อะมิโนของไลซีน) มีปริมาณลดลง จึงทำให้โมเลกุลโปรตีนจับกับน้ำได้ลดลง

4.2.3 ความต้านทานแรงดึงขาด

รูปที่ 4.9 และตารางที่ ค.4 แสดง TS ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เป็นผลจากอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์และการเติมทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์

สำหรับผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์พบว่าเมื่ออัตราส่วนของซอร์บิทอลเพิ่มขึ้น ค่า TS ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลง

ดังกล่าวเห็นได้ชัดเจนในตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนส Bourtoom และคณะ (2006) ศึกษาผลของชนิดของพลาสติกไซเซอรต์ต่อสมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากโปรตีนละลายน้ำได้จากน้ำล้างปลาจากการผลิตซูริมิ พบว่าฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอรต์มีค่า TS สูงกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากซอร์บิทอลมีโมลาร์แมสสูงกว่ากลีเซอรอล เมื่อเติมในน้ำหนักที่เท่ากันซอร์บิทอลจึงมีจำนวนโมลที่น้อยกว่ากลีเซอรอล ซึ่งมีผลให้ซอร์บิทอลมีความสามารถในการขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลโปรตีนต่ำกว่ากลีเซอรอล (Cuq *et al.*, 1997; Mali *et al.*, 2005) จึงทำให้ TS ของฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล นอกจากนี้ปริมาณการเกิดทรัพพ์ (2545) ยังรายงานผลในการทำงานของเดียวกันสำหรับฟิล์มโปรตีนละลายน้ำได้จากปลาทรายแดง



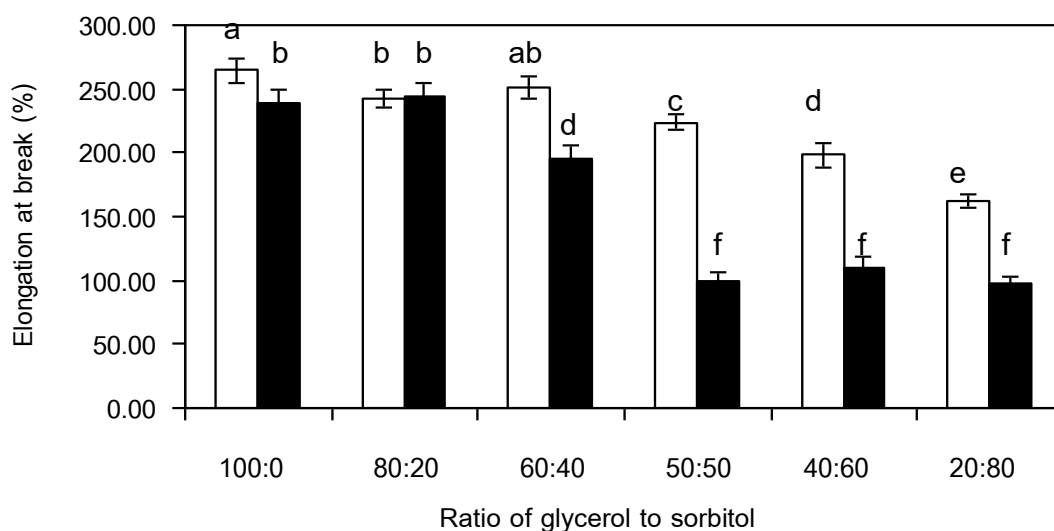
รูปที่ 4.9 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) แทรนส์กลูทามิเนส

ในด้านผลของการเติมแทรนส์กลูทามิเนสพบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 และ 80:20 และเติมเอนไซม์มีค่า TS สูงกว่าฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรต์เท่ากันแต่ไม่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลลดต่ำลง (60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80) TS ของตัวอย่างฟิล์มที่เติมและไม่เติมเอนไซม์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ตัวอย่างฟิล์มที่เติมแทรนส์กลูทามิเนสมี TS อยู่ในช่วง 0.84-1.23 MPa ในขณะที่

ตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูทามิเนสมี TS อยู่ในช่วง 0.69-1.21 MPa การเพิ่มขึ้นของ TS ของฟิล์มที่เติมทรานส์กลูทามิเนสเป็นผลจากการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน Tang และ Jiang (2007) รายงานว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทางการค้า ฟิล์มกลูเต็น ฟิล์มเวย์โปรตีนเข้มข้น และฟิล์มเจลาตินที่เติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ 8 หน่วย/g โปรตีนมี TS เท่ากับ 4.3, 1.4, 2.8 และ 8.5 MPa สูงกว่าตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ซึ่งมี TS เท่ากับ 3.6, 1.1, 2.7 และ 6.8 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การเติมทรานส์กลูทามิเนสสามารถปรับปรุง TS ของฟิล์มโปรตีนชนิดอื่นๆ เช่น ฟิล์มเจลาตินปลา (Yi *et al.*, 2006) ฟิล์มโซเดียมเคซีนเนต (Jiang *et al.*, 2007) ฟิล์มเชิงประกอบของโคโคซานและเวย์โปรตีน (Di Pierro *et al.*, 2006) และฟิล์มเชิงประกอบของโคโคซานและโอวัลบูมิน (Di Pierro *et al.*, 2007)

4.2.4 การยืดตัวถึงจุดขาด

รูปที่ 4.10 และตารางที่ ค.5 แสดง EB ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติมหรือเติมทรานส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์



รูปที่ 4.10 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) ทรานส์กลูทามิเนส

สำหรับผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์พบว่าเมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลลดต่ำลง EB ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) Bourtoom และคณะ (2006) ศึกษาผลของชนิดของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติของฟิล์มที่ผลิต

จากโปรตีนละลายน้ำได้จากน้ำล้างปลาจากการผลิตซูริมิ พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลมีค่า EB ต่ำกว่าตัวอย่างฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลในปริมาณที่เท่ากันโดยน้ำหนัก ซึ่ง Cuq และคณะ (1997) และ Mali และคณะ (2005) อธิบายว่าในปริมาณที่เท่ากันโดยน้ำหนักจำนวนโมลของซอร์บิทอลที่ต่ำกว่า (เนื่องจากโมลาร์แมสที่สูงกว่า) ทำให้ซอร์บิทอลมีผลในการเป็นพลาสติกไซเซออร์ต่ำกว่ากลีเซอรอล McHugh และ Krochta (1994) และ Cho และ Rhee (2002) รายงานผลในทำนองเดียวกันสำหรับฟิล์มเวย์โปรตีนสกัดและฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดตามลำดับ

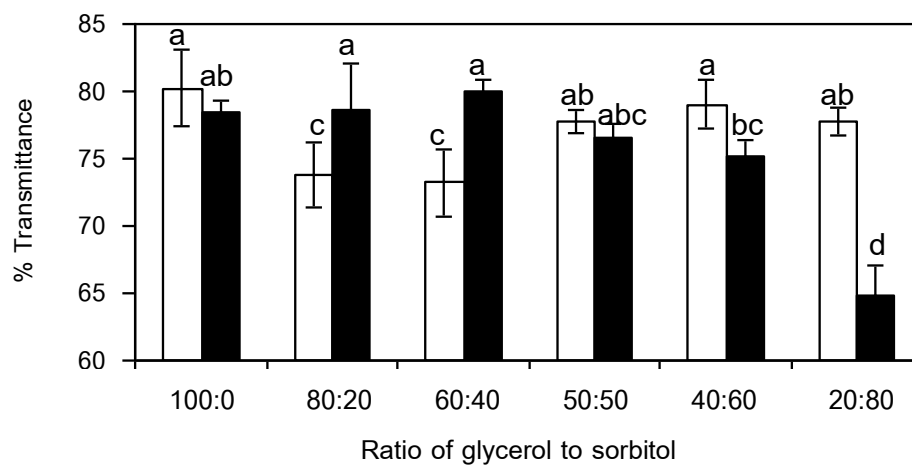
สำหรับผลของการเติมแทนส์กลูทามิเนส พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมเอนไซม์มีค่า EB ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมแทนส์กลูทามิเนสมี EB อยู่ในช่วง 96.88-243.47% ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติมแทนส์กลูทามิเนสมี EB อยู่ในช่วง 161.40-264.51% Jiang และคณะ (2007) อธิบายว่าพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลโปรตีนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเร่งปฏิกิริยาของแทนส์กลูทามิเนสมีผลให้ระยะระหว่างหมู่ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนลดลง ฟิล์มที่ได้จึงมีความสามารถในการยืดตัวที่ต่ำ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bruno และคณะ (2008) ซึ่งศึกษาผลของการเติมแทนส์กลูทามิเนสในฟิล์มเคซีน พบว่าเมื่ออัตราส่วนของแทนส์กลูทามิเนสต่อโซเดียมเคซีนเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 8.3 mg/g ค่า EB ของตัวอย่างฟิล์มลดลงจาก 167 เป็น 134% นอกจากนี้ก่อนหน้านี้ Mariniello และคณะ (2003) รายงานว่าฟิล์มเชิงประกอบของเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันมีค่า EB ลดลงจาก 11.6% เมื่อไม่เติมแทนส์กลูทามิเนส เป็น 7.2% เมื่อเติมแทนส์กลูทามิเนส

4.2.5 ความโปร่งแสง

ผลของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและการเติมแทนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ที่มีต่อความโปร่งแสงของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดแสดงดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ ค.6 โดยความโปร่งแสงของตัวอย่างฟิล์มแสดงในรูปของร้อยละของแสงส่องผ่าน

สำหรับผลของพลาสติกไซเซออร์ โดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่าร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์ม ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vanin และคณะ (2005) ซึ่งศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ต่อความขุ่นของฟิล์มเจลาติน โดยพลาสติกไซเซออร์ที่ศึกษา ได้แก่ กลีเซอรอล โปรพิลีนไกลคอล ไดเอทิลีนไกลคอล และเอทิลีนไกลคอล และแปรความเข้มข้นของ

พลาสติกไซเซอรในช่อง 10-30 g/100 g เจลาติน พบว่าชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรไม่มีผลสำคัญต่อความชื้นของฟิล์มเจลาติน โดยผู้วิจัยรายงานว่าตัวอย่างฟิล์มส่วนใหญ่มีค่าความชื้นประมาณ 0.4 อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่รายงานแตกต่างจากงานวิจัยดังกล่าว โดย Irissin-Mangata และคณะ (2001) รายงานว่าประเภทของพลาสติกไซเซอรมีผลต่อความชื้นมากกว่าความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร โดยพบว่าฟิล์มกยูเต็นที่ใช้พลาสติกไซเซอรประเภทเอมีน (ไดเอทานอลเอมีนและไตรเอทานอลเอมีน) มีความชื้นสูงกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร ในขณะที่ฟิล์มที่ใช้พลาสติกไซเซอรชนิดเดียวกันแต่ความเข้มข้นต่างกัน (10 และ 20 g/100 g ของแข็ง) มีค่าความชื้นไม่แตกต่างกันมากนัก



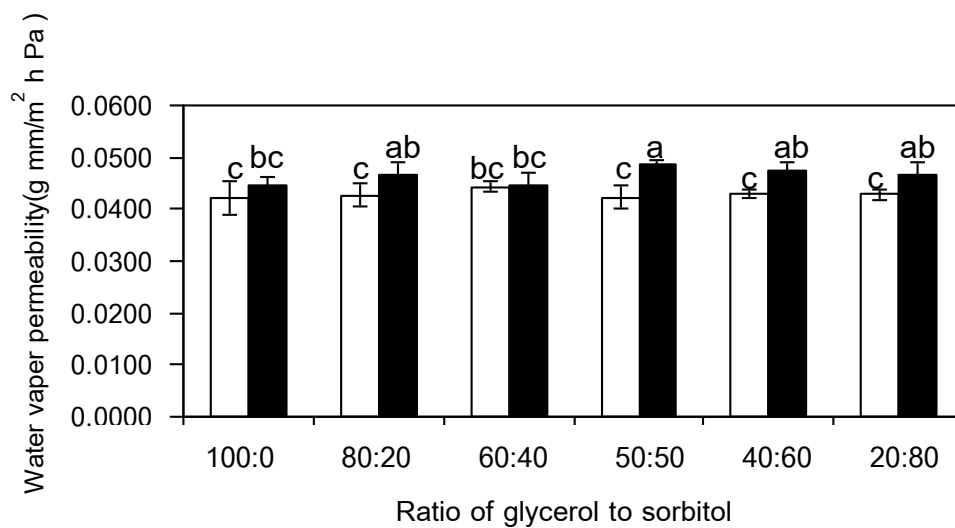
รูปที่ 4.11 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) แทรนส์กลูตามิเนส

สำหรับผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนส พบว่าโดยทั่วไปฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์มีค่าร้อยละของแสงส่องผ่านสูงกว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์ ฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีค่าแสงส่องผ่านอยู่ในช่วง 73.2-80.26% ส่วนฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีค่าแสงส่องผ่านในช่วง 64.83-80.03% ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนที่เป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาของทรานส์กลูตามิเนสทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลโปรตีนสั้นลง โมเลกุลโปรตีนมีการรวมตัวกันแน่นขึ้น รวมทั้งความหนาของฟิล์มที่สูงขึ้น (4.2.1) ส่งผลให้แสงสามารถส่องผ่านฟิล์มได้ลดลง Yi และคณะ (2006) ศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินปลา พบว่าฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 10 หน่วย/g โปรตีนมีความชื้นสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ โดยฟิล์ม

ที่เติมเอนไซม์และบ่มเป็นเวลา 30 นาทีที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 2.90% ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์มีค่าความชื้นเท่ากับ 1.43%

4.2.6 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เป็นผลจากอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรอลและการเติมแทนนัสกลูตามิเนสจากจุลินทรีย์แสดงดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ ค.7



รูปที่ 4.12 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล และไม่เติม (□) หรือเติม (■) แทนนัสกลูตามิเนส

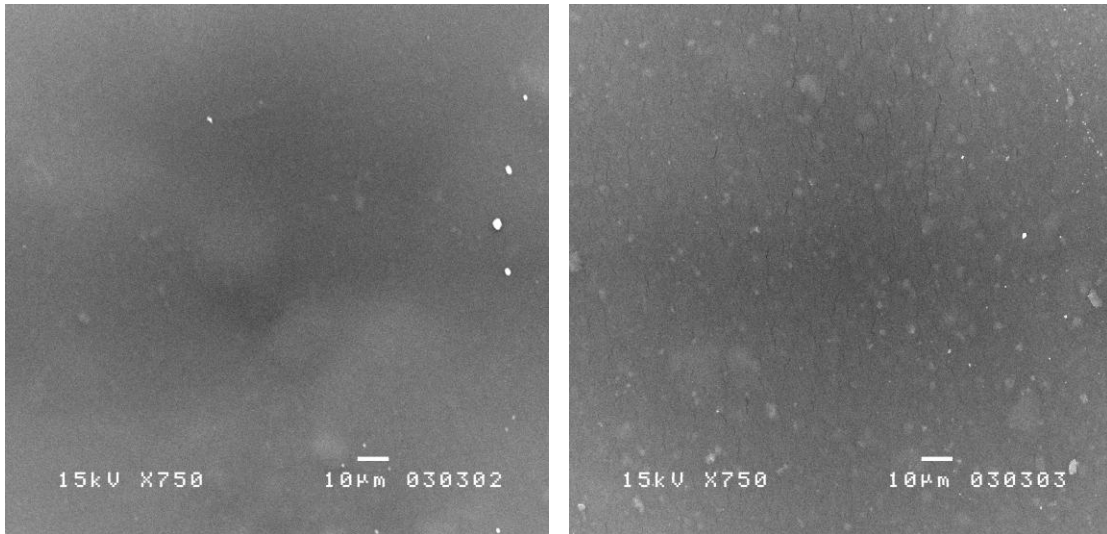
สำหรับผลของพลาสติกไซเซอรอลโดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Miranda และคณะ (2004) ที่ศึกษาสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโคโคซาน และรายงานที่ว่าฟิล์มโคโคซานที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเข้มข้น 0.3% ของโคโคซาน มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

สำหรับผลของการเติมแทนนัสกลูตามิเนสโดยทั่วไปพบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ไม่เติมเอนไซม์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่ไม่เติมแทนนัสกลูตามิเนสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอยู่ในช่วง 0.0421-0.0443 g mm/m² h Pa ส่วนฟิล์มที่เติมแทนนัสกลูตามิเนสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอยู่ในช่วง 0.0447-0.0490 g mm/m² h Pa ซึ่งผลที่ได้สนับสนุนรายงานของ

Yildirim และ Hettiarachchy (1997) ที่พบว่าพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตโดยการเชื่อมข้าม โกลบูลินชนิด 11S ของถั่วเหลืองกับเวย์โปรตีนโดยใช้แทนนัสกลูตามิเนสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ ของไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติมเอนไซม์ โดย Yildirim และ Hettiarachchy (1997) เสนอว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมข้ามโมเลกุล โปรตีนโดยการเร่งปฏิกิริยาของแทนนัสกลูตามิเนสทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลโปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ Tang และคณะ (2005) และ Chambi และ Grosso (2006) ยังรายงานผลที่สอดคล้องกันสำหรับฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง สกัดและฟิล์มเชิงประกอบของเจลาตินและเคซีนตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Di Piero และคณะ (2005) รายงานผลที่แตกต่างไปจากกับงานวิจัยนี้และรายงานส่วนใหญ่ โดยพบว่าฟิล์มเชิง ประกอบจากเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันที่เติมแทนนัสกลูตามิเนสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ ของไอน้ำเท่ากับ $316.3 \text{ cm}^3 \mu\text{m/kPa day m}^2$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติม เอนไซม์ ($594.5 \text{ cm}^3 \mu\text{m/kPa day m}^2$) โดยผู้วิจัยอธิบายว่าผลที่แตกต่างจากรายงานอื่นอาจ เนื่องมาจากโมเลกุลเพกตินเข้าไปแทรกอยู่ภายในโครงร่างแหของโมเลกุลโปรตีน และทำให้ ช่องว่างระหว่างโมเลกุลโปรตีนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมข้ามโดยแทนนัสกลูตามิเนสมีขนาดเล็ก ลง ไอน้ำจึงซึมผ่านฟิล์มได้น้อยลง

4.2.7 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง

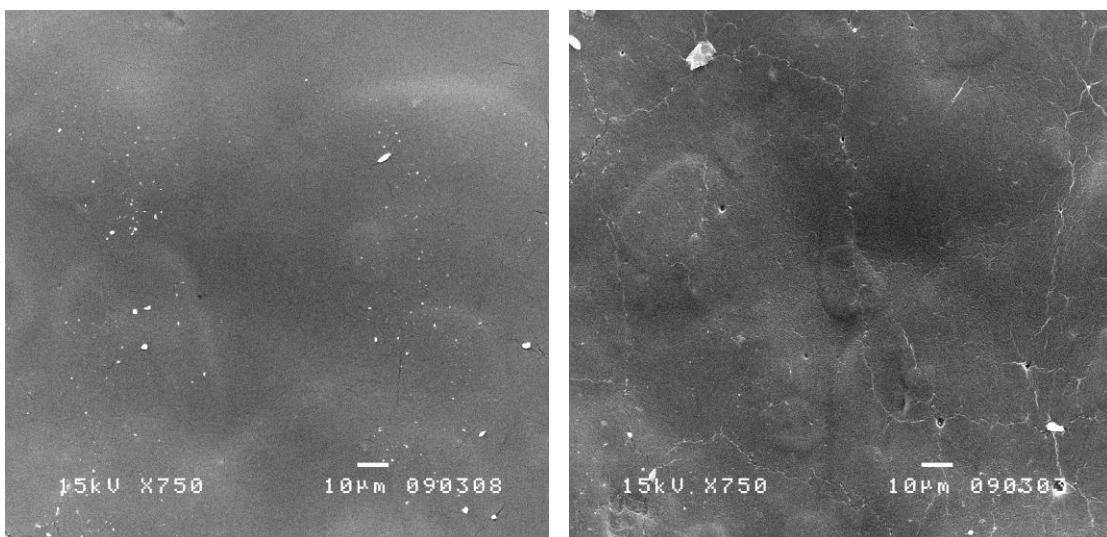
เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์และการเติม แทนนัสกลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง ในงานวิจัยนี้ได้เลือก ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0, 80:20 และ 20:80 ซึ่ง ไม่เติมและเติมแทนนัสกลูตามิเนสจากจุลินทรีย์เข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด มา ศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปที่ 4.13-4.15 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



(ก)

(ข)

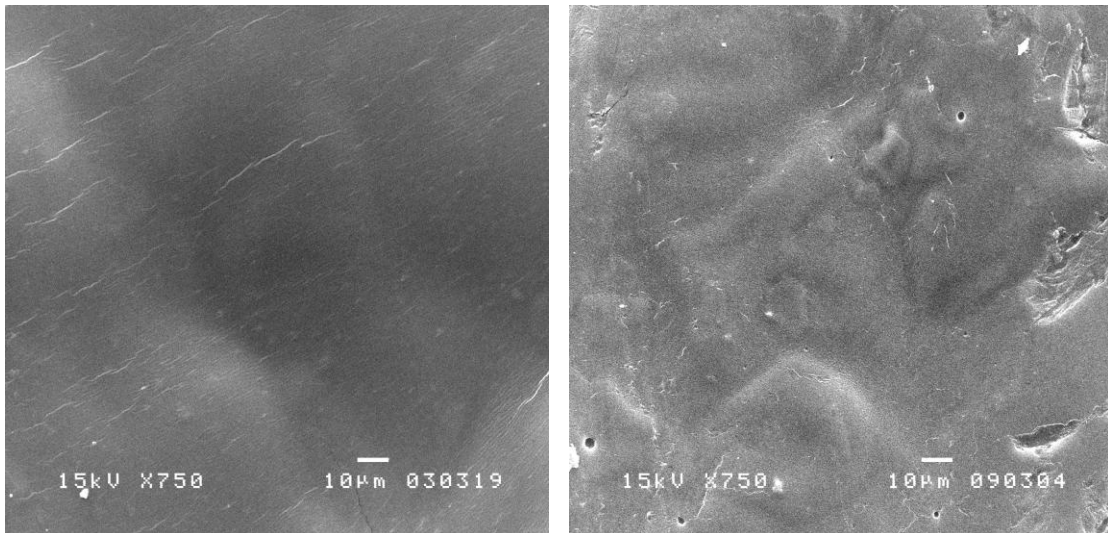
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า



(ก)

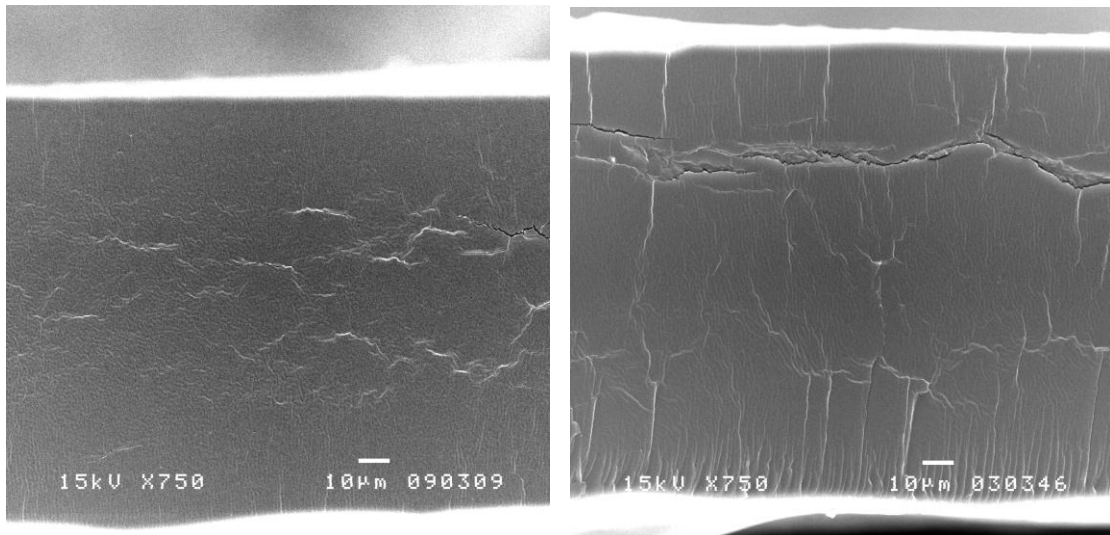
(ข)

รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 20:80 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.13 (ก), 4.14 (ก) และ 4.15 (ก) พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์เพียงชนิดเดียว (อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0) มีพื้นผิวที่เรียบกว่าตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ของผสมของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ (อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และ 20:80) โดยเมื่ออัตราส่วนของซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวที่มีร่องและรอยนูนเพิ่มมากขึ้น Tang และคณะ (2005) เสนอว่าฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบจะมีความสามารถในการป้องกันสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำได้ดีกว่าฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (4.2.6) พบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มที่แปรอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์มีความแตกต่างกันไม่มากนักจึงไม่ส่งผลสำคัญต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวสามารถเห็นได้ชัดเจนกว่าในแง่การเติมแทรนส์กลูทามิเนสดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข), 4.14 (ข) และ 4.15 (ข) โดยพบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมแทรนส์กลูทามิเนสมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและไม่สม่ำเสมอเห็นได้ชัด ผลที่ได้นี้สอดคล้องสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$) ในตัวอย่างฟิล์มที่เติมแทรนส์กลูทามิเนส ผลการศึกษาที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้โดย Tang และคณะ (2005)

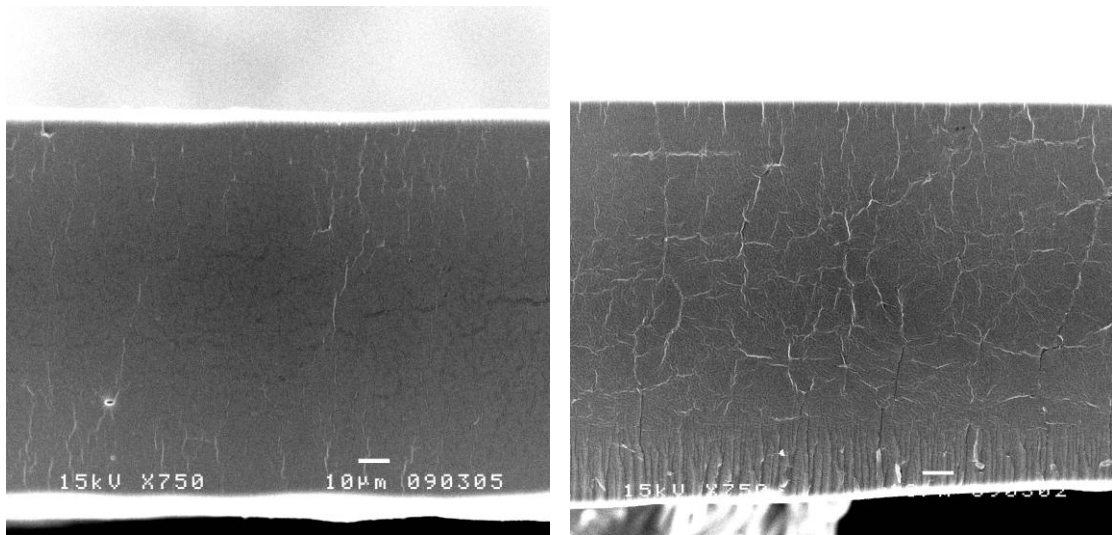
รูปที่ 4.16-4.18 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



(ก)

(ข)

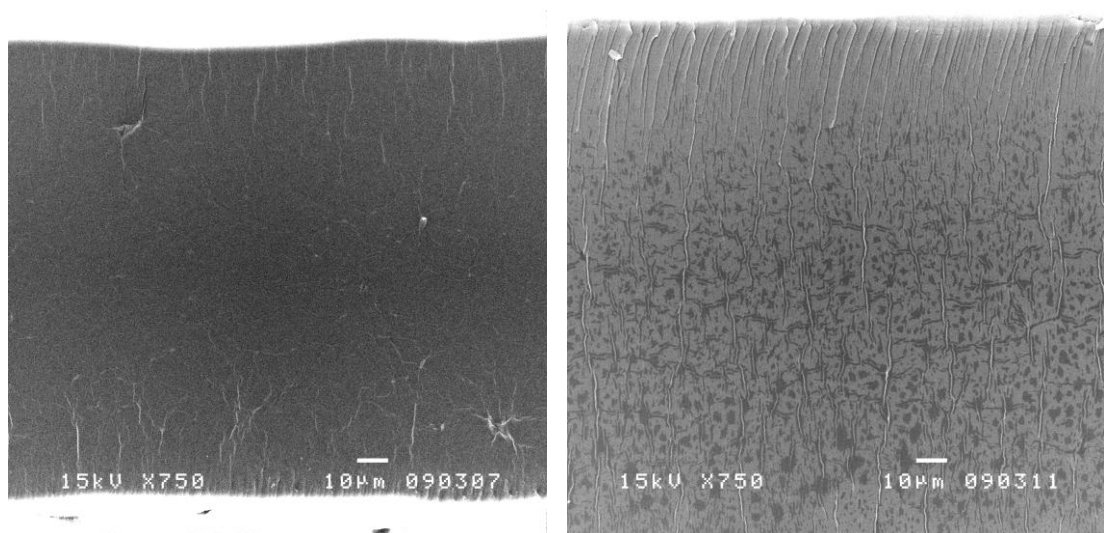
รูปที่ 4.16 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูทามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูทามิเนส 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.17 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูตามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูตามิเนส 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 20:80 (ก) ไม่เติมแทรนส์กลูตามิเนส และ (ข) เติมแทรนส์กลูตามิเนส 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด ถ่ายที่กำลังขยาย 750 เท่า

จากรูปที่ 4.16 (ก) 4.17 (ก) และ 4.18 (ก) พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจนของลักษณะภาคตัดขวางระหว่างฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้พลาสติกไฮดรอกซีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมแทนนินสกัดจากถั่วเหลืองให้ตัวอย่างฟิล์มมีลักษณะภาคตัดขวางที่มีความหนาแน่นมากขึ้น (รูปที่ 4.16 (ข) 4.17 (ข) และ 4.18 (ข)) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมแทนนิน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเชื่อมข้ามโมเลกุลโพรตีนโดยแทนนินสกัดจากถั่วเหลือง โครงสร้างภาคตัดขวางที่หนาแน่นของฟิล์มที่เติมแทนนินสกัดจากถั่วเหลือง สอดคล้องกับค่า TS ที่สูง รวมทั้งค่า EB และความโปร่งแสงที่ต่ำของฟิล์มที่เติมแทนนินสกัดจากถั่วเหลือง (Tang *et al.*, 2005)

จากผลการวิจัยที่ได้จากหัวข้อ 4.2 นี้ ผู้วิจัยได้คัดเลือกตัวอย่างฟิล์มที่มีค่า TS และ EB ที่สูง ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปทดลองใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหารในการวิจัยขั้นต่อไป ค่า TS และ EB ของตัวอย่างฟิล์มต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ฟิล์มที่จะนำไปใช้ห่อหุ้มอาหารควรมีทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่สูง จากตารางที่ 4.1 พบว่าตัวอย่างฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 และไม่เติมแทนนินสกัดจากถั่วเหลืองมีค่า EB สูงที่สุด (264.51%) อย่างไรก็ตามตัวอย่างฟิล์มดังกล่าวมีค่า TS ต่ำที่สุด (0.69 MPa) ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานสำหรับตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทนนินสกัดจากถั่วเหลืองมีค่า TS สูงที่สุด (1.23 MPa) ในขณะที่เดียวกันก็มีค่า EB ที่สูงด้วย (243.47%) จึงเลือกตัวอย่างฟิล์มดังกล่าวเพื่อศึกษาต่อไปในหัวข้อ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูตามิเนส

อัตราส่วนของ กลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล	ความต้านทานแรงดึงขาด (MPa)	การยืดตัวถึงจุดขาด (%)
<i>ไม่เติมแทรนส์กลูตามิเนส</i>		
100:0	0.69 ^f ±0.10	264.51 ^a ±9.94
80:20	0.73 ^{fg} ±0.07	242.11 ^b ±7.41
60:40	0.81 ^{efg} ±0.08	251.37 ^{ab} ±8.34
50:50	0.92 ^{cde} ±0.05	224.12 ^c ±6.32
40:60	1.05 ^{bc} ±0.06	197.97 ^d ±9.34
20:80	1.21 ^a ±0.07	161.40 ^e ±5.22
<i>เติมแทรนส์กลูตามิเนส</i>		
100:0	1.10 ^{ab} ±0.10	239.71 ^b ±9.52
80:20	1.23 ^a ±0.07	243.47 ^b ± 10.94
60:40	0.93 ^{cde} ±0.09	195.07 ^d ± 9.90
50:50	0.84 ^{def} ±0.08	99.63 ^f ±6.57
40:60	0.97 ^{cd} ±0.06	110.71 ^f ±8.08
20:80	1.18 ^{ab} ±0.06	96.88 ^f ±6.00

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.3 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมแทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์

การเชื่อมข้ามของโมเลกุลโปรตีนในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดโดยการเร่งปฏิกิริยาของแทรนส์กลูตามิเนสสามารถพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE โดยศึกษาในตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0, 80:20, 50:50 และ 20:80 และเติมแทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีน ผลแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าการเติมแทรนส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแถบโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 84, 66 และ 45 kDa โดย Tang และคณะ (2006) เสนอว่าโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุลดังกล่าวอาจเป็นหน่วยย่อย

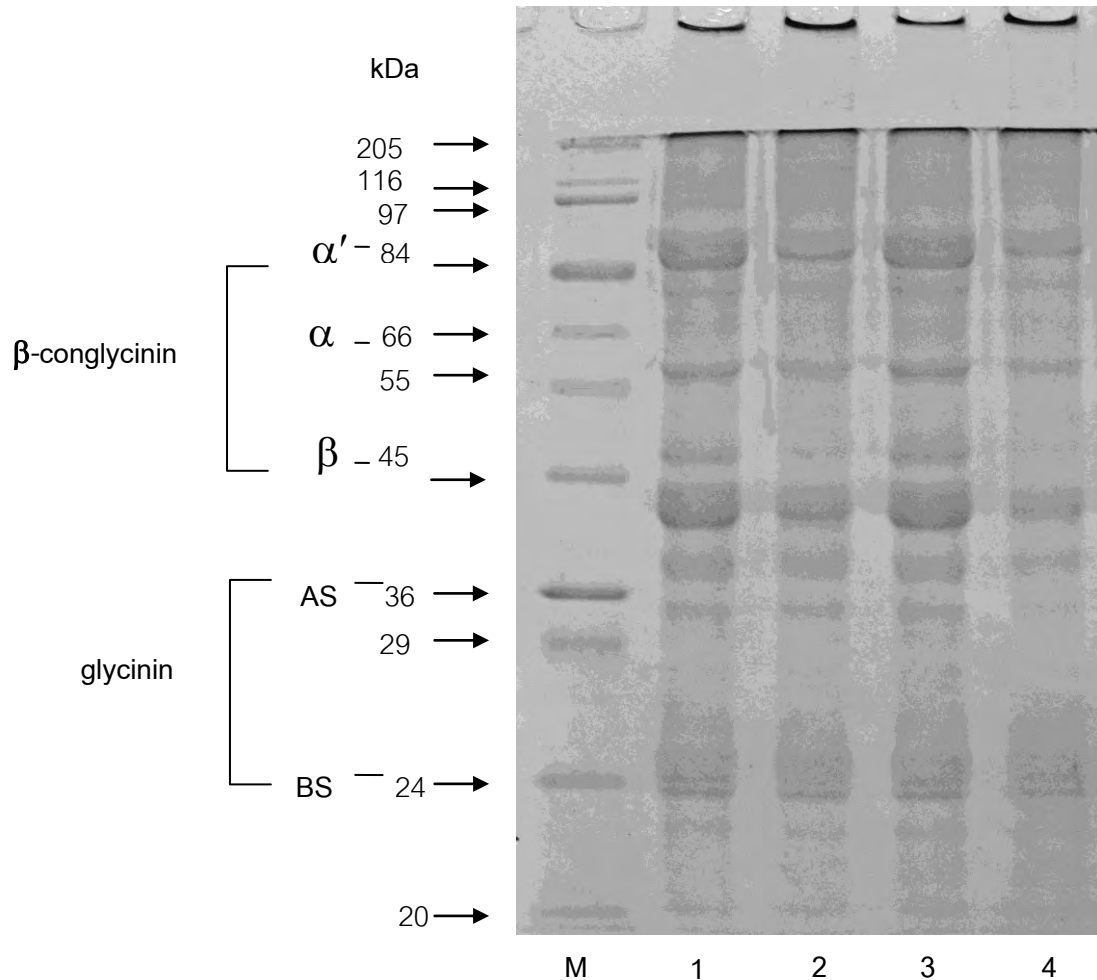
แอลฟาไพโรรม์ แอลฟา และเบต้า ตามลำดับ ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของเบต้า-คอนไกลซินิน โดยแถบโปรตีนดังกล่าวมีความเข้มข้นในตัวอย่างฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนส (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ช่องที่ 3 และ 5) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูตามิเนส (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ช่องที่ 2 และ 4) เนื่องจากทรานส์กลูตามิเนสเร่งการย้ายหมู่เอซิลของแกมมา-คาร์บอกซีเอมิคของหน่วยกลูตามีนไปยังเอพซิลอนอะมิโนของหน่วยย่อยไลซีน เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ ϵ -(γ -glutamyl)lysine isopeptide bond เชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน และทำให้โมเลกุลของโปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้น จนไม่สามารถเคลื่อนผ่าน stacking gel ลงมาได้ โดยเห็นได้จากแถบโปรตีนที่อยู่ด้านบน stacking gel มีความเข้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ช่องที่ 3 และ 5)

ในทำนองเดียวกันพบว่าแถบโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 36 kDa มีความเข้มข้นลดลง ซึ่ง Tang และคณะ (2006) เสนอว่าโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุลดังกล่าวอาจเป็นหน่วยย่อยที่เป็นกรด (acidic subunit, AS) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของไกลซินิน

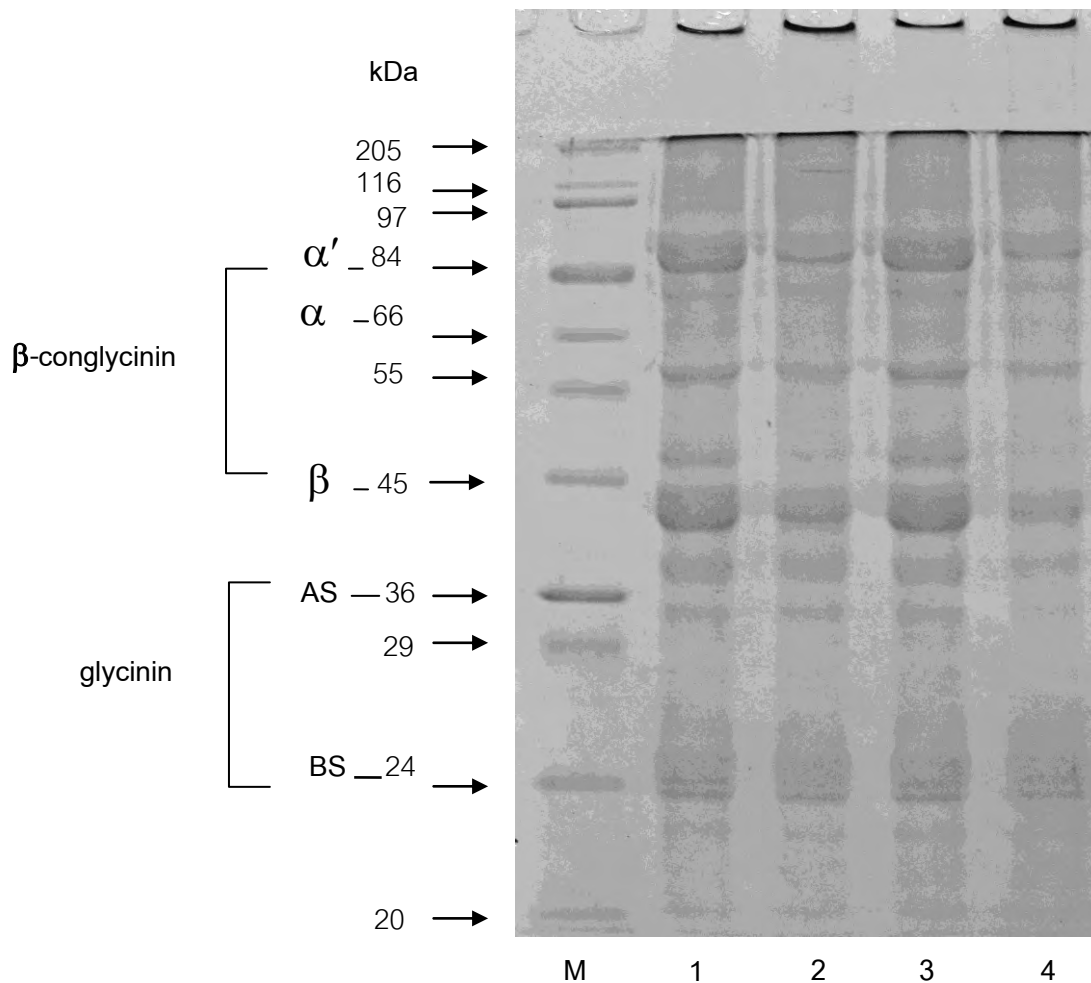
การเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนนั้นส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม โดยตัวอย่างฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดลดลง (ตารางที่ 4.1) เป็นที่น่าสังเกตว่าแถบโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 24 kDa มีความเข้มไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.19 และ 4.20 ช่องที่ 2, 3, 4 และ 5) Tang และคณะ (2006) เสนอว่าแถบโปรตีนที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นหน่วยย่อยที่เป็นเบส (basic subunit, BS) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของไกลซินิน โดยอธิบายว่าการที่ความเข้มของแถบหน่วยย่อยที่เป็นเบสของไกลซินินไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมทรานส์กลูตามิเนส มีสาเหตุเนื่องมาจากหน่วยย่อยที่เป็นเบสมีตำแหน่งอยู่ด้านในของไกลซินินจึงทำให้ไม่สามารถเข้าถึงเอพิไซท์ของทรานส์กลูตามิเนส ส่งผลให้ไม่เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน

ความเข้มของแถบโปรตีนที่ลดลงจากการเติมทรานส์กลูตามิเนสที่พบในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับรายงานของ Mariniello และคณะ (2003) ที่ศึกษาผลของการเติมทรานส์กลูตามิเนสในฟิล์มเชิงประกอบของเพกตินและแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน โดยเติมทรานส์กลูตามิเนสที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 0.18, 0.75 และ 1.5 หน่วย/g โปรตีน พบว่าเมื่อเติมทรานส์กลูตามิเนส แถบของโปรตีนของแป้งถั่วเหลืองซึ่งได้แก่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 84, 66, 45 และ 36 kDa มีความเข้มข้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมทรานส์กลูตามิเนส และได้อธิบายเพิ่มเติมว่าทรานส์กลูตามิเนสมีผลทำให้เกิดพันธะเชื่อม

ข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้นจนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่าน stacking gel ลงมาได้



รูปที่ 4.19 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ช่องที่ 1 และ 2 ได้แก่ ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 ที่เติม แทรนส์กลูตามีนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ตามลำดับ ช่องที่ 3 และ 4 ได้แก่ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 ที่เติม แทรนส์กลูตามีนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ตามลำดับ M คือโปรตีน มาตรฐาน AS คือหน่วยย่อยที่เป็นกรดของไกลซินิน และ BS คือหน่วยย่อยที่เป็นเบสของ ไกลซินิน



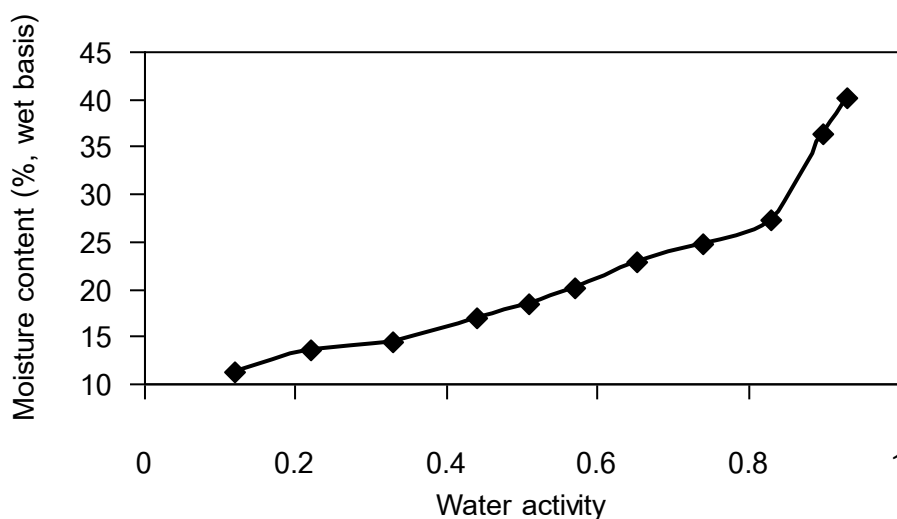
รูปที่ 4.20 รูปแบบของแถบโปรตีนของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ช่องที่ 1 และ 2 ได้แก่ ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 50:50 ที่เติม แทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ตามลำดับ ช่องที่ 3 และ 4 ได้แก่ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 20:80 ที่เติม แทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 0 และ 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ตามลำดับ M คือโปรตีน มาตรฐาน AS คือหน่วยย่อยที่เป็นกรดของไกลซินิน และ BS คือหน่วยย่อยที่เป็นเบสของ ไกลซินิน

เมื่อพิจารณาผลของพลาสติกไซเซอร์ พบว่าพลาสติกไซเซอร์ไม่มีผลต่อการเชื่อมข้าม ระหว่างโมเลกุลโปรตีนโดยทรานส์กลูตามิเนสดังสังเกตได้จากความเข้มของแถบโปรตีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง (แถบของหน่วยย่อยของเบต้า-คอนไกลซินินที่น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 84, 66 และ 45 kDa และแถบของหน่วยย่อยของไกลซินินที่น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 36 และ 24

kDa) (รูปที่ 4.19 และ 4.20 เปรียบเทียบระหว่างช่องที่ 2 กับ 4 และช่องที่ 3 กับ 5) โดยพบลักษณะดังกล่าวในทุกอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล

4.4 พฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

พฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มมีความสำคัญต่อการนำฟิล์มไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารในภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ (หรือวอเตอร์แอกทิวิตี) แตกต่างกัน รูปที่ 4.21 และตารางที่ ค.8 แสดงเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีน ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เลือกมาแล้วว่ามี TS และ EB สูง พบว่าตัวอย่างฟิล์มมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นแตกต่างกันเป็น 2 ช่วงโดยในช่วงวอเตอร์แอกทิวิตีเท่ากับ 0.1-0.8 ตัวอย่างฟิล์มมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่ำกว่าในช่วงวอเตอร์แอกทิวิตี >0.8 จึงสามารถนำฟิล์มดังกล่าวไปใช้กับอาหารประเภทความชื้นต่ำ (low moisture food, วอเตอร์แอกทิวิตี <0.6) และอาหารประเภทความชื้นปานกลาง (intermediate moisture food, วอเตอร์แอกทิวิตี 0.6-0.9) (Barbosa - Cánovas *et al.*, 2003) กลัวยกวนที่ใช้ในการวิจัยนี้มีวอเตอร์แอกทิวิตี 0.721 ซึ่งอยู่ในช่วงวอเตอร์แอกทิวิตีที่ฟิล์มมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่ำจึงนำตัวอย่างฟิล์มดังกล่าวไปใช้ในการศึกษาการเก็บรักษาถั่วด้วยกวนในหัวข้อที่ 4.5 ต่อไป



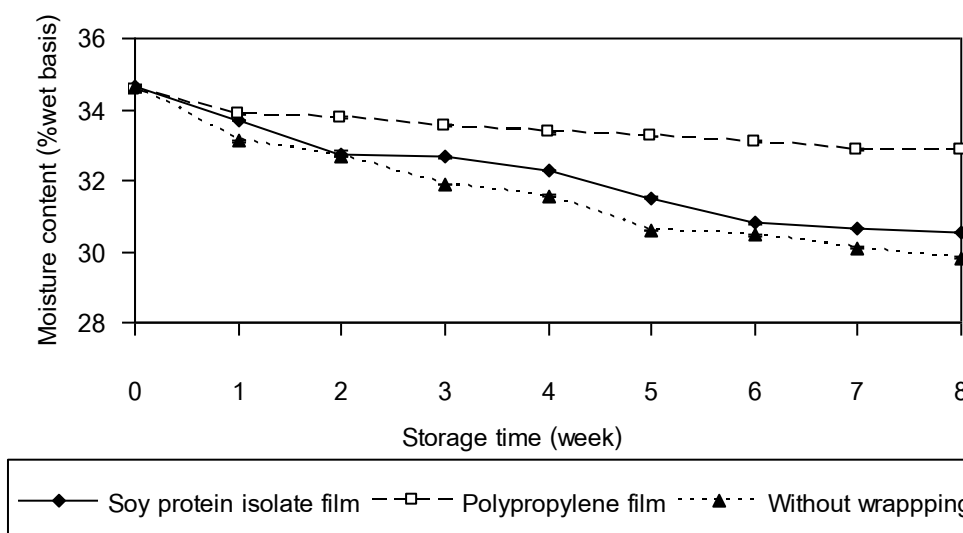
รูปที่ 4.21 เส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ที่ 25 °C

4.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

ตัวอย่างอาหารที่เลือกมาใช้ในการศึกษาขั้นตอนนี้ ได้แก่ กล้วยกวน เนื่องจากเป็นอาหารประเภทความชื้นปานกลาง และมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ที่ชัดเจนในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่ ปริมาณความชื้น ความแข็ง สี และการเกิดออกซิเดชันของไขมัน โดยเปรียบเทียบระหว่างกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแพนธอสังกูทามินเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีน ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เลือกมาแล้วว่ามี TS และ EB สูง กับกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม จากนั้นบรรจุตัวอย่างกล้วยกวนในถุงพอลิพรอพิลีนและปิดผนึกด้วยความร้อน ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกล้วยกวนที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

4.5.1 ปริมาณความชื้น

รูปที่ 4.22 และตารางที่ ค.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเปรียบเทียบกับกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม



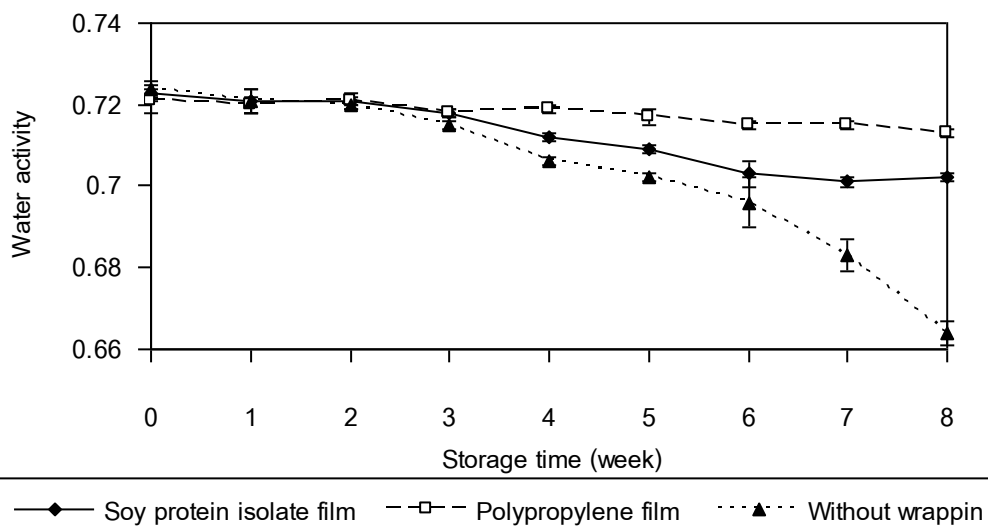
รูปที่ 4.22 ปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นกล้วยกวนทุกตัวอย่างมีปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการเคลื่อนย้ายของ

ความชื้น (moisture migration) จากกล้วยกวนซึ่งมีวอเตอร์แอกทิวิตีสูงกว่าไปยังบรรยากาศรอบๆ ซึ่งมีวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า โดยปริมาณความชื้นของตัวอย่างกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้มมีค่าลดลงมากที่สุด รองลงมาได้แก่กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดและกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนตามลำดับ จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.6 ตัวอย่างฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมทรานส์กลูตามีนเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โพรตีนมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ $244.31 \text{ g mm/m}^2 \text{ h Pa}$ ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าฟิล์มโพรตีนโดยทั่วไปมีข้อจำกัดในด้านการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของโพรตีนเอง รวมทั้งในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มมีการเติมพลาสติกไฮเซออร์ที่มีสมบัติชอบน้ำในความเข้มข้นที่สูง (Tang and Jiang, 2007) ตัวอย่างกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดจึงมีการลดลงของปริมาณความชื้นในอัตราที่เร็วกว่าตัวอย่างกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนซึ่งมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้เป็นอย่างดี (Hanlon, 1992)

4.5.2 วอเตอร์แอกทิวิตี

รูปที่ 4.23 และตารางที่ ค.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดเปรียบเทียบกับกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

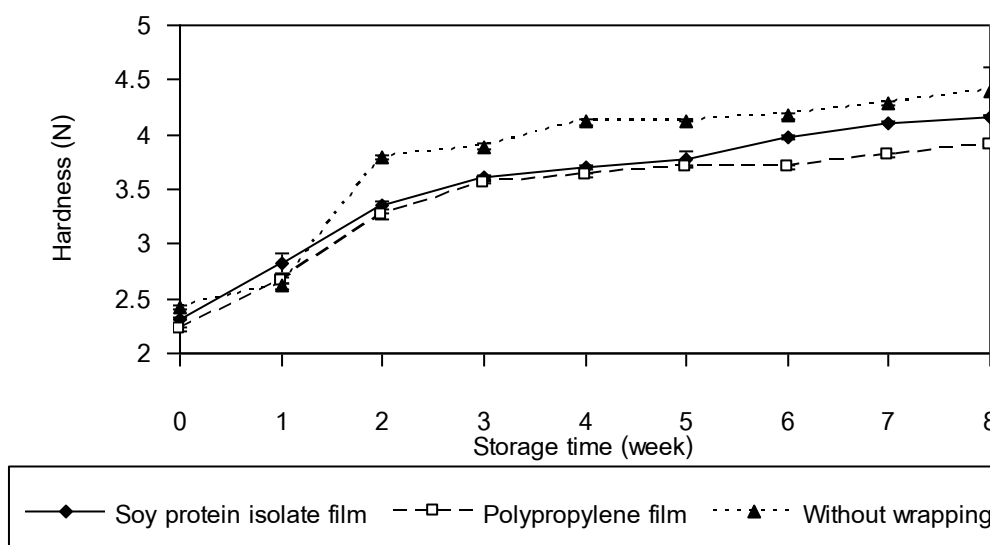


รูปที่ 4.23 วอเตอร์แอกทิวิตีในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ตัวอย่างกล้วยกวนมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเริ่มต้นเท่ากับ 0.721 (สัปดาห์ที่ 0) จัดเป็นอาหารประเภทความชื้นปานกลาง (Barbosa - Cánovas *et al.*, 2003) จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น กล้วยกวนทุกตัวอย่างมีวอเตอร์แอกทิวิตีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียความชื้นจากกล้วยกวนไปยังบรรยากาศรอบๆ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น (4.5.1) โดยในช่วงสามสัปดาห์แรก วอเตอร์แอกทิวิตีของกล้วยกวนทุกตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามหลังจากสัปดาห์ที่ 4 วอเตอร์แอกทิวิตีของตัวอย่างกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้มมีค่าลดลงมากที่สุด รองลงมาได้แก่กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด และกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนตามลำดับ

4.5.3 ความแข็ง

ในงานวิจัยนี้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของกล้วยกวนในรูปความแข็ง ผลของการห่อตัวอย่างกล้วยกวนด้วยฟิล์มต่างชนิดหรือไม่ห่อหุ้มแสดงดังรูปที่ 4.24 และตารางที่ ค.11



รูปที่ 4.24 ความแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

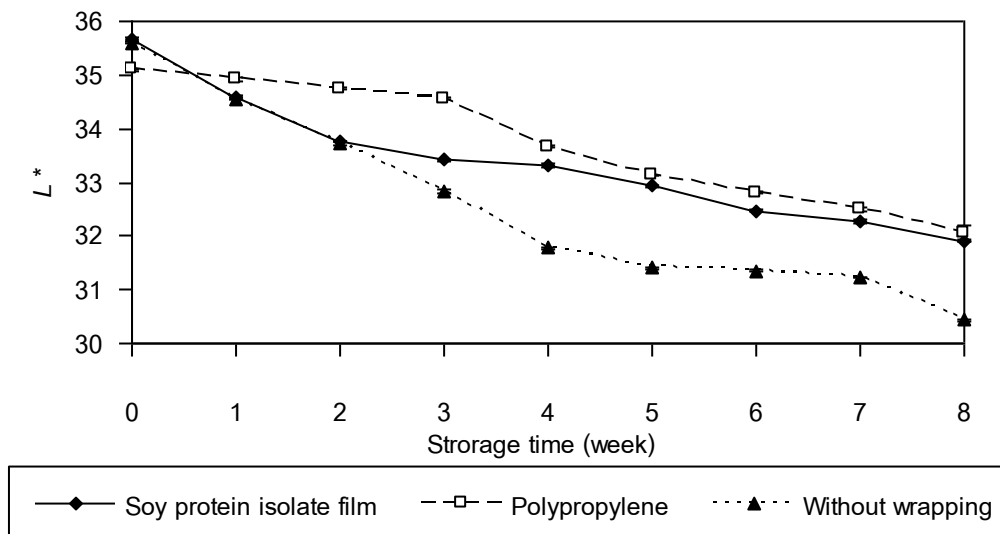
จากรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นกล้วยกวนทุกตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ตัวอย่างกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้มมีความแข็งสูงที่สุด รองลงมาได้แก่

กล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและฟิล์มพอลิพรอพิลีนตามลำดับ โดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากการสูญเสียความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (สิริรัฐสุดประเสริฐ, 2546)

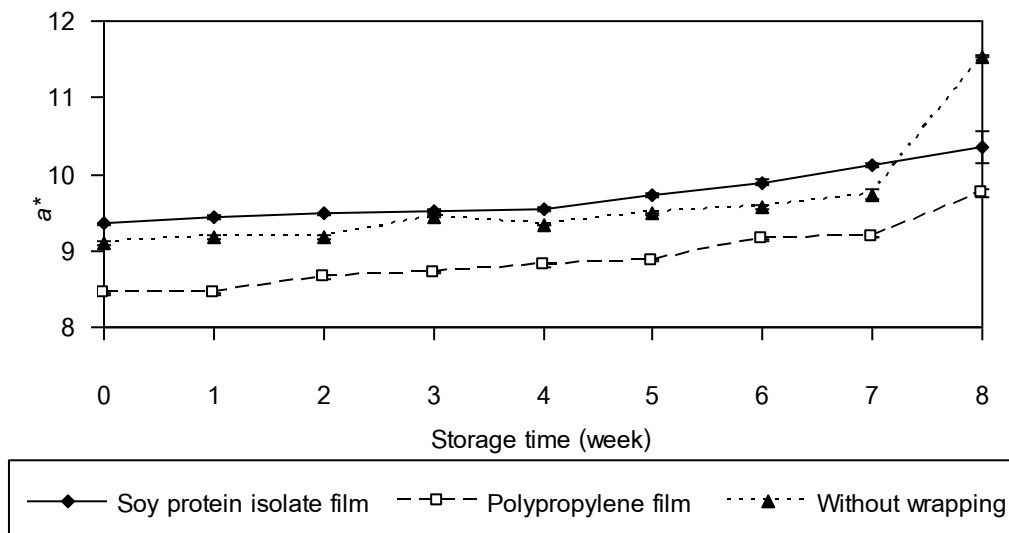
4.5.4 สี

เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า กล้วยกวนที่ผลิตเสร็จใหม่ๆ มีสีน้ำตาลแดง เมื่อเก็บรักษาไว้สีของกล้วยกวนจะเข้มขึ้น รูปที่ 4.25-4.27 และตารางที่ ค.12-ค.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* , a^* และ b^* ของกล้วยกวนในระหว่างการเก็บรักษา

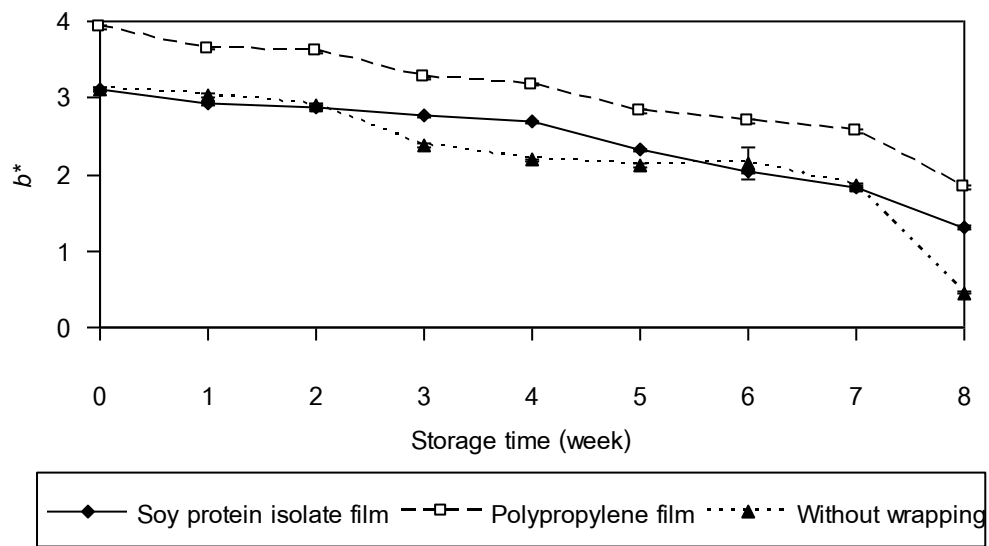
พบว่าในระหว่างการเก็บรักษากล้วยกวนทุกตัวอย่างมีความสว่าง (L^*) และสีเขียว ($+b^*$) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่สีแดง ($+a^*$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สีที่เข้มขึ้นของผลิตภัณฑ์ประเภทผลไม้แห้งเป็นผลมาจากสารประกอบที่มีสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่างๆ (Stadtman *et al.*, 1946) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่มีผลสำคัญที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้คือการเกิดสีน้ำตาลแบบไมยาร์ด (Maillard browning) (Sabry, 1961) สำหรับกล้วยกวนในงานวิจัยนี้มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีประมาณ 0.7 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ปฏิกิริยาไมยาร์ดเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูง (Fennema, 1996) นอกจากการเกิดสีน้ำตาลแบบไมยาร์ดแล้ว การสูญเสียความชื้นจากผลิตภัณฑ์ผลไม้ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ประเภทผลไม้อบแห้ง (สิริรัฐสุดประเสริฐ, 2546; Bolin and Steele, 1987) ความแตกต่างของสีของกล้วยกวนที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มต่างชนิดหรือไม่มีการห่อหุ้มอาจเป็นผลจากอัตราการสูญเสียความชื้นที่แตกต่างกัน (4.5.1) จากผลการวิจัยนี้พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ตัวอย่างกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้มและตัวอย่างที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความสว่าง (L^*) และสีเขียว ($+b^*$) ต่ำกว่า และมีสีแดง ($+a^*$) สูงกว่าตัวอย่างที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 4.25 ค่า L^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม



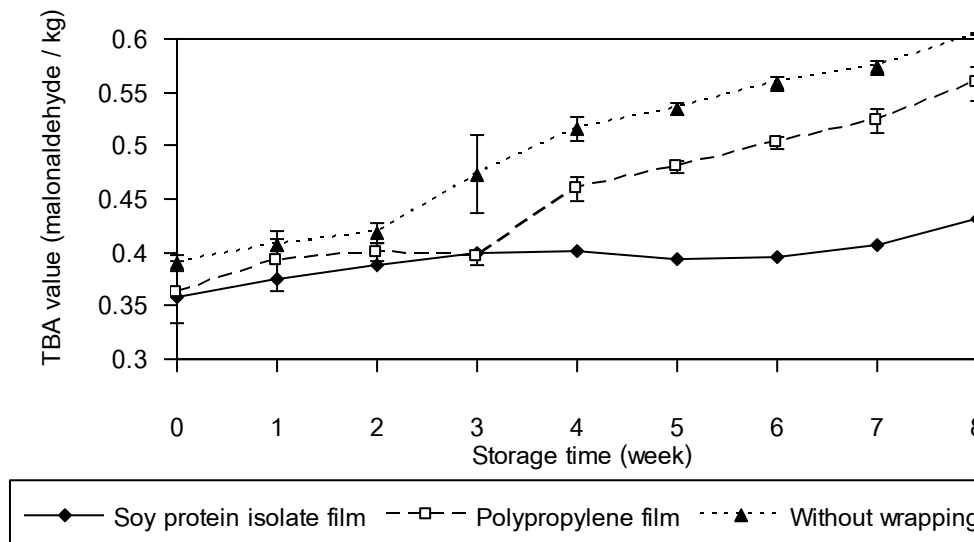
รูปที่ 4.26 ค่า a^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม



รูปที่ 4.27 ค่า b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

4.5.5 ค่ากรดไฮโดรบาบิฟูริก (TBA)

กล้วยกวนมีกะทิเป็นส่วนผสม ไขมันในกะทิสามารถเกิดออกซิเดชันได้ขึ้นกับความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนของฟิล์มที่ใช้ห่อหุ้ม ศิริวรรณเนติวรรณ (2531) รายงานว่าไขมันในมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณ 92% และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวประมาณ 8% ซึ่งกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถถูกออกซิไดส์ได้ในภาวะที่มีออกซิเจน ค่า TBA ของตัวอย่างกล้วยกวนแสดงในรูปที่ 4.28 และตารางที่ ค.15



รูปที่ 4.28 ค่ากรดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีน และกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

จากรูปที่ 4.28 พบว่ากล้วยกวนทุกตัวอย่างมีค่า TBA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของพนิดา รัตนปิติกรรณ์ (2541) โดย Matsushita (1990) และ Kilcast และ Subramaniam (2000) อธิบายว่าการที่ภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุมีออกซิเจนอยู่หรือวัสดุที่เป็นบรรจุภัณฑ์ยอมให้ออกซิเจนผ่านได้ ทำให้เกิดออกซิเดชันของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในภาวะที่มีแสงซึ่งจะได้มาโลแนลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา จากงานวิจัยนี้พบว่าค่า TBA เพิ่มขึ้นสูงสุดในตัวอย่างกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม ตามด้วยตัวอย่างที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนและตัวอย่างที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความสามารถด้านการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนที่ดีมาก ซึ่งยืนยันได้จากการนำตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและฟิล์มพอลิพรอพิลีนไปวัดสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 55% (ภาคผนวก ก.2) และพบว่ามีความเท่ากับ 71.0 และ 2008.5 cm³/m² day ตามลำดับ การที่ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความสามารถด้านการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนที่ดีเนื่องมาจากธรรมชาติของโปรตีนที่ประกอบด้วยหมู่เคมีที่มีสมบัติชอบน้ำทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี เกิดเป็นอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงซึ่งมีผลจำกัดการซึมผ่านของออกซิเจน (McHugh and Krochta, 1994) อย่างไรก็ตามค่า TBA ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นอาจเป็นผลจากรูปแบบของการห่อหุ้ม ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การห่อในลักษณะปิดหุ้มท้ายจึงทำให้ยังคงมีช่องทางที่ออกซิเจนสามารถผ่านเข้าได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยทั่วไปพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความต้านทานแรงดึงขาดลดลง ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ความหนา ปริมาณความชื้น ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สำหรับการยืดตัวถึงจุดขาดพบว่าค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นในช่วง 50-65% แต่เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มสูงถึง 70% การยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง

สำหรับผลของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล พบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความหนา ความโปร่งแสง และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลลดลง ปริมาณความชื้น และการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) แต่ความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับผลของการเติมแทนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมแทนส์กลูทามิเนสมีความหนาและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณความชื้น การยืดตัวถึงจุดขาด และความโปร่งแสงมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) ส่วนความต้านทานแรงดึงขาดนั้นพบว่าที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 100:0 และ 80:20 การเติมแทนส์กลูทามิเนสทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเอนไซม์ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มที่เติมและไม่เติมเอนไซม์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การเร่งปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลโปรตีนโดยแทนส์กลูทามิเนสยืนยันได้โดยการวิเคราะห์รูปแบบของแถบโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE โดยพบว่าการเติมแทนส์กลูทามิเนสมีผลทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนถั่วเหลือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 84, 66 และ 45 kDa ซึ่งได้แก่หน่วยย่อยแอลฟาไพรม์ แอลฟา และเบต้าของเบต้า-คอนไกลินิน เกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งปรากฏเป็นแถบสีเข้มที่ด้านบนของของเจล

จากงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่มีทั้งความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดที่สูงเหมาะที่จะนำไปใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยตัวอย่างฟิล์มดังกล่าวมีค่าความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 1.23 MPa และค่าการยืดตัวถึงจุดขาดเท่ากับ 243.47% สำหรับพฤติกรรมการดูดความชื้น ตัวอย่างฟิล์มนี้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในอัตราที่ต่ำในช่วงวอเตอร์แอกทิวิตีเท่ากับ 0.1-0.8 จึงสามารถนำฟิล์มดังกล่าวไปใช้กับอาหารประเภทความชื้นต่ำและความชื้นปานกลาง เช่น ก๋วยเตี๋ยวซึ่งมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีประมาณ 0.7

สำหรับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัด เปรียบเทียบกับก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีนและก๋วยเตี๋ยวที่ไม่มีการห่อหุ้ม พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ตัวอย่างก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดมีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี ความแข็ง สี และค่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว (ยกเว้นค่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว) เกิดขึ้นในอัตราที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน สำหรับค่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว พบว่าตัวอย่างก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดมีการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวในอัตราที่ต่ำกว่าตัวอย่างก๋วยเตี๋ยวที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน ทั้งนี้เนื่องจากสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนที่ต่ำกว่าของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด

ข้อเสนอแนะ

ตัวอย่างฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนการของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทรนส์กลูทามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/g โพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่พัฒนาได้ในงานวิจัยนี้มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดที่สูง สามารถใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหารได้โดยไม่มีการฉีกขาด นอกจากนี้ฟิล์มดังกล่าวยังสามารถช่วยรักษาคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของอาหารประเภทความชื้นปานกลางได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารที่ไม่มีการห่อหุ้ม สมบัติที่เด่นอีกประการหนึ่งของฟิล์มที่พัฒนาได้นี้คือมีสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน อย่างไรก็ตามความสามารถโดยทั่วไปในการช่วยรักษาคุณภาพของอาหารของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดยังด้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม

สังเคราะห์ชนิดพอลิพรอพิลีน ข้อจำกัดสำคัญของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดคือการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟิล์มที่เติมแทนนส์กลูทามิเนส จึงควรศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มชนิดนี้ ซึ่งอาจทำได้โดยผลิตเป็นฟิล์มเชิงประกอบร่วมกับสารอื่นที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เช่น ลิพิด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์. 2545. การผลิตและการเก็บรักษาฟิล์มบริโกล์ได้จากโปรตีนละลายน้ำจากปลาทรายแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พนิดา รัตนปิติภรณ์. 2541. การพัฒนาฟิล์มเคลือบบริโกล์ได้ชนิดฟิล์มประกอบสำหรับเคลือบปลาเส้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวรรณ เนติวรรณนท์. 2531. ชนิดของการหมักเห็ดขึ้นของน้ำมันมะพร้าวและวิธีการป้องกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิริรัฐ สุคประเสริฐ. 2546. การควบคุมการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์กล้วย *Musa sapientum* L. ตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุนันทา ทรงกัลยาณวัตร. 2550. สมบัติของเจลโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เตรียมโดยแทรกสีกุลูทามินเนสและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Aeschlimann, D. and Paulsson, M. 1994. Transglutaminases: protein cross-linking enzyme in tissues and body fluids. Journal of Thrombosis and Haemostasis 71 (36): 402-415.
- Ando, H., Adachi, M., Umeda, K., Matsumura, A., Nonaka, M., Uchio, R., Tanaka, H. and Motoki, M. 1989. Purification and characteristics of a novel transglutaminase derived from microorganism. Agricultural and Biological Chemistry 53 (10): 2613-2617.
- Anonymous. 1993. Biodegradable polymers forge ahead. Biocycle 34 (9): 72-74.
- Anonymous. 1997. Edible films solve problems. Food Technology 51 (2): 60-64.

- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis, 17th ed. Washington, D. C.: The Association of Analytical Chemists.
- Arvanitoyannis, I. A., Nakayama, A. and Aiba, S. 1998. Chitosan and gelatin based edible film: state diagrams, mechanical and permeation properties. Carbohydrate Polymers 37 (4): 371-382.
- ASTM. 1999. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Banker, G. S. 1966. Film coatings theory and practice. Journal of Pharmaceutical Sciences 55 (1): 81-90.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fernández-Molina, J. J., Alzamora, S. M., Tapia, M. S., López-Malo, A. and Chanes, J. W. 2003. Handling and preservation of fruits and vegetables by combined methods for rural areas. FAO Agricultural Services Bulletin 149. Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations.
- Bolin, H. R. and Steele, R. J. 1987. Nonenzymatic browning in dried apples during storage. Journal of Food Science 52 (6): 1654-1657.
- Bourtoom, T. 2008. Plasticizer effect on the properties of biodegradable blend film from rice starch-chitosan. Songklanakarin Journal of Science and Technology 30 (Suppl. 1): 149-165.
- Bourtoom, T., Chinnan, M. S., Jantawat, P. and Sanguandeeikul, R. 2006. Effect of plasticizer type and concentration on the properties of edible film from water-soluble fish proteins in surimi wash-water. Food Science and Technology International 12 (2): 119-126.
- Bruno, M., Giancone, T., Torrieri, E., Masi, P. and Moresi, M. 2008. Engineering properties of edible transglutaminase cross-linked caseinate-based films. Food and Bioprocess Technology 1 (4): 393-404.
- Cao, N., Fu, Y. and He, J. 2007. Mechanical properties of gelatin films cross-linked, respectively, by ferulic acid and tannin acid. Food Hydrocolloids 21 (4): 575-584.

- Carvalho, R. A. and Grosso, C. R. F. 2004. Characterization of gelatin based films modified with transglutaminase, glyoxal and formaldehyde. Food Hydrocolloids 18 (5): 717-726.
- Chambi, H. and Grosso, C. 2006. Edible film produced with gelatin and casein cross- linked with transglutaminase. Food Research International 39 (4): 458-466.
- Cherian, G., Gennadios, A., Weller, C. and Chinachoti, P. 1995. Thermomechanical behavior of wheat gluten films: effect of sucrose, glycerin, and sorbitol. Cereal Chemistry 72 (1): 1-6.
- Cho, S. Y. and Rhee, C. 2002. Sorption characteristics of soy protein films and their relation to mechanical properties. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie 35 (2): 151-157.
- Cuq, B., Gontard, N., Cuq, J. L. and Guilbert, S. 1997. Selected functional of fish myofibrillar protein-based films as affected by hydrophilic plasticizers. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 (3): 622-626.
- Debeaufort, F. and Voilley, A. 1997. Methylcellulose-based edible films and coatings: 2. Mechanical and thermal properties as a function of plasticizer content. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 (3): 685-689.
- De Jong, G. A. H. and Koppelman, S. J. 2002. Transglutaminases catalyzed reactions: impact on food applications. Journal of Food Science 67 (8): 2798-2806.
- Di Pierro, P., Mariniello, L., Giosafatto, C. V. L., Masi, P. and Porta, R. 2005. Solubility and permeability properties of edible pectin-soy flour film obtained in the absence or presence of transglutaminase. Food Biotechnology 19 (2): 37-49.
- Di Pierro, P., Chico, B., Villalonga, R., Mariniello, L., Daminao, A. E., Masi, P. and Porta, R. 2006. Chitosan-whey protein edible films produced in the absence or presence of transglutaminase: analysis of their mechanical and barrier properties. Biomacromolecules 7 (3): 744-749.
- Di Pierro, P., Chico, B., Villalonga, R., Mariniello, L., Masi, P. and Porta, R. 2007. Transglutaminase-catalyzed preparation of chitosan-ovalbumin films. Enzyme and Microbial Technology 40 (3): 437-441.

- Fairley, P., Monahan, F. J., German, J. B. and Krochta, J. M. 1996. Mechanical properties and water vapor permeability of edible films from whey protein isolate and sodium dodecyl sulfate. Journal of Agricultural and Food Chemistry 44 (12): 438-443.
- Fennema, O. R. 1996. Water and ice. In O. R. Fennema (ed.), Food Chemistry, 3rd ed., pp. 17-94. New York: Marcel Dekker.
- Folk, J. E. and Finlayson, J. S. 1977. The ϵ -(γ -glutamyl)lysine crosslink and the catalytic role of transglutaminases. In C. B. Anfinsen, J. T. Edsall and F. M. Richards (eds.), Advances in Protein Chemistry, pp. 2-133. New York: Academic Press.
- Galletta, G., Di Gioia, L., Guilbert, S. and Cuq, B. 1998. Mechanical and thermomechanical properties of films based on whey proteins as affected by plasticizer and crosslinking agents. Journal of Dairy Science 81 (12): 3123-3130.
- Gennadios, A., Park, H. J. and Weller, C. L. 1993. Relative humidity and temperature effects on tensile strength of edible protein and cellulose ether films. Transactions of the ASAE 36 (6): 1867-1872.
- Gennadios, A., Weller, C. L., Hanna M. A. and Fronting, G. W. 1996. Mechanical and barrier properties of egg albumin films. Journal of Food Science 61 (3): 585-589.
- Gontard, N., Guilbert, S. and Cuq, J. L. 1992. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on films properties using response surface methodology. Journal of Food Science 57 (1): 190-195.
- Gontard, N., Guilbert, S. and Cuq, J. L. 1993. Water and glycerol as plasticizer affect mechanical and water barrier properties of an edible wheat gluten film. Journal of Food science 58 (1): 206-211.
- Greener-Donhowe, I. K. and Fennema, O. R. 1994. Edible films and coatings: characteristics, formation, definitions, and testing methods. In J. M. Krochta, A. E., Baldwin, and O. M. Nisperos-Carriedo (eds.), Edible Coatings and Film to Improve Food Quality, pp. 1-24. Lancaster: Technomic.

- Guilbert, S. 1986. Technology and application of edible protective films. In M. Mathlouthi (ed.), Food Packaging and Preservation, pp. 371-394. New York: Elsevier Applied Science.
- Hanlon, J. F. 1992. Handbook of Package Engineering, 2nd ed. Lancaster: Technomic.
- Hernandez Izquierdo, V. M., Reid, D. S., McHugh, T. H., Berrios, J. D. J. and Krochta, J. M. 2008. Thermal transitions and extrusion of glycerol-plasticized whey protein mixtures. Journal of Food science 73 (4): E169-E175.
- Irissin-Mangata, J., Bauduin, G., Boutevin, B. and Gontard, N. 2001. New plasticizers for wheat gluten films. European Polymer Journal 37 (8): 1533-1541.
- Jangchud, A., and Chinnan, M. S. 1999. Peanut protein film as affected by drying temperature and pH of film forming solution. Journal of Food Science 64 (1): 153-157.
- Jiang, Y., Tang, C. H., Wen, Q. B., Li, L. and Yang, X. Q. 2007. Effect of processing parameters on the properties of transglutaminase-treated soy protein isolate films. Innovative Food Science and Emerging Technologies 8 (2): 218-225.
- Kester, J. J. and Fennema, O. R. 1986. Edible films and coatings: a review. Food Technology 40 (12): 47-59.
- Kilcast, D. and Subramaniam, P. 2000. Stability and Shelf-Life of Food. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Krochta, J. M. 2002. Proteins as raw materials for films and coatings: definitions, current status, and opportunities. In A. Gennadios (ed.), Protein-Based Films and Coatings, pp. 1-41. Boca Raton: CRC Press.
- Laemmli, U. K. 1970. Cleavage of structural protein during the assembly of the head of bacteriophage T4. Nature 227 (5259): 680-685.
- Lauber, S., Henle, T. and Klostermeyer, H. 2000. Relationship between the crosslinking of caseins by transglutaminase and the gel strength of yoghurt. European Food Research and Technology 210 (5): 305-309.

- Lim, L. T., Mine, Y., and Tung, M. A. 1998. Transglutaminase cross-linked egg white protein film: tensile properties and oxygen permeability. Journal Agricultural and Food Chemistry 46 (10): 4022-4029.
- Mahmoud, R. and Savello, P. A. 1992. Mechanical properties of and water vapor transferability through whey protein film. Journal of Dairy Science 75 (4): 942-946.
- Mali, S., Sakanaka, L. S., Yamashita, F. and Grossman, M. V. E. 2005. Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. Carbohydrate Polymers 60 (3): 283-289.
- Mariniello, L., Di Pierro, P., Esposito, C., Sorrentino, A., Masi, P. and Porta, R. 2003. Preparation and mechanical properties of edible pectin-soy flour films obtained in the absence or presence of transglutaminase. Journal of Biotechnology 102 (2): 191-198.
- Marquié, C. 2001. Chemical reactions in cottonseed protein cross-linking by formaldehyde, glutaraldehyde, and glyoxal for the formation of protein films with enhanced mechanical properties. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49 (10): 4676-4681.
- Marquié, C., Tessier, A. M., Aymard, C. and Guilbert, S. 1997. HPLC determination of the reactive lysine content of cottonseed protein films to monitor the extent of cross-linking by formaldehyde, glutaraldehyde, and glyoxal. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 (3): 922-926.
- Martelli, S. M., Moore, G. R. P. and Laurindo, J. B. 2006. Mechanical properties, water vapor permeability and water affinity of feather keratin films plasticized with sorbitol. Journal of Polymers and the Environment 14 (3): 215-222.
- Martelli, S. M., Moore, G., Paes, S. S., Gandolfo, C. and Laurindo, J. B. 2006. Influence of plasticizers on the water sorption isotherms and water vapor permeability of chicken feather keratin films. Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie 39 (3): 292-301.
- Matheis, G. and Whitaker, J. R. 1984. Peroxidase-catalyzed cross linking of proteins. Journal of Protein Chemistry 3 (1): 35-48.

- Matsushita, S. 1990. Oxidation of food. In T. Kadoya (ed.), Food Packaging. pp. 25-44. New York: Academic Press.
- McHugh, T. H. and Krochta, J. M. 1994. Permeability properties of edible films. In J. M. Krochta, A. E., Baldwin, and O. M. Nisperos-Carriedo (eds.), Edible Coatings and Film to Improve Food Quality, pp. 139-188. Lancaster: Technomic.
- McHugh, T. H., Aujard, F. J. and Krochta, J. M. 1994. Plasticized whey protein edible films: water vapor permeability properties. Journal of Food Science 59 (2): 416-429.
- Migneault, I., Dartiguenave, C., Bertrand, M. J. and Waldron, K. C. 2004. Glutaraldehyde: behavior in aqueous solution, reaction with proteins, and application to enzyme crosslinking. BioTechniques 37 (5): 790-802.
- Miranda, P. S., Garnica, O., Sagahon, L. V. and Cárdenas, G. 2004. Water vapor permeability and mechanical properties of chitosan composite film. Journal of the Chilean Chemical Society 49 (2): 173-178.
- Motoki, M. and Seguro, K. 1998. Transglutaminases and its use for food processing. Trends in Food Science & Technology 9 (5): 204-210.
- Motoki, M., Aso, H., Seguro, K. and Nio, N. 1987. α_{s1} -casein film prepared using transglutaminase. Agricultural and Biological Chemistry 51 (4): 993-996.
- Oakenfull, D., Pearce, J. and Burley, R. W. 1997. Protein gelation. In S. Damodaran and A. Paraf (eds.), Food Proteins and Their Applications, pp. 111-142. New York: Marcel Dekker.
- Ou, S. and Kwok, K. C. 2004. Ferulic acid: pharmaceutical functions, preparation and applications in foods. Journal of the Science of Food and Agriculture 84 (11): 1261-1269.
- Ou, S., Wang, Y., Tang, S., Huang, C. and Jackson, M. 2005. Role of ferulic acid in preparing edible films from soy protein isolate. Journal of Food Engineering 70 (2): 205-210.
- Parris, N. and Coffin, R. D. 1997. Composition factors affecting the water vapor permeability and tensile properties of hydrophilic zein film. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 (5): 1596-1599.

- Paschoalick, T. M., Garcia, F. T., Sobral, P. J. A. and Habitante, A. M. Q. B. 2003. Characterization of some functional properties of edible films based on muscle proteins of Nile Tilapia. Food Hydrocolloids 17 (4): 419-427.
- Peterson, G. L. 1983. Determination of total protein. Methods in Enzymology 91: 95-119.
- Pikul, J., Leszczynski, D. E. and Kummerow, F. A. 1989. Evaluation of the three modified TBA methods for measuring lipid oxidation in chicken meat. Journal of Agricultural and Food Chemistry 40 (5): 2182-2185.
- Rhim, J. W., Gennadios, A., Handa, A., Weller, C. L. and Hanna, M. A. 2000. Solubility, tensile and color properties of modified soy protein isolate film. Journal of Agricultural and Food Chemistry 48 (10): 4937-4941.
- Sabry, Z. I. 1961. Browning in dried fruit products: non-enzymatic browning and its effect on the carotenoids in Qamareddeen, a dried apricot pulp. Journal of Agricultural and Food Chemistry 9 (1): 53-55.
- Sobral, P. J. A., Santos, J. S., and Garcia, F. T. 2005. Effect of protein and plasticizer concentrations in film forming solutions on physical properties of edible films based on muscle protein of a Thai Tilapia. Journal of Food Engineering 70 (2): 93-100.
- Stadtman, E. R., Barker, H. A., Haas, V. and Mrak, E. M. 1946. Storage of dried fruit: influence of temperature on deterioration of apricots. Industrial and Engineering Chemistry 38 (5): 541-543.
- Stuchell, Y. M. and Krochta, J. M. 1994. Enzymatic treatments and thermal effects on edible soy protein films. Journal of Food Science 59 (6): 1332-1337.
- Tanaka, M., Iwata, K., Sanguandeeikul, R., Handa, A. and Ishizaki, S. 2001. Influence of plasticizers on the properties of edible films prepared from fish water-soluble proteins. Fisheries Science 67 (2): 346-351.
- Tang, C. H. and Jiang, Y. 2007. Modulation of mechanical and surface hydrophobic properties of food protein films by transglutaminase treatment. Food Research International 40 (4): 504-509.

- Tang, C. H., Jiang, Y., Wen, Q. B. and Yang, X. Q. 2005. Effect of transglutaminase treatment on the properties of cast films of soy protein isolates. Journal of Biotechnology 120 (3): 296-307.
- Tang, C. H., Wu, H., Chen, Z. and Yang, X. Q. 2006. Formation and properties of glycinin-rich and β -conglycinin-rich soy protein isolate gels induced by microbial transglutaminase. Food Research International 39 (1): 87-97.
- Tharanathan, R. N. 2003. Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. Trends in Food Science & Technology 14 (3): 71-78.
- United Soybean Board. 2004. Soy Protein Isolate [Online]. Available from: <http://talksoy.com> [2005, January 14]
- Vanin, F. M., Sobral, P. J. A., Menegalli, F. C., Carvalho, R. A. and Habitante, A. M. Q. B. 2005. Effects of plasticizers and their concentrations on thermal and functional properties of gelatin-based films. Food Hydrocolloids 19 (5): 899-907.
- Washizu, K., Ando, K., Koikeda, S., Hirose, S., Matsuura-Takagi, H., Motoki, M. and Takeuchi, K. 1994. Molecular cloning of the gene for microbial transglutaminase from *Streptomyces* and its expression in *Streptomyces lividans*. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry 58 (1): 82-87.
- Yi, J. B., Kim, T. Y., Bae, J. H., Whiteside, W. C. and Park, H. J. 2006. Influence of transglutaminase-Induced cross-linking on properties of fish gelatin film. Journal of Food Science 71 (9): 376-382.
- Yildirim, M. and Hettiarachchy, N. S. 1997. Biopolymers produced by cross-linking soybean 11S globulin with whey proteins using transglutaminase. Journal of Food Science 62 (2): 270-275.
- Zayas, J. F. 1997. Functionality of Proteins in Food. New York: Springer-Verlag.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ วิธีมาตรฐาน ASTM E96-95 (ASTM, 1999)

วัสดุและอุปกรณ์

ซิลิกาเจล

ขวดแก้วทรงสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm

ซิลิโคนกรีส

พาราฟิล์ม

โถดูดความชื้น

วิธีวิเคราะห์

ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด $6 \times 6 \text{ cm}^2$ โดยปราศจากรอยขีดข่วน รอยพับ และรูรั่วที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า บรรจุซิลิกาเจลปริมาณ 30 g ใส่ลงขวดแก้ว ทาสิลิโคนกรีส บริเวณปากขวดให้ทั่ว วางตัวอย่างฟิล์มลงบนปากขวด ซึ่งให้ตั้งและรัดให้แน่นด้วยพาราฟิล์ม บันทึกน้ำหนักขวดที่ติดฟิล์มแล้ว จากนั้นนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้นที่บรรจุน้ำไว้ภายใน เก็บไว้ที่อุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำตามสมการที่ (ก.1)

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ} = \frac{(w \times L)}{A \times t \times (P_2 - P_1)} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ w คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g)

L คือ ความหนาของฟิล์ม (mm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (m^2)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดลอง (h)

$(P_2 - P_1)$ คือ ความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ด้านทั้งสองของฟิล์ม (Pa)

ก.2 สภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจน วิธีมาตรฐาน ASTM D1434-82 (ASTM, 1999)

วัสดุและอุปกรณ์

Oxygen Permeation Analyzer, model 8500 (Illinois Instruments, Johnsburg, IL)

วิธีวิเคราะห์

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 55% โดยให้ไนโตรเจนเข้าทางด้านหนึ่งและออกซิเจนเข้าอีกด้านหนึ่ง คำนวณสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจนตามสมการที่ (ก.2)

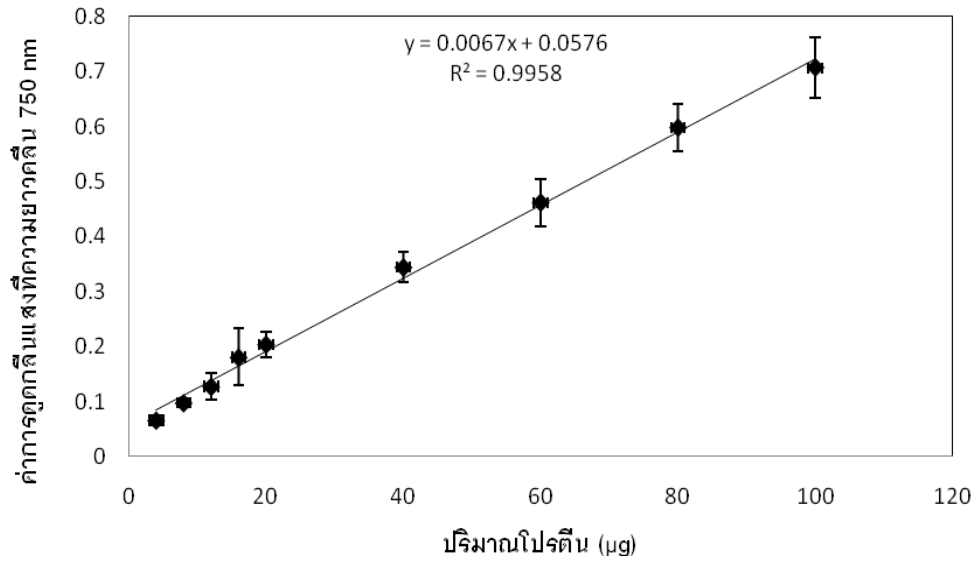
$$\text{สภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจน} = \frac{\text{อัตราการซึมผ่านของออกซิเจน} \times \text{ความหนา}}{\Delta P} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ ΔP = oxygen partial pressure difference

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐาน

ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี modified Lowry



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี modified Lowry

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวิเคราะห์

ตารางที่ ค.1 สมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ กลีเซอรอล (% โดย น้ำหนักของโปรตีน ถั่วเหลืองสกัด)	ความหนา (mm)	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนัก สด)	ความต้านทาน แรงดึงขาด (MPa)	การยืดตัวถึง จุดขาด (%)	ค่าแสงส่องผ่าน (%)	สภาพให้ซึมผ่าน ได้ของไอน้ำ (g mm/m ² h Pa)
50	0.128 ^c ±0.002	25.46 ^d ±0.10	2.65 ^a ±0.08	196.55 ^e ±8.67	78.91 ^c ±0.16	0.0409 ^d ±0.0002
55	0.129 ^c ±0.003	24.44 ^e ±0.20	2.05 ^b ±0.10	231.23 ^{bc} ±10.23	78.64 ^c ±0.02	0.0423 ^c ±0.0003
60	0.131 ^b ±0.001	26.10 ^c ±0.36	0.97 ^c ±0.10	243.42 ^b ±8.57	80.34 ^b ±0.32	0.0437 ^b ±0.0001
65	0.131 ^b ±0.001	27.81 ^b ±0.07	0.69 ^d ±0.09	264.94 ^a ±6.83	81.47 ^a ±0.17	0.0440 ^{ab} ±0.0001
70	0.133 ^a ±0.001	29.12 ^a ±0.42	0.38 ^e ±0.10	225.29 ^d ±8.72	81.10 ^a ±0.54	0.0441 ^a ±0.0002

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.2 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติม
แทรนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	ความหนา (mm)	
	ไม่เติมแทรนส์กลูทามีน	เติมแทรนส์กลูทามีน
100:0	0.129 ^d ±0.002	0.139 ^{cd} ±0.001
80:20	0.131 ^{fg} ±0.004	0.141 ^{bc} ±0.002
60:40	0.134 ^{ef} ±0.001	0.143 ^{ab} ±0.001
50:50	0.138 ^{cd} ±0.001	0.145 ^a ±0.003
40:60	0.137 ^{de} ±0.001	0.144 ^a ±0.001
20:80	0.132 ^{fg} ±0.001	0.139 ^{cd} ±0.001

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.3 ปริมาณความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักสด)	
	ไม่เติมแทรนส์กลูทามีน	เติมแทรนส์กลูทามีน
100:0	28.71 ^a ±4.87	21.35 ^{bcd} ±3.18
80:20	26.38 ^{ab} ±3.58	22.58 ^{bc} ±1.92
60:40	22.78 ^{bc} ±3.28	21.88 ^{bc} ±0.57
50:50	20.62 ^{bcd} ±1.19	21.59 ^{bcd} ±2.70
40:60	19.70 ^{cd} ±2.74	19.40 ^{cd} ±3.12
20:80	17.70 ^{cd} ±3.20	15.58 ^d ±5.05

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.4 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	ความต้านทานแรงดึงขาด (MPa)	
	ไม่เติมแทรนส์กลูทามีน	เติมแทรนส์กลูทามีน
100:0	0.69 ⁱ ±0.10	1.10 ^{ab} ±0.10
80:20	0.73 ^{ij} ±0.07	1.23 ^a ±0.07
60:40	0.81 ^{efg} ±0.08	0.93 ^{cde} ±0.09
50:50	0.92 ^{cde} ±0.05	0.84 ^{def} ±0.08
40:60	1.05 ^{bc} ±0.06	0.97 ^{cd} ±0.06
20:80	1.21 ^a ±0.07	1.18 ^{ab} ±0.06

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.5 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทรนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	การยืดตัวถึงจุดขาด (%)	
	ไม่เติมแทรนส์กลูทามีน	เติมแทรนส์กลูทามีน
100:0	264.51 ^a ±9.94	239.71 ^b ±9.52
80:20	242.11 ^b ±7.41	243.47 ^b ±10.94
60:40	251.37 ^{ab} ±8.34	195.07 ^d ±9.90
50:50	224.12 ^c ±6.32	99.63 ^f ±6.57
40:60	197.97 ^d ±9.34	110.71 ^f ±8.08
20:80	161.40 ^e ±5.22	96.88 ^f ±6.00

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.6 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรรูปส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	ค่าแสงส่องผ่าน (%)	
	ไม่เติมแทนส์กลูทามีน	เติมแทนส์กลูทามีน
100:0	80.26 ^a ±2.79	78.48 ^{ab} ±0.78
80:20	73.79 ^c ±2.47	78.57 ^{ab} ±3.44
60:40	73.21 ^c ±2.56	80.03 ^a ±0.81
50:50	77.77 ^{ab} ±0.9	76.57 ^{abc} ±1.02
40:60	79.05 ^a ±1.8	75.19 ^{bc} ±1.25
20:80	77.76 ^{ab} ±1.02	64.83 ^d ±2.26

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.7 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แปรรูปส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลและไม่เติมหรือเติมแทนส์กลูทามีน

กลีเซอรอล:ซอร์บิทอล	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (g mm/m ² h Pa)	
	ไม่เติมแทนส์กลูทามีน	เติมแทนส์กลูทามีน
100:0	0.0421 ^c ±0.0031	0.0447 ^{bc} ±0.0016
80:20	0.0427 ^c ±0.023	0.0468 ^{ab} ±0.0024
60:40	0.0443 ^{bc} ±0.0010	0.0448 ^{bc} ±0.0023
50:50	0.0422 ^c ±0.0022	0.0490 ^a ±0.0008
40:60	0.0430 ^c ±0.0009	0.0475 ^{ab} ±0.0014
20:80	0.0429 ^c ±0.0010	0.0467 ^{ab} ±0.0025

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลเท่ากับ 80:20 และเติมแทนส์กลูทามีนเข้มข้น 4 หน่วย/g โปรตีน

วอเตอร์แอกทิวิตี	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักสด)
0.120	11.270 ^k ±0.028
0.220	13.510 ⁱ ±0.028
0.330	14.530 ⁱ ±0.014
0.439	16.860 ^h ±0.042
0.510	18.350 ^g ±0.014
0.570	20.110 ^f ±0.014
0.653	22.760 ^e ±0.028
0.740	24.790 ^d ±0.014
0.830	27.330 ^c ±0.028
0.900	36.360 ^b ±0.014
0.930	40.220 ^a ±0.028

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.9 ปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักสด)		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0	34.655 ^a ±0.035	34.520 ^b ±0.014	34.655 ^a ±0.021
1	33.695 ^b ±0.021	33.86 ^a ±0.014	33.120 ^c ±0.028
2	32.760 ^b ±0.057	33.765 ^a ±0.035	32.655 ^c ±0.007
3	32.664 ^b ±0.023	33.545 ^a ±0.021	31.885 ^c ±0.021
4	32.255 ^b ±0.004	33.325 ^a ±0.035	31.575 ^c ±0.021
5	31.515 ^b ±0.007	33.240 ^a ±0.014	30.595 ^c ±0.021
6	30.805 ^b ±0.021	33.090 ^a ±0.014	30.46 ^c ±0.014
7	30.650 ^b ±0.001	32.870 ^a ±0.014	30.100 ^c ±0.014
8	30.555 ^b ±0.007	32.825 ^a ±0.021	29.825 ^c ±0.212

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.10 วอเตอร์แอกทิวิตีในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	วอเตอร์แอกทิวิตี		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0 ^{ns}	0.723±0.002	0.721±0.003	0.724±0.002
1 ^{ns}	0.721±0.003	0.720±0.002	0.721±0.003
2 ^{ns}	0.721±0.001	0.721±0.002	0.720±0.001
3 ^{ns}	0.718±0.001	0.718±0.001	0.715±0.001
4	0.712 ^b ±0.001	0.719 ^c ±0.001	0.706 ^a ±0.001
5	0.709 ^b ±0.001	0.717 ^c ±0.002	0.702 ^a ±0.001
6	0.703 ^{ab} ±0.003	0.715 ^b ±0.001	0.696 ^a ±0.006
7	0.701 ^b ±0.001	0.715 ^c ±0.001	0.683 ^a ±0.004
8	0.702 ^b ±0.001	0.713 ^c ±0.001	0.664 ^a ±0.003

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ค.11 ความแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	ความแข็ง (N)		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0	2.320 ^b ±0.014	2.225 ^c ±0.021	2.415 ^a ±0.021
1 ^{ns}	2.825±0.086	2.665±0.021	2.615±0.322
2	3.355 ^b ±0.035	3.255 ^c ±0.021	3.790 ^a ±0.014
3	3.615 ^b ±0.021	3.560 ^b ±0.014	3.890 ^a ±0.028
4	3.700 ^b ±0.014	3.625 ^c ±0.021	4.115 ^a ±0.021
5	3.770 ^b ±0.071	3.710 ^b ±0.014	4.125 ^a ±0.007
6	3.975 ^b ±0.021	3.695 ^c ±0.021	4.170 ^a ±0.028
7	4.110 ^b ±0.014	3.815 ^c ±0.021	4.290 ^a ±0.014
8	4.165 ^b ±0.008	3.910 ^c ±0.014	4.395 ^a ±0.212

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ค.12 ค่า L^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	L^*		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0	35.665 ^a ±0.021	35.100 ^c ±0.014	35.595 ^b ±0.021
1	34.600 ^b ±0.014	34.925 ^a ±0.035	34.545 ^c ±0.041
2	33.760 ^b ±0.014	34.740 ^a ±0.014	33.725 ^b ±0.021
3	33.425 ^{ab} ±0.021	34.560 ^a ±0.028	32.845 ^b ±0.700
4	33.315 ^b ±0.021	33.660 ^a ±0.014	31.775 ^c ±0.021
5	32.930 ^b ±0.028	33.135 ^a ±0.007	31.405 ^c ±0.021
6	32.470 ^b ±0.028	32.805 ^a ±0.021	31.350 ^c ±0.014
7	32.270 ^b ±0.028	32.495 ^a ±0.021	31.230 ^c ±0.014
8	31.915 ^b ±0.021	32.050 ^a ±0.141	30.440 ^c ±0.014

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.13 ค่า a^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	a^*		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0	9.350 ^a ±0.014	8.435 ^c ±0.021	9.095 ^b ±0.021
1	9.445 ^a ±0.021	8.435 ^c ±0.021	9.170 ^b ±0.028
2	9.480 ^a ±0.014	8.650 ^c ±0.028	9.175 ^b ±0.021
3	9.515 ^a ±0.021	8.715 ^c ±0.021	9.450 ^b ±0.212
4	9.550 ^a ±0.028	8.820 ^c ±0.028	9.335 ^b ±0.007
5	9.730 ^a ±0.028	8.875 ^c ±0.021	9.480 ^b ±0.014
6	9.895 ^a ±0.035	9.140 ^c ±0.014	9.575 ^b ±0.021
7	10.115 ^a ±0.021	9.175 ^c ±0.007	9.735 ^b ±0.063
8	10.350 ^b ±0.212	9.745 ^c ±0.049	11.540 ^a ±0.014

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.14 ค่า b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	b^*		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0	3.120 ^b ±0.028	3.920 ^a ±0.028	3.105 ^b ±0.021
1	2.930 ^c ±0.028	3.640 ^a ±0.014	3.035 ^b ±0.021
2	2.870 ^b ±0.028	3.595 ^a ±0.007	2.910 ^b ±0.014
3	2.760 ^b ±0.014	3.255 ^a ±0.021	2.380 ^c ±0.014
4	2.685 ^b ±0.007	3.170 ^a ±0.014	2.185 ^c ±0.021
5	2.315 ^b ±0.021	2.820 ^a ±0.028	2.125 ^c ±0.021
6	2.030 ^b ±0.014	2.685 ^a ±0.021	2.150 ^b ±0.212
7	1.820 ^b ±0.014	2.570 ^a ±0.028	1.865 ^b ±0.007
8	1.310 ^b ±0.028	1.835 ^a ±0.021	0.455 ^c ±0.007

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.15 ค่ากรดไฮโดรบาบิซูริกในระหว่างการเก็บรักษาของกล้วยกวนที่ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือฟิล์มพอลิพรอพิลีนและกล้วยกวนที่ไม่มีการห่อหุ้ม

ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)	ค่ากรดไฮโดรบาบิซูริก (mg malonaldehyde/kg)		
	ห่อด้วยฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	ห่อด้วยฟิล์มพอลิพรอพิลีน	ไม่ห่อหุ้ม
0 ^{ns}	0.359 ±0.003	0.362 ±0.029	0.390 ±0.007
1 ^{ns}	0.375 ±0.008	0.392±0.028	0.407 ±0.006
2	0.388 ^b ±0.007	0.400 ^{ab} ±0.009	0.418 ^a ±0.009
3	0.399 ^b ±0.001	0.395 ^b ±0.007	0.473 ^a ±0.037
4	0.401 ^c ±0.001	0.460 ^b ±0.011	0.515 ^a ±0.011
5	0.394 ^c ±0.001	0.480 ^b ±0.006	0.534 ^a ±0.006
6	0.396 ^c ±0.003	0.503 ^b ±0.006	0.558 ^a ±0.006
7	0.406 ^c ±0.004	0.523 ^b ±0.011	0.573 ^a ±0.006
8	0.431 ^c ±0.011	0.558 ^b ±0.016	0.604 ^a ±0.001

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรนันท์ เลิศศรีณย์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร จากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย เมื่อปีการศึกษา 2549 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี การศึกษา 2550

รายการสิ่งตีพิมพ์และเผยแพร่

อรนันท์ เลิศศรีณย์, ธนจันทร์ มหาวนิช และ เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย. 2553. ผลของ พลาสติไซเซอร์และแทรนส์กลูทามิเนสจากจุลินทรีย์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด. ใน การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (ภาคบรรยาย), มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่. 11-12 มีนาคม 2553.