

ผลของตัวออกซิไดส์และการบ่มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว



นางสาวอินทวาริน กิตติอัครศรีกุล

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF OXIDIZING AGENTS AND HEAT CURING ON PROPERTIES OF EGG ALBUMEN

FILM



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

อินทวาริน กิตติอักษรศรีกุล : ผลของตัวออกซิไดส์และการบ่มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว (EFFECTS OF OXIDIZING AGENTS AND HEAT CURING ON PROPERTIES OF EGG ALBUMEN FILM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช, 92 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ รวมทั้งผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว ในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ ตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โซเดียมเพอร์ไอโอเดต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ แปรความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.02, 0.04 และ 0.06 โมลาร์ พบว่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์สูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยทั่วไปพบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตมีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.06 โมลาร์มีความต้านทานแรงดึงขาด (2.73 เมกะพาสคาล) และการยึดตัวถึงจุดขาด (63.89%) สูงสุด โดยมีค่าเป็น 425% และ 326% ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ การเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์สามารถยืนยันได้โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี การเติมตัวออกซิไดส์ยังมีผลต่อสมบัติเชิงแสง โดยทำให้ฟิล์มที่ได้มีความโปร่งใสลดลง นอกจากนี้พบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตและฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีสีเหลืองและสีส้มเหลืองตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีสีใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม การเติมตัวออกซิไดส์ทำให้ผิวฟิล์มมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการละลายน้ำและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลง ในขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อน โดยฟิล์มที่คัดเลือกมาศึกษาได้แก่ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ แปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 40, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าและการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่ได้บ่มอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) แต่การยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) ตัวอย่างฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด (9.55 เมกะพาสคาล) ซึ่งเป็น 683% ของตัวอย่างควบคุม การเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์สามารถยืนยันได้โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ในด้านสมบัติเชิงแสง พบว่าการบ่มด้วยความร้อนมีผลต่อค่าสีค่อนข้างน้อย แม้ว่ามุมของสีตัวอย่างฟิล์มมีค่าแตกต่างกัน แต่ความเข้มสีที่มีค่าต่ำมากทำให้ฟิล์มทุกตัวอย่างปรากฏเป็นสีเทาเมื่อดูด้วยตาเปล่า การบ่มด้วยความร้อนทำให้ผิวฟิล์มมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น และสามารถผลิตฟิล์มที่มีผิวไม่ชอบน้ำ (มีมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มสูงกว่า 90 องศา) ได้โดยบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีความสามารถในการละลายน้ำและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดต่ำลง

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5771999723 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS:

INVARIN KITTIAKKHARASRIKUL: EFFECTS OF OXIDIZING AGENTS AND HEAT CURING ON PROPERTIES OF EGG ALBUMEN FILM. ADVISOR: ASST. PROF.THANACHAN MAHAWANICH, Ph.D., 92 pp.

The objective of this study was to investigate the effect of type and concentration of oxidizing agents as well as the effect of temperature and time of heat curing of dried film on egg albumen film properties. In the first part of the study, the effect of type and concentration of oxidizing agents was explored. The oxidizing agents used in this study were hydrogen peroxide, sodium periodate, and sodium hypochlorite. Oxidizing agent concentration was varied as 0.02, 0.04 and 0.06 M. Tensile strength and elongation at break of the films added with oxidizing agent were significantly greater than those the control ($p \leq 0.05$). In general, the films treated with sodium periodate exhibited greater tensile strength and elongation at break than those treated with hydrogen peroxide and sodium hypochlorite. The film added with 0.06 M sodium periodate demonstrated the highest tensile strength (2.73 MPa) and elongation at break (63.89%), which were 425% and 326% increase as compared to the control. Disulfide cross-linking was denoted using Raman spectroscopic technique. Oxidative treatments also affected optical properties of the egg albumen film. Decreasing transparency was demonstrated in the oxidized films. The films added with sodium periodate and those added with sodium hypochlorite displayed yellow and yellow-orange hue, respectively, while those added with hydrogen peroxide were similar to the control in terms of color. The surface of the films treated with oxidizing agent signified increasing hydrophobicity. Reduction in water solubility and water vapor permeability was also induced by oxidative treatment. In the second part of the study, the effect of temperature and time of heat curing of dried film was investigated. The film used in this part was the egg albumen film treated with 0.06 M hydrogen peroxide. Curing temperature was varied at 4 levels (40, 60, 70 and 80°C) and curing time was varied at 3 levels (24, 48 and 72 hr). The heat-cured films exhibited significantly greater tensile strength and lower elongation at break as compared to the uncured control ($p \leq 0.05$). As curing temperature and time increased, tensile strength was found to increase ($p \leq 0.05$) while elongation at break was unaffected ($p > 0.05$). The film cured at 80°C for 72 hr exhibited the greatest tensile strength of 9.55 MPa, which was 683% of that of the control. Disulfide cross-linking was attested by Raman spectrum. In terms of optical properties, heat curing was found to minimally affect color of the films. Even though the film samples possessed different hue angle, the extremely low chroma made all films appeared grey to the naked eyes. Heat curing resulted in film surface with increasing hydrophobicity. A film with hydrophobic surface (i.e., that with contact angle of greater than 90°) could be produced by curing at higher temperature for a longer time. Additionally, the heat-cured film exhibited a reduction in water solubility and water vapor permeability.

Department: Food Technology

Student's Signature

Field of Study: Food Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี
ยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลา
อันมีค่าให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนดูแลเอา
ใจใส่และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย อาจารย์
ดร. ชีรนนท์ เจนจรัสสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ซาลีดา บรมพิชัยชาติกุล และ รอง
ศาสตราจารย์ ดร. วาณี ชนเห็นชอบ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำพร้อมข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็น
ประโยชน์เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความ
อนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร.
วาณี ชนเห็นชอบ สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือดังกล่าว

ขอขอบพระคุณ ดร. บุรฉัตร ศรีทองแท้ คุณัญชานา อินสวาสดี คุณนันทพร โพธิ
วุฒิคุณ คุณนนทชา ธนธรรวาทกุล คุณบัณฑิตา จิตตประไพ และคุณธีรภัทร์ ตั้งสมบูรณ์ สำหรับ
คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มและการวิเคราะห์โปรตีนรวมถึงคำแนะนำในการทำ
วิจัย

ขอขอบพระคุณครูและอาจารย์ทุกท่าน และขอขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนนิสิต
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำมาโดยตลอด รวมถึงเจ้าหน้าที่
ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวกและความช่วยเหลือตลอด
ระยะเวลาทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณแม่ นางสาว คุณยาย คุณน้า และญาติพี่น้องที่คอย
สนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradable film).....	3
2.2 ไข่.....	5
2.3 โปรตีนส่วนต่างๆ (protein fraction) ในไข่ขาว.....	7
2.3.1 โอวัลบูมิน.....	7
2.3.2 โอโวแทรนส์เฟอร์ริน.....	9
2.3.3 โอโวมิวคอยด์.....	9
2.3.4 โอโวมิวซิน.....	10
2.3.5 ไลโซไซม์.....	10
2.3.6 แอวิติน.....	11
2.3.7 โอโวโกลบูลิน.....	11
2.3.8 โอโวอินฮิบิเตอร์.....	12
2.3.9 โอโวฟลาโวโปรตีน.....	12
2.4 การเกิดเป็นฟิล์มโปรตีน.....	12
2.5 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน.....	14

2.5.1	วิธีทางกายภาพ.....	14
2.5.1.1	การบ่มด้วยความร้อน.....	14
2.5.1.2	การฉายรังสี.....	17
2.5.2	วิธีทางเคมี.....	18
2.5.3	วิธีทางชีวเคมี.....	24
บทที่ 3	อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1	วัตถุดิบและสารเคมี.....	27
3.1.1	วัตถุดิบ.....	27
3.1.2	สารเคมี.....	27
3.2	อุปกรณ์.....	27
3.3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.3.1	การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว.....	28
3.3.1.1	ความหนา.....	31
3.3.1.2	สมบัติเชิงกล.....	31
3.3.1.3	ความโปร่งใส (transparency).....	32
3.3.1.4	ค่าสี.....	32
3.3.1.5	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability).....	32
3.3.1.6	มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม.....	33
3.3.1.7	ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility).....	33
3.3.1.8	ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวาง.....	34
3.3.1.9	การติดตามการเกิดพันธะไดซัลไฟด์โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	34
3.3.2	การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว.....	35

3.3.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	35
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 ผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว	36
4.1.1 ความหนา	36
4.1.2 สมบัติเชิงกล	37
4.1.3 ความโปร่งใส	40
4.1.4 ค่าสี	41
4.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ	43
4.1.6 มุมสัมผักระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม	44
4.1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ	47
4.1.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง	49
4.1.9 การเกิดพันธะไดซัลไฟด์	50
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว	52
4.2.1 ความหนา	52
4.2.2 สมบัติเชิงกล	53
4.2.3 ความโปร่งใส	56
4.2.4 ค่าสี	57
4.2.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ	60
4.2.6 มุมสัมผักระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม	61
4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ	63
4.2.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง	64
4.2.9 การเกิดพันธะไดซัลไฟด์	66

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลเฉพาะผลิตภัณฑ์.....	79
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่.....	6
ตารางที่ 2. 2 กรดแอมิโนที่เป็นองค์ประกอบของไข่ขาวของไข่ไก่.....	6
ตารางที่ 2. 3 สมบัติของโปรตีนไข่ขาว.....	8
ตารางที่ 3. 1 ศักย์รีดักชันมาตรฐาน (E°) ของตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	28
ตารางที่ 4. 1 ความหนาของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	37
ตารางที่ 4. 2 ค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	42
ตารางที่ 4. 3 ความหนาของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ.....	53
ตารางที่ 4. 4 ค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ.....	58
ตารางที่ ข. 1 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	80
ตารางที่ ข. 2 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	81
ตารางที่ ข. 3 ความโปร่งใสแสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	82
ตารางที่ ข. 4 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	83
ตารางที่ ข. 5 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	84
ตารางที่ ข. 6 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	85
ตารางที่ ข. 7 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ.....	86
ตารางที่ ข. 8 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ.....	87

ตารางที่ ข. 9 ความโปร่งใส (แสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน) ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ 88

ตารางที่ ข. 10 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ..... 89

ตารางที่ ข. 11 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ 90

ตารางที่ ข. 12 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ..... 91



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2. 1 (ก)ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไฮดรอกซิล-ไฮดรอกไซด์ (ข)การเกิดพันธะไฮดรอกไซด์ของพอลิเพปไทด์	16
รูปที่ 2. 2 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยฟอร์มัลดีไฮด์ (ก) ฟอร์มัลดีไฮด์เกิดปฏิกิริยากับโปรตีน (ข) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับโปรตีนอีกสายหนึ่งเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามเมทิลีน (methylene cross-link) ระหว่างสายโปรตีน และ (ค) การเชื่อมข้ามระหว่างโซ่ข้างของไลซีนกับอะตอมไนโตรเจนของพันธะเพปไทด์โดยฟอร์มัลดีไฮด์	19
รูปที่ 2. 3 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยกลูทาราลดีไฮด์ (ก) มอนอเมอร์กลูทาราลดีไฮด์ (monomeric glutaraldehyde) (ข) กลูทาราลดีไฮด์เกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซิลในภาวะที่เป็นเบส และ (ค) พอลิเมอร์ของกลูทาราลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับหมู่แอมิโนของโปรตีนทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของสายโปรตีน	20
รูปที่ 2. 4 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยไกลออกซัล โดยไกลออกซัลเกิดปฏิกิริยากับหน่วยย่อยไลซีนในโมเลกุลโปรตีน	20
รูปที่ 2. 5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฟไฮดริลเกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามระหว่างโปรตีน	23
รูปที่ 2. 6 การเกิดพันธะเชื่อมข้ามไดไทโรซีนที่เร่งโดยเพอร์ออกซิเดสในขณะที่มีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	25
รูปที่ 2. 7 การเกิดพันธะไอโซเพปไทด์เอพิซิลอน-(แกมมา-กลูตามิล)ไลซีนที่เร่งโดยแทรนส์กลูทามิเนส	25
รูปที่ 3. 1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์	30
รูปที่ 4. 1 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	39
รูปที่ 4. 2 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	40

รูปที่ 4. 3 ความโปร่งใสแสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	41
รูปที่ 4. 4 ลักษณะปรากฏของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	43
รูปที่ 4. 5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	44
รูปที่ 4. 6 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	46
รูปที่ 4. 7 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	47
รูปที่ 4. 8 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	48
รูปที่ 4. 9 ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	50
รูปที่ 4. 10 Raman spectrum ของฟิล์มโซลาร์ที่เติมตัวออกซิไดส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์	51
รูปที่ 4. 11 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโซลาร์ที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	54
รูปที่ 4. 12 การยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโซลาร์ที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)	55
รูปที่ 4. 13 ความโปร่งใส (แสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน) ของฟิล์มโซลาร์ที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)	57
รูปที่ 4. 14 ลักษณะปรากฏของฟิล์มโซลาร์ที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ	59

รูปที่ 4. 15 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)..... 60

รูปที่ 4. 16 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ..... 62

รูปที่ 4. 17 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)..... 63

รูปที่ 4. 18 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)..... 64

รูปที่ 4. 19 ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 65

รูปที่ 4. 20 Raman spectrum ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ 66

บทที่ 1

บทนำ

โพรตีนไข่ขาวเป็นโพรตีนชนิดหนึ่งที่มีสมบัติในการเกิดเป็นฟิล์ม อย่างไรก็ตามฟิล์มโพรตีนไข่ขาวมีข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงเชิงกลเช่นเดียวกับฟิล์มโพรตีนโดยทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ฐานปิโตรเลียม (petroleum-based polymer) การปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโพรตีนสามารถทำได้โดยส่งเสริมให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโพรตีน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การใช้รังสี การใช้เอนไซม์ที่เร่งการเกิดพันธะเชื่อมข้าม การเสริมแรงเชิงกายภาพ (physical reinforcement) รวมถึงการใช้ตัวเชื่อมข้าม (cross-linking agent) และการบ่มด้วยความร้อน (heat curing)

สำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพรตีนด้วยวิธีทางเคมี ที่ผ่านมามีตัวเชื่อมข้ามโพรตีนที่นิยมใช้ ได้แก่ สารกลุ่มแอลดีไฮด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการเชื่อมข้ามโพรตีน อย่างไรก็ตามได้มีการตระหนักถึงความเป็นพิษของแอลดีไฮด์ จึงมีความพยายามในการหาสารอื่นที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโพรตีนแต่มีความปลอดภัยสูงกว่า การเติมตัวออกซิไดส์เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้เกิดออกซิเดชันของหมู่ซัลไฟด์ของโพรตีนเกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามโพรตีน (Witt, 2008) จึงมีศักยภาพในการนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโพรตีน

การบ่มด้วยความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีรายงานว่าสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพรตีนได้ (Gennadios et al., 1996a; Jangchud and Chinnan, 1999) โดยการให้ความร้อนแก่โพรตีนสามารถส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไธออล-ไดซัลไฟด์ (thiol-disulfide exchange) ซึ่งส่งผลให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น (Jensen, 1959; Gennadios et al., 1996a; Jangchud and Chinnan, 1999)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ รวมทั้งผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มโซลเจล



บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradable film)

ในปัจจุบันได้มีการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้บริโภคและผู้ผลิตหันมาให้ความสนใจบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงมีความพยายามในการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ชีวภาพเพื่อทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ฐานปิโตรเลียม

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น ความชื้น ออกซิเจน แสง ภาวะที่เป็นกรด และภาวะที่เป็นเบส ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่ก่อให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อม (Ahmadi et al., 2012) พลาสติกย่อยสลายได้มีสมบัติเชิงหน้าที่เช่นเดียวกับพลาสติกที่เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไป ได้แก่ ควบคุมการซึมผ่านของไอน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไขมัน รวมถึงสารที่เป็นส่วนประกอบของกลิ่นรสเพื่อคงลักษณะเดิมของผลิตภัณฑ์ไว้ (Ghanbarzadeh and Oromiehi, 2008) พลาสติกย่อยสลายได้สามารถช่วยป้องกันหรือชะลอการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่ถูกห่อหุ้มได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสี และการเกิดออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังอาจทำหน้าที่ให้ความคงตัว (integrity) แก่ผลิตภัณฑ์ (Ghanbarzadeh et al., 2007)

พอลิเมอร์ชีวภาพจากธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้แบ่งออกเป็นประเภทหลัก 3 ประเภท ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน และลิพิด โดยพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีนหลายชนิดมีศักยภาพในการนำมาพัฒนาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ ในขณะที่ลิพิดมักไม่ใช้ผลิตเป็นพลาสติกเดี่ยว แต่จะใช้ร่วมกับพอลิแซ็กคาไรด์หรือโปรตีนในการผลิตฟิล์มคอมโพสิต (composite film) หรือผลิตเป็นสาร

เคลือบย่อยสลายได้ (bio-degradable coating) พอลิเมอร์ชนิดเดียวหรือหลายชนิดร่วมกัน เพื่อเสริมจุดเด่นและลดจุดด้อยของพอลิเมอร์แต่ละชนิด (Kester and Fennema, 1986; Krochta, 2002)

พอลิแซ็กคาไรด์ที่มีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้มีหลายชนิด เช่น เซลลูโลสและเซลลูโลสตัดแปร สตาร์ชและสตาร์ชตัดแปร ฟลาวาร์ โคโทซาน กัมอะราบิก เพกทิน คาราจีแนน และแอลจีเนต (Mariniello et al., 2003; Dias et al., 2010; Kanatt et al., 2012; Harper et al., 2013; Ma et al., 2013; Pelissari et al., 2013; Soazo et al., 2013) ฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพในการป้องกันความชื้นที่ต่ำ (Yu et al., 2013) เนื่องจากธรรมชาติของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยหมู่เคมีที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic group) เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามฟิล์มชนิดนี้อาจช่วยชะลอการสูญเสียความชื้นของอาหารได้หากเก็บรักษาเป็นระยะเวลาที่จำกัด นอกจากนี้ฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์บางชนิดยังสามารถชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด

ในด้านฟิล์มโปรตีน ฟิล์มโปรตีนมีสมบัติเด่นในด้านการต้านทานการซึมผ่านของไขมัน ออกซิเจนและแก๊สอื่นๆ รวมถึงไอของสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามฟิล์มโปรตีนมีข้อจำกัดสำคัญในด้านการป้องกันความชื้นเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีนที่มีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์ม ได้แก่ โปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนถั่วลิสง ซีน (โปรตีนข้าวโพด) กลูเตน ไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนจากสัตว์ต่างๆ เจลาติน เวย์โปรตีน และเคซีน (Kunte et al., 1997; Lim et al., 1998; Rayner et al., 2000; Hernández-Muñoz et al., 2004a; Ghanbarzadeh and Oromiehi, 2008; Ma et al., 2013; Soazo et al., 2013)

สำหรับลิพิดเป็นกลุ่มของสารที่มีขั้วต่ำจึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ มักนำมาใช้ในการผลิตสารเคลือบ นอกจากนี้ยังมีการใช้ลิพิดร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพอื่น เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีน ในการผลิตฟิล์มคอมพอสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติการป้องกันความชื้นของฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์และฟิล์มโปรตีน ลิพิด

ที่นำมาใช้ในการผลิตฟิล์มและสารเคลือบ ได้แก่ น้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์ แวกซ์ แล็ก (lac) และน้ำมันหอมระเหย (Kamper and Fennema, 1984; Gontard et al., 1994; McHugh and Krochta, 1994; Shellhammer and Krochta, 1997; Yang and Paulson, 2000; Morillon et al., 2002; Peroval et al., 2002; Fernandez et al., 2007; Han et al., 2006; Perez-Mateos et al., 2009; Bourtoom and Chinnan, 2009; Monedero et al., 2009; Kokoszka et al., 2010; Wu et al., 2010; Zahedi et al., 2010)

2.2 ไข่

องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่แสดงดังตารางที่ 2.1 ไข่ไก่ทั้งฟองประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ในปริมาณ 12.49, 10.02 และ 1.22% ตามลำดับ ส่วนไข่แดงประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ในปริมาณ 15.7-16.6, 31.8-35.5 และ 0.2-1.0% ตามลำดับ สำหรับไข่ขาวมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ น้ำ (87.87-89.37%) และโปรตีน (9.7-10.6%) คาร์โบไฮเดรตในไข่ขาวจะอยู่ในรูปอิสระและรูปที่อยู่ร่วมกับโปรตีน (ไกลโคโปรตีน) ซึ่งคาร์โบไฮเดรตอิสระส่วนใหญ่ (98%) เป็นกลูโคส ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบของไกลโคโปรตีน ได้แก่ แมนโนสและกาแล็กโตส (Stadelman and Cotterill, 1995) ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดและปริมาณของกรดแอมิโนที่เป็นองค์ประกอบของไข่ขาว โปรตีนไข่ขาวเป็นแหล่งสำคัญของกรดแอมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (ซิสเทอีนและเมไธโอนีน) โดยไข่ขาวมีกรดแอมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบสูงถึง 8% ของกรดแอมิโนทั้งหมด ซึ่งสูงกว่าโปรตีนจากแหล่งอื่นๆ เช่น เนื้อสัตว์ (5%) ผลิตภัณฑ์นม (4%) และโปรตีนจากพืช (<4%) (Nimni, Han and Cordoba, 2007)

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่

ส่วนของไข่	ปริมาณ (%)				
	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	เถ้า	น้ำ
ไข่ขาว	9.7-10.6	0.03	0.4-0.9	0.5-0.6	87.87-89.37
ไข่แดง	15.7-16.6	31.8-35.5	0.2-1.0	0.94	45.96-51.36
ไข่ทั้งฟอง	12.49	10.02	1.22	0.94	75.33

ที่มา: Stadelman and Cotterill (1995); Anonymous (2005)

ตารางที่ 2. 2 กรดแอมิโนที่เป็นองค์ประกอบของไข่ขาวของไข่ไก่

กรดแอมิโน	ไอโซอิเล็กทริกพีเอช	ปริมาณ (กรัม/100 กรัมของไข่ขาว)
แอลานีน	6.00	0.696
อาร์จินีน	10.76	0.749
กรดแอสพาร์ติก	2.77	1.225
ซิสเทอีน	5.07	0.290
กรดกลูตามิก	3.22	1.633
ไกลซีน	5.98	0.420
ฮิสทีดีน	7.59	0.296
ไอโซลิวซีน	6.02	0.682
ลิวซีน	5.98	1.067
ไลซีน	9.74	0.897
เมไทโอนีน	5.74	0.390
เฟนิลแอลานีน	5.48	0.664
โพรลีน	6.30	0.498
ซีรีน	5.68	0.929
ทรีโอนีน	5.68	0.600
ทริปโตเฟน	5.89	0.152
ไทโรซีน	5.66	0.510
วาเลีน	5.96	0.761

ที่มา: Li-Chan and Nakai (1989); Damodaran (1996); Anonymous (2005)

2.3 โปรตีนส่วนต่างๆ (protein fraction) ในไข่ขาว

ไข่ขาวประกอบด้วยโอวัลบูมินซึ่งเป็นไกลโคโปรตีนละลายอยู่ในสารละลายน้ำของโกลบูลาร์โปรตีนหลายชนิด โดยโอวัลบูมินมีบทบาทในการเกิดเป็นเจลของไข่ขาว โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในไข่ขาวสามารถแยกส่วนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟตและทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) โดยโปรตีนที่แยกได้จากไข่ขาวมีสมบัติทางเคมีและกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.3.1 โอวัลบูมิน

โอวัลบูมินเป็นโปรตีนที่มีปริมาณมากที่สุดในไข่ขาว กล่าวคือ มีปริมาณประมาณครึ่งหนึ่งโดยน้ำหนักของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด โอวัลบูมินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทฟอสโฟไกลโคโปรตีน (phosphoglycoprotein) โดยมีคาร์โบไฮเดรตและหมู่ฟอสเฟตจับอยู่กับสายพอลิเพปไทด์ โอวัลบูมินแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามจำนวนหมู่ฟอสเฟต ได้แก่ โอวัลบูมินเอ 1 โอวัลบูมินเอ 2 และโอวัลบูมินเอ 3 โดยโอวัลบูมินเอ 1 และโอวัลบูมินเอ 2 ประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟต 2 หมู่ และ 1 หมู่ ตามลำดับ ในขณะที่โอวัลบูมินเอ 3 ไม่มีหมู่ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ โอวัลบูมินทั้งสามชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 45 กิโลดาลตัน (Mine, 1995) และประกอบด้วยหมู่ซัลฟ์ไฮดริลทั้งหมด 4 หมู่ โดยมีหมู่ซัลฟ์ไฮดริลอิสระ 1 หมู่ โอวัลบูมินจัดเป็นโปรตีนไข่ขาวเพียงชนิดเดียวที่มีหมู่ซัลฟ์ไฮดริลอิสระ และมีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ มีค่าไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 4.5 โอวัลบูมินสามารถทนความร้อนได้ดี โดยมีอุณหภูมิการเสียสภาพธรรมชาติเท่ากับ 84.0 องศาเซลเซียส เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษานานขึ้นโอวัลบูมินจะเปลี่ยนไปเป็นเอส-โอวัลบูมิน (S-ovalbumin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทนความร้อนได้มากขึ้น มีอุณหภูมิการเสียสภาพธรรมชาติเท่ากับ 92.5 องศาเซลเซียส โดยที่องค์ประกอบของกรดแอมิโนในโมเลกุลของโอวัลบูมินและเอส-โอวัลบูมินนั้นไม่แตกต่างกัน (Mine, 1995) นอกจากนี้โอวัลบูมินยังสามารถเกิดการเสียสภาพธรรมชาติได้เมื่อผ่านแรงเฉือน เช่น การเขย่า (Warner, 1954; Stadelman and Cotteril, 1995)

ตารางที่ 2. 3 สมบัติของโปรตีนไข่ขาว

ส่วนของโปรตีน	ปริมาณ ใน ไข่ขาว (%)	pI*	น้ำหนักโมเลกุล (ดาลตัน)	T _d ** (°C)	สมบัติ
โอวัลบูมิน (ovalbumin)	54	4.5	45,000	84.0	เป็นฟอสโฟโกลโคโปรตีน ประกอบด้วยหมู่ซัลฟ์ไฮด ริล 4 หมู่
โอโวแทรนส์เฟอร์ริน หรือคอนอัลบูมิน (ovotransferrin or conalbumin)	12-13	6.1	76,000-80,000	61.0	เป็นโกลโคโปรตีนที่จับกับ ธาตุเหล็กได้เป็น สารประกอบเชิงซ้อน
โอโวมิวคอยด์ (ovomuroid)	11	4.1	28,000	79.0	เป็นโกลโคโปรตีน ยับยั้ง การทำงานของทริปซิน
โอโวมิวซิน (ovomucin)	3.5	4.5- 5.0	5,500- 8,300×10 ³	ND	เป็นโกลโคโปรตีน
ไลโซไซม์ (lysozyme)	3.4	10.7	14,300	75.0	ทำให้เซลล์ของแบคทีเรีย บางชนิดแตก (bacterial cell lysis)
แอวิดิน (avidin)	0.05	10.0	68,300	85.0	จับกับไบโอติน (วิตามินบี 7)
โอโวโกลบูลิน (ovoglobulin)	4.0	4.8- 5.5	35,000	ND	เป็นโกลโคโปรตีน
โอโวอินฮิบิเตอร์ (ovoinhibitor)	1.5	5.1	49,000	ND	เป็นโกลโคโปรตีน
โอโวฟลาโวโปรตีน (ovoflavoprotein)	0.8	4.0	32,000	ND	จับกับไรโบฟลาวิน (วิตามินบี 2)

* ไอโซอิเล็กทริกพีเอช

** อุณหภูมิการเสียสภาพธรรมชาติ (denaturation temperature)

ND, Not determined

ที่มา: Gossett et al. (1984); Mine (1995); Stadelman and Cotterill (1995)

2.3.2 โอโวแทรนส์เฟอร์ริน

โอโวแทรนส์เฟอร์รินหรือคอนอัลบูมิน มีปริมาณ 12% ของโปรตีนทั้งหมดในไข่ขาว มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 76 กิโลดาลตัน และมีไอโซอิเล็กทริกพีเอชประมาณ 6.1 โปรตีนส่วนนี้ประกอบด้วยหน่วยย่อยกรดแอมิโน 686 หน่วย และมีพันธะไดซัลไฟด์จำนวน 15 พันธะ ไม่มีหมู่ฟอสเฟตหรือหมู่ซัลฟ์ไฮดริลอิสระ (Mine, 1995) โอโวแทรนส์เฟอร์รินเป็นไกลโคโปรตีนที่ประกอบด้วยพอลิเพปไทด์สายเดี่ยว (monomeric glycoprotein) โดยมีน้ำตาลเฮกโซส 0.8% และเฮกโซซามีน (hexosamine) 1.4% โอโวแทรนส์เฟอร์รินเป็นโปรตีนที่แยกได้ง่ายโดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ทนความร้อนได้น้อยกว่าโอวัลบูมินโดยอุณหภูมิการเสียสภาพธรรมชาติอยู่ที่ประมาณ 61 องศาเซลเซียส โอโวแทรนส์เฟอร์รินสามารถจับกับไอออนโลหะ (chelating agent) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทนต่อความร้อนและการย่อยสลาย โดยสารประกอบเชิงซ้อนของโอโวแทรนส์เฟอร์รินกับไอออนโลหะอาจมีสีหรือไม่มีสี เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโอโวแทรนส์เฟอร์รินกับ Fe^{3+} และ Cu^{2+} มีสีแดงและเหลือง ตามลำดับ ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนของโอโวแทรนส์เฟอร์รินกับ Al^{3+} และ Zn^{2+} ไม่มีสี นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าโอโวแทรนส์เฟอร์รินมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.3 โอโวมิวคอยด์

โอโวมิวคอยด์เป็นไกลโคโปรตีน มีปริมาณประมาณ 10% ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด โอโวมิวคอยด์ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 25% จึงสามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าโอโวแทรนส์เฟอร์ริน โอโวมิวคอยด์มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 28 กิโลดาลตัน และมีไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 4.1 ในโครงสร้างมีพันธะไดซัลไฟด์จำนวน 9 พันธะ แต่ไม่มีหมู่ซัลฟ์ไฮดริลอิสระ โอโวมิวคอยด์เป็นตัวยับยั้งทริปซิน (trypsin inhibitor) ที่พบในไข่ โดยจัดเป็น single headed inhibitor ซึ่งหมายถึงโอโวมิวคอยด์แต่ละโมเลกุลจับกับทริปซินในอัตราส่วน 1:1 ในช่วงพีเอชที่เป็นกรด โอโวมิวคอยด์สามารถทนต่อความร้อนได้ดี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี แต่ในภาวะที่เป็นเบสโอโวมิวคอยด์จะเกิดการเสียสภาพธรรมชาติอย่างรวดเร็ว (Mine, 1995) ซึ่ง

โอโวมิวคอยด์ที่เสียสภาพด้วยความร้อนจะสูญเสียความสามารถในการยับยั้งทริปซิน (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.4 โอโวมิวซิน

โอโวมิวซินเป็นไกลโคโปรตีนที่มีหมู่ซัลเฟต ทำให้ไข่ขาวข้น (thick egg white) มีลักษณะคล้ายวุ้น โดยไข่ขาวข้นมีปริมาณโอโวมิวซินสูงกว่าไข่ขาวใส (thin egg white) ถึง 4 เท่า โอโวมิวซินมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 5,500-8,300 กิโลดาลตัน โอโวมิวซินแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง (carbohydrate-rich) เรียกเบต้า-โอโวมิวซิน และชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตต่ำ (carbohydrate-poor) เรียกแอลฟา-โอโวมิวซิน (Mine, 1995) โอโวมิวซินมีคาร์โบไฮเดรตอยู่ถึง 30% และปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่สูงนี้จึงทำให้โอโวมิวซินทนต่อความร้อนได้ดี มีรายงานว่าสารละลายโอโวมิวซินที่พีเอช 7.1-9.4 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดหรือออกพิกัลเด้นซิตีในระหว่างการให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โอโวมิวซินและไลโซไซม์สามารถรวมกันด้วยอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ แต่ที่พีเอชที่สูงกว่าในช่วง 7.2-10.4 อันตรกิริยาระหว่างโปรตีนทั้งสองจะลดลง โดยเฉพาะในช่วงพีเอชใกล้เคียงไอโซอิเล็กทริกพีเอชของไลโซไซม์ (pI=10) ปรากฏการณ์นี้ทำให้ไข่ขาวมีความหนืดลดลงระหว่างการเก็บรักษา สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของโอโวมิวซินคือทำให้โฟมคงตัว (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.5 ไลโซไซม์

ไลโซไซม์ หรือ mucopeptide *N*-acetylmuramoylhydrolase (EC3.2.1.17) เป็นเอนไซม์ในไข่ขาวที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบซึ่งเป็นโปรตีโอไกลแคนได้ โดยย่อยสลายพันธะ $\beta(1\rightarrow4)$ ที่เชื่อมต่อระหว่าง *N*-acetylglucosamine และ *N*-acetylmuramic acid ไลโซไซม์มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 14.3 กิโลดาลตัน มีไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 10.7 ประกอบด้วยหน่วยย่อยกรดแอมิโน 129 หน่วย มีพันธะไดซัลไฟด์ 4 พันธะ แต่ไม่มีหมู่ซัลฟ์ไฮดริล

อิสระ (Mine, 1995) การใช้ความร้อนในการยับยั้งเอนไซม์นี้ขึ้นอยู่กับพีเอชและอุณหภูมิ โดยไลโซไซม์ จะถูกทำลายได้มากขึ้นหากพีเอชสูงกว่า 7 และจะเสียดสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นกับพีเอชและภาวะของสารละลาย (Mine, 1995; Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.6 แอวิติน

แอวิตินเป็นไกลโคโปรตีนที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยกรดแอมิโน 128 หน่วย มี น้ำหนักโมเลกุล 68.3 กิโลดาลตัน ไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 10.0 และมีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ สามารถทนความร้อนได้ดี โดยมีอุณหภูมิการเสียดสภาพธรรมชาติที่ 85 องศาเซลเซียส สามารถจับกับไบโอติน (วิตามินบี 7) ซึ่งเป็นวิตามินที่มนุษย์ต้องการ โดยแอวิตินจับกับไบโอตินในอัตราส่วน 1:4 สารประกอบเชิงซ้อนของแอวิตินและไบโอตินที่สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นการที่จะนำไบโอตินที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอวิตินมาใช้ได้นั้นจะต้องให้ความร้อนที่ อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้พันธะระหว่างแอวิตินและไบโอตินแตกออก นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าแอวิตินมีฤทธิ์ยับยั้งของจุลินทรีย์ด้วย เนื่องจากแอวิตินสามารถจับกับแบคทีเรียทั้งแกรม บวกและแกรมลบได้ (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.7 โอโวโกลบูลิน

โอโวโกลบูลินมีปริมาณประมาณ 4% ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด แต่เดิมมีรายงานว่า โอโวโกลบูลินประกอบด้วยโปรตีน 3 ส่วน ได้แก่ โอโวโกลบูลินจี 1 โอโวโกลบูลินจี 2 และ โอโวโกลบูลินจี 3 โดยที่โอโวโกลบูลินจี 1 นั้นต่อมาได้มีการระบุว่าเป็นไลโซไซม์ ส่วนโอโวโกลบูลินจี 2 และโอโวโกลบูลินจี 3 เป็นไกลโคโปรตีนที่มีไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 5.5 และ 4.8 ตามลำดับ โดย โอโวโกลบูลินสองชนิดนี้มีสมบัติเป็นสารก่อโฟม (foaming agent) ช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ อาหารที่ใส่ไข่ เช่น ขนมอบ (Mine, 1995; Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.8 โอโวอินฮิเตอร์

โอโวอินฮิเตอร์เป็นไกลโคโปรตีน มีปริมาณ 1.5% ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด ประกอบด้วยเฮกโซส 3.5% และเฮกโซซามีน 2.7% สามารถยับยั้งการทำงานของทริปซินและโคโมทริปซิน (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.3.9 โอโวฟลาโวโปรตีน

โอโวฟลาโวโปรตีนเป็นฟอสโฟไกลโคโปรตีน มีปริมาณ 0.8% ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 32 กิโลดาลตัน และมีไอโซอิเล็กทริกพีเอชเท่ากับ 4.0 โอโวฟลาโวโปรตีนมีคาร์โบไฮเดรต 15% ซึ่งประกอบด้วยแมนโนส กาแล็กโทส และกลูโคซามีน ในปริมาณ 6.0, 1.3 และ 11.2% ตามลำดับ โอโวฟลาโวโปรตีนสามารถจับกับไรโบฟลาวิน (วิตามินบี 2) ในอัตราส่วน 1 : 1 (Stadelman and Cotterill, 1995)

2.4 การเกิดเป็นฟิล์มโปรตีน

ฟิล์มโปรตีนผลิตโดยการทำให้โปรตีนละลาย (solubilize) หรือกระจายตัว (disperse) ในตัวทำละลาย ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้มักเป็นน้ำ หลังจากนั้นจึงแยกตัวทำละลายออก เช่น การระเหย โปรตีนในสภาพธรรมชาติ (native state) จะเกิดการม้วนพับ (bend and fold) ของสายพอลิเพปไทด์เกิดเป็นรูปร่างสามมิติ (three-dimensional conformation) ที่กระชับ (compact) การม้วนพับของสายพอลิเพปไทด์นี้เกิดจากอันตรกิริยาทางเคมีต่างๆ ทั้งพันธะโควาเลนต์ เช่น พันธะไดซัลไฟด์ และอันตรกิริยานอน-โควาเลนต์ เช่น พันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก แรงทางไฟฟ้าสถิต และแรงแวนเดอร์วาลส์ การม้วนพับเป็นโครงสร้างตติยภูมิ (tertiary structure) นี้เพื่อความเหมาะสมต่อหน้าที่หรือบทบาทของโปรตีนนั้นๆ ในโปรตีนโดยทั่วไปซึ่งมักอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำ (aqueous environment) หน่วยย่อยกรดแอมิโนที่มีหมู่ข้างที่ไม่ชอบน้ำจึงมักมีตำแหน่งอยู่ด้านในของโครงสร้าง ในขณะที่หน่วยย่อยกรดแอมิโนที่มีหมู่ข้างที่ชอบน้ำมีตำแหน่งอยู่ด้านนอก ในการเตรียมสารละลายฟิล์มโปรตีนจึงมักต้องมีขั้นตอนการทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ

บางส่วน (partial denaturation) เพื่อให้สายพอลิเพปไทด์เกิดการคลายตัว (unfold) ทำให้หมู่ซัลไฟไฮดริลและหมู่ที่ไม่ชอบน้ำที่เคยอยู่ด้านในปรากฏขึ้นที่ด้านนอก และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ด้วยอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งมีบทบาทร่วมกับอันตรกิริยาชนิดอื่นๆ ในการเกิดเป็นโครงร่างแหของโปรตีนที่เสถียร (Gennadios et al., 1996)

ในการเกิดฟิล์มนั้นมีแรง 2 ชนิดที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงโคฮีชัน (cohesion) และแรงแอดฮีชัน (adhesion) แรงโคฮีชันเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยกันเอง ทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันหรือต้านทานการแยกจากกันของวัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ ระบบของสารละลาย และภาวะในการเตรียมฟิล์ม โดยแรงโคฮีชันมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้าง ความเป็นกึ่งก้านของโมเลกุล และการกระจายของหมู่เคมีที่มีขั้วบนสายโซ่พอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดี การกระจายของหมู่เคมีที่มีขั้วอย่างเป็นระเบียบบนสายโซ่พอลิเมอร์จะช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาไอออนิกระหว่างสายโซ่ทำให้โครงร่างแหของพอลิเมอร์มีความแข็งแรง ส่วนการละลายของพอลิเมอร์ในสารละลายฟิล์มที่ดีจะทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์ขยายตัวได้มากและได้โครงร่างแหซึ่งเชื่อมกันด้วยแรงโคฮีชันที่มาก ส่วนภาวะในการเตรียมฟิล์ม เช่น ภาวะที่ใช้ขั้นตอนการทำแห้ง ควรใช้ความร้อนที่เหมาะสม หากทำแห้งที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายเร็วเกินไป โมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกตรึงก่อนที่จะเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดเป็นรูขนาดเล็ก (pinhole) หรือทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้การซึมผ่านของสารต่างๆ เพิ่มขึ้น ระดับของแรงโคฮีชันมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม ได้แก่ ความอัดแน่น (compactness) ความหนาแน่น (density) ความเป็นรูพรุน (porosity) สภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability) ความยืดหยุ่น (flexibility) และความเปราะ (brittleness) สำหรับแรงแอดฮีชันเป็นแรงที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิด ได้แก่ พอลิเมอร์และพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเช่นกัน (Banker, 1966)

2.5 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน

ฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไปรวมถึงฟิล์มโปรตีนไข่ขาวมีข้อจำกัดสำคัญในด้านสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฟิล์มโปรตีนยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายนัก จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโปรตีนโดยการส่งเสริมให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายพอลิเพปไทด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดการเชื่อมข้ามด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่มีพลังงานการสลายพันธะสูงและมีความแข็งแรงมากกว่าอันตรกิริยานี้ออน-โควาเลนต์ ที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์ได้ใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อส่งเสริมให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนในฟิล์ม ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวเคมี

2.5.1 วิธีทางกายภาพ

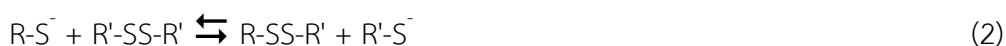
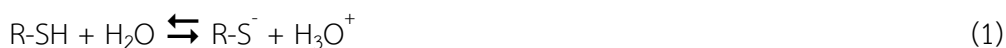
การปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโปรตีนด้วยวิธีทางกายภาพที่มีการศึกษา ได้แก่ การบ่มด้วยความร้อน และการฉายรังสี

2.5.1.1 การบ่มด้วยความร้อน

การบ่มด้วยความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่มีรายงานว่าสามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโปรตีนได้ (Gennadios et al., 1996a; Jangchud and Chinnan, 1999) การบ่มด้วยความร้อนสามารถทำได้ทั้งการบ่มสารละลายฟิล์มด้วยความร้อน (heat curing of film-forming solution) และการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อน (heat curing of dried film)

Jensen (1959) ได้เสนอกลไกของปฏิกิริยาของโปรตีนซึ่งต่อมาได้มีการอ้างอิงกันอย่างกว้างขวาง โดยเสนอว่าการให้ความร้อนแก่โปรตีนสามารถส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการสลับเปลี่ยนซัลไฟไฮไดรล-ไดซัลไฟด์ (sulfhydryl-disulfide interchange) ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกเป็นปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไธออล-ไดซัลไฟด์ (thiol-disulfide exchange) ส่งผลให้เกิดการเชื่อมข้าม

ของโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (รูปที่ 2.1) โดย Fernandes and Ramos (2004) เสนอว่าปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไรออล-ไดซัลไฟด์ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย 4 ปฏิกิริยา ดังสมการเคมีที่ (1)-(4)

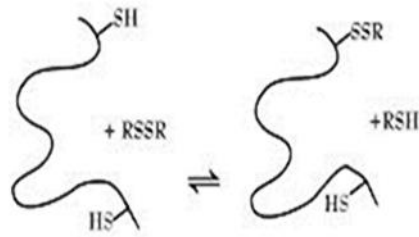
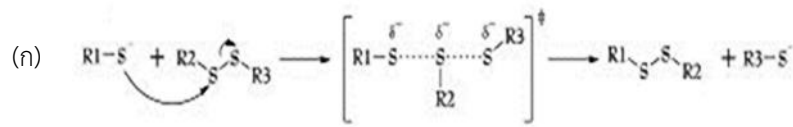


ซึ่งสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาโดยรวมได้ดังสมการเคมีที่ (5)

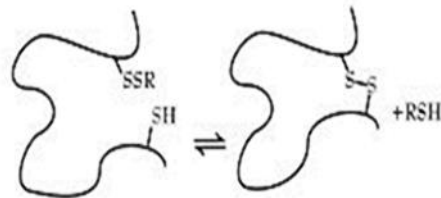


สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของการบ่มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน Gennadios et al. (1996b) ศึกษาการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่อุณหภูมิ 80 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้น ในขณะที่มีการยืดตัวถึงจุดขาดลดลง

Jangchud and Chinnan (1999) ศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วลิสงเข้มข้น (peanut protein concentrate) โดยบ่มแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มสูงขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาพให้ซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability) และสภาพให้ซึมผ่านได้ของออกซิเจน (oxygen permeability) มีค่าลดลง



(ข)



รูปที่ 2. 1 (ก)ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไฮออล-ไดซัลไฟด์ (ข)การเกิดพันธะไดซัลไฟด์ของพอลิเพปไทด์
ที่มา: Agoston et al. (2005)

Kim et al. (2002) ศึกษาการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 60, 72.5 และ 85 องศาเซลเซียส บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้บ่มด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernández-Muñoz et al. (2004b) ที่ศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มกลูเตนินด้วยความร้อน โดยแปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 40, 55, 70, 85, 95 และ 115 องศาเซลเซียส บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มสูงขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น แต่มีการยืดตัวถึงจุดขาดและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

อัญชนา อินสวาสดี, เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ และ
ธนจันทร์ มหาวนิช (2557) ศึกษาการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมกรดแกลลิกเข้มข้น 1.5%

โดยน้ำหนักของโปรตีน แปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส), 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส แปรระยะเวลาการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15 ชั่วโมง พบว่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ยกเว้นตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่แม้ว่าจะมีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นแต่การยึดตัวถึงจุดขาดกลับมีค่าลดลง โดยอัญชนา อินสวาสดี (2557) รายงานว่าการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองด้วยความร้อนทำให้โปรตีนเกิดการเชื่อมข้ามกันมากขึ้นตั้งยีนยันจากรูปแบบแถบโปรตีนที่ศึกษาโดยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตพอลิแอคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรโฟเรซิส (SDS-PAGE)

สำหรับการศึกษาการบ่มสารละลายฟิล์มด้วยความร้อน นลินทิพย์ คงแก้ว (2554) ศึกษาในตัวอย่างฟิล์มอิมัลชันของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและน้ำมัน เมล็ดปาล์ม ไฮโดรจีเนต (hydrogenated palm kernel oil) โดยแปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 70, 80, และ 85 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 30, 45 และ 60 นาที พบว่าการบ่มสารละลายฟิล์มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดสูงที่สุด อย่างไรก็ตามสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) ของฟิล์มที่ได้กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

2.5.1.2 การฉายรังสี

การฉายรังสีเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน Fujimori (1965) รายงานว่ารังสีบางชนิด เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีแกมมา มีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนได้ โดยกรดแอมิโนชนิดแอโรมาติก (aromatic amino acid) ได้แก่ ไทโรซีน และเฟนิลแอลานีน มีหมู่ข้างซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีได้ ทำให้เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้ามระหว่างสายพอลิเพปไทด์ นอกจากนี้ Galietta et al. (1998) ยังเสนอว่ารังสีสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดแอมิโนและทำให้เกิดการรวมตัวกันของสายเพปไทด์

Ressouany et al. (2000) ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติของฟิล์มเคซีนต์ ผู้วิจัยรายงานว่ฟิล์มเคซีนต์ที่ฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) 64 กิโลเกรย์ มีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

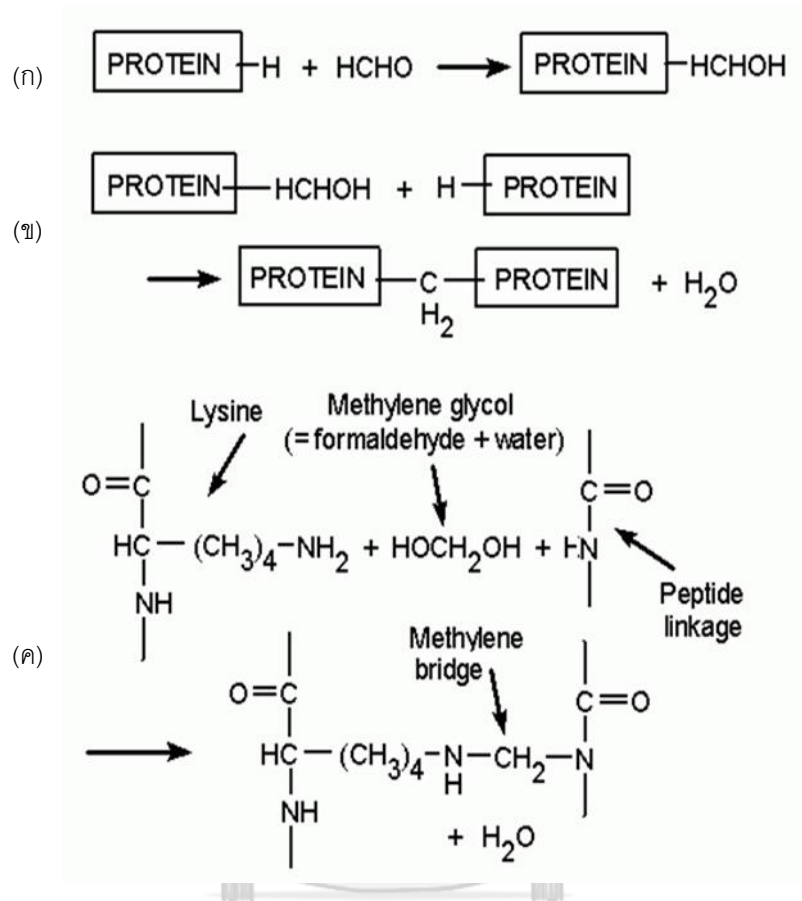
Salmoral et al. (2000) ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวสกัด (mung bean protein isolate) ฟลาวร์ถั่วเขียว โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และฟลาวร์ถั่วเหลือง โดยใช้ปริมาณรังสีดูดกลืน 50 กิโลเกรย์ พบว่ฟิล์มทั้งสี่ชนิดมีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

Sabato et al. (2005) ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนจากปลาไนล (*Oreochromis niloticus*) โดยแปรปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 25, 50, 100, 150 และ 200 กิโลเกรย์ พบว่ฟิล์มที่ฉายรังสีมีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และการใช้ปริมาณรังสีดูดกลืน 100 กิโลเกรย์ ส่งผลให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวพบว่การฉายรังสีไม่มีผลต่อการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์ม ($p>0.05$) ผู้วิจัยจึงอธิบายว่รังสีชนิดไอออไนซิง (ionizing radiation) เช่น รังสีแกมมา สามารถส่งเสริมการเชื่อมข้ามของโปรตีนได้

2.5.2 วิธีทางเคมี

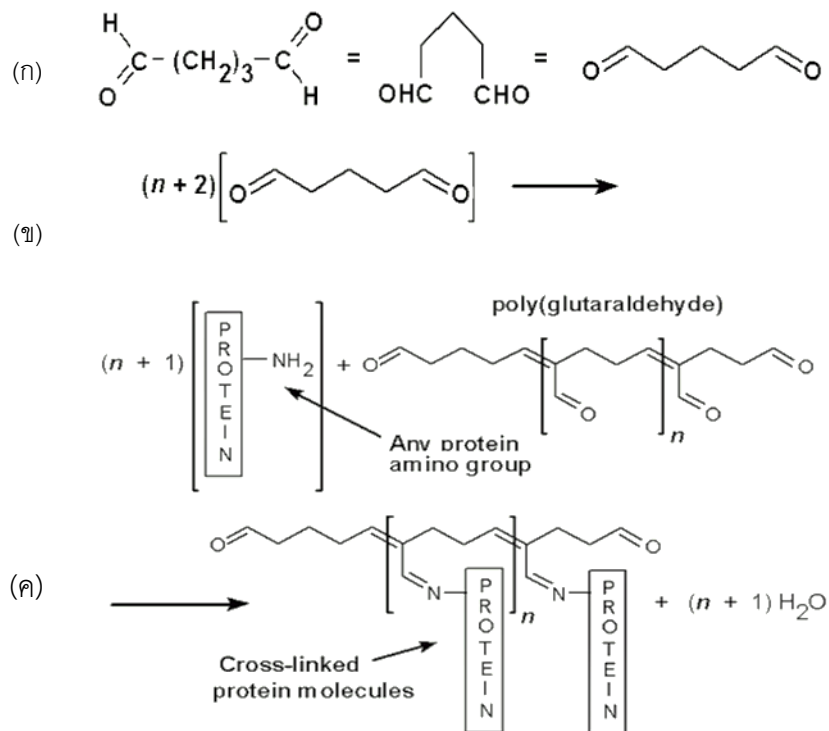
การใช้สารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมข้ามโปรตีน (protein cross-linker) เป็นวิธีปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็น ตัวเชื่อมข้ามได้ ได้แก่ สารในกลุ่มแอลดีไฮด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัล โดยแอลดีไฮด์จะทำปฏิกิริยากับกรดแอมิโนบนสายเพปไทด์ ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลของโปรตีน รูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 แสดงการเกิดการเชื่อม

ข้ามโปรตีนที่เหนียวนำโดยการทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัลตามลำดับ



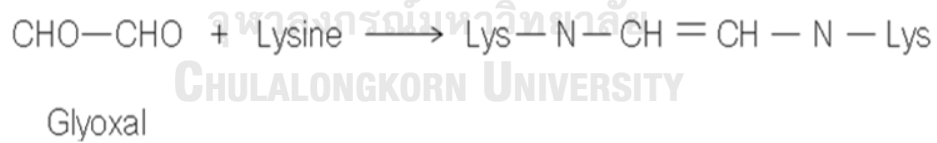
รูปที่ 2. 2 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยฟอร์มัลดีไฮด์ (ก) ฟอร์มัลดีไฮด์เกิดปฏิกิริยากับโปรตีน (ข) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับโปรตีนอีกสายหนึ่งเกิดเป็นพันธะเชื่อมข้ามเมทิลีน (methylene cross-link) ระหว่างสายโปรตีน และ (ค) การเชื่อมข้ามระหว่างโซ่ข้างของไลซีนกับอะตอมไนโตรเจนของพันธะเพปไทด์โดยฟอร์มัลดีไฮด์

ที่มา: Kiernan (2000)



รูปที่ 2. 3 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยกลูทาราลดีไฮด์ (ก) มอนอเมอร์กลูทาราลดีไฮด์ (monomeric glutaraldehyde) (ข) กลูทาราลดีไฮด์เกิดพอลิเมอร์โซ่ขึ้นภายใต้ภาวะที่เป็นเบส และ (ค) พอลิเมอร์ของกลูทาราลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับหมู่แอมิโนของโปรตีนทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของสายโปรตีน

ที่มา: Kiernan (2000)



รูปที่ 2. 4 การเชื่อมข้ามโปรตีนโดยไกลออกซัล โดยไกลออกซัลเกิดปฏิกิริยากับหน่วยย่อยไลซีนในโมเลกุลโปรตีน

ที่มา: Marquie (2001)

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาการใช้แอลดีไฮด์เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโปรตีน Orliac et al. (2002) ศึกษาผลของแอลดีไฮด์ ได้แก่ ฟอรัมาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัล ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนสกัดจากเมล็ดทานตะวัน (sunflower protein isolate) โดยแปรความเข้มข้นของแอลดีไฮด์เป็น 1-6% โดยน้ำหนักของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด พบว่าในช่วงความเข้มข้นของแอลดีไฮด์เท่ากับ 1.5-3% ฟิล์มที่เติมแอลดีไฮด์มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมแอลดีไฮด์ โดยฟิล์มที่เติมกลูทาราลดีไฮด์มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมฟอรัมาลดีไฮด์ และไกลออกซัล ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของแอลดีไฮด์สูงกว่า 3% ตัวอย่างฟิล์มกลับมีความต้านทานแรงดึงขาดลดลง ผู้วิจัยอธิบายว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ แอลดีไฮด์สามารถเชื่อมข้ามโปรตีนได้ แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แอลดีไฮด์จะรวมตัวกันเองทำให้การเชื่อมข้ามโปรตีนลดลง

Hernández-Muñoz et al. (2004a) ศึกษาผลของแอลดีไฮด์ต่อสมบัติของฟิล์มกลูเตนิน แอลดีไฮด์ที่ศึกษา ได้แก่ ฟอรัมาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัล แปรความเข้มข้นของแอลดีไฮด์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 2, 4 และ 8% โดยน้ำหนักของโปรตีน พบว่าฟิล์มที่เติมแอลดีไฮด์มีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมแอลดีไฮด์ โดยฟิล์มที่เติมฟอรัมาลดีไฮด์มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมกลูทาราลดีไฮด์และไกลออกซัล ตามลำดับ ในด้านการยึดตัวถึงจุดขาด พบว่าฟิล์มที่เติมแอลดีไฮด์มีการยึดตัวถึงจุดขาดและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยฟิล์มที่เติมฟอรัมาลดีไฮด์มีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ ฟิล์มที่เติมกลูทาราลดีไฮด์และไกลออกซัล ตามลำดับ สำหรับสภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำพบว่าฟิล์มที่เติมแอลดีไฮด์ทั้งสามชนิดมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

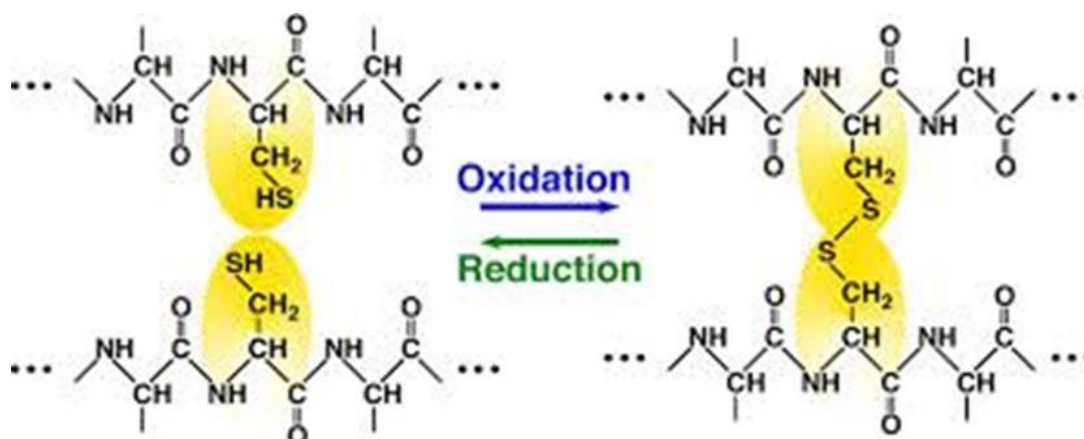
แม้ว่าแอลดีไฮด์จะมีประสิทธิภาพสูงในการทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมข้ามโปรตีน แต่ยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับความเป็นพิษของแอลดีไฮด์ (Galietta et al., 1998) มีรายงานว่า

แอลดีไฮด์อาจก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้แก่ การมีบทบาทในการเป็นแฮพเพน (hapten)¹ ความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคตับ ความเป็นพิษต่อทารกในครรภ์ (teratogenicity) ความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคเบาหวานและภาวะความดันโลหิตสูง ความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคความเสื่อมทางระบบประสาท (neurodegenerative disease) และโรคที่สัมพันธ์กับความชรา (aging-associated disease) (O'Brien, Siraki and Shangari, 2005) นักวิจัยจึงหันมาให้ความสนใจในการใช้สารเคมีอื่นที่มีความปลอดภัยมากกว่า (Cao et al., 2007)

โปรตีนไข่ขาวประกอบด้วยหมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระในปริมาณ 58.5 ไมโครโมล/กรัม

โปรตีน (Van der Plancken et al., 2005) โดยอยู่ในโอวัลบูมินซึ่งเป็นโปรตีนส่วนที่มีปริมาณมากที่สุดไข่ขาว หมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระนี้สามารถถูกออกซิไดส์และเกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์ (รูปที่ 2.5) ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงสูงโดยมีค่าพลังงานการสลายพันธะ (bond dissociation energy) สูงถึง 51 กิโลแคลอรี/โมล (Freeman, 2000) การเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระนี้เป็นปรากฏการณ์ที่พบในกระบวนการทางชีววิทยาในธรรมชาติ เช่น การเกิดต่อกระดูก ซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดออกซิเดชันได้เป็นพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของเลนส์ตา การทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามไดซัลไฟด์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงมีศักยภาพในการนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของระบบที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระ เช่น โปรตีนไข่ขาว

¹ แฮพเพนคือสารที่ตัวมันเองไม่สามารถชักนำให้เกิดการตอบสนองแบบจำเพาะแต่สามารถทำปฏิกิริยากับแอนติบอดีและสามารถกระตุ้นให้เกิดการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันได้ ดังนั้นจึงอาจมีความเกี่ยวข้องกับโรคภูมิไวเกิน (allergenic hypersensitivity disease) ภาวะภูมิแพ้ของระบบทางเดินหายใจ (respiratory allergy) และการแพ้ยาจากปฏิกิริยาจำเพาะ (idiosyncratic drug reaction)



รูปที่ 2. 5 ปฏิกริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลไฟไฮดริลเกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามระหว่างโปรตีน
ที่มา : Carlsberg Research Center (2003)

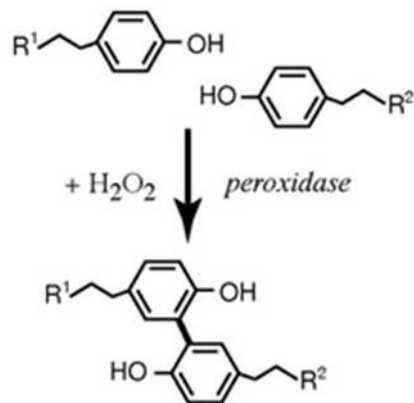
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน Hoque, Benjakul and Prodpran (2011) ศึกษาการใช้ปฏิกริยาออกซิเดชันเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเจลาตินจากหนังหมึกกระดอง (cuttlefish) ตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (แปรความเข้มข้นในช่วง 0.01-0.04 โมลาร์) และเฟนต์นรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) ซึ่งเป็นสารละลายของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และเพอร์สซัลเฟตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งโลหะ (แปรความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในช่วง 0.01-0.04 โมลาร์ และแปรความเข้มข้นของเพอร์สซัลเฟตในช่วง 0.001-0.004 โมลาร์) พบว่าฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์ทุกตัวอย่างมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์ ($p \leq 0.05$) โดยทั่วไปความต้านทานแรงดึงขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เท่ากับ 0.04 โมลาร์ ความต้านทานแรงดึงขาดกลับมีค่าลดลง ซึ่งผู้วิจัยเสนอว่าอาจเนื่องมาจากการแตกออกของพันธะเพปไทด์ นอกจากนี้ยังพบว่าเฟนต์นรีเอเจนต์มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มมากกว่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เฟนต์นรีเอเจนต์มีตัวเร่งโลหะเป็นส่วนประกอบ สำหรับการยืดตัวถึงจุดขาดพบว่าฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์มีการยืดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าหรือไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม

2.5.3 วิธีทางชีวเคมี

วิธีทางชีวเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน ได้แก่ วิธีทางเอนไซม์ โดยเอนไซม์ที่มีรายงานการใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน ได้แก่ เพอร์ออกซิเดส (EC1.11.1.7) และทรานส์กลูตามิเนส (EC2.3.2.13)

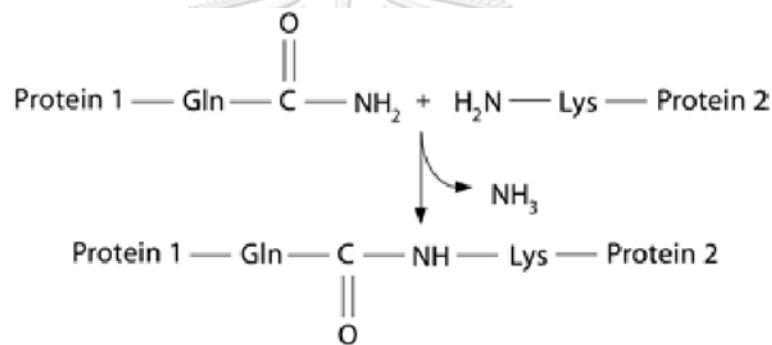
เพอร์ออกซิเดสเป็นเอนไซม์ในกลุ่มออกซิโดรีดักเทส ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหน่วยย่อยไทโรซีนบนสายเพปไทด์ของโปรตีน ทำให้เกิดการรวมตัวกัน (condensation) ของวงแอโรมาติก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเมอร์ ไตรเมอร์ หรือเตตระเมอร์ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของไทโรซีนในลำดับของกรดแอมิโน (amino acid sequence) และความยาวของสายเพปไทด์ของโปรตีน (Michon et al., 1997) รูปที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามที่เร่งโดยเพอร์ออกซิเดสในขณะที่มีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ส่วนทรานส์กลูตามิเนสเป็นเอนไซม์ในกลุ่มทรานส์เฟอเรส ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการย้ายหมู่เอซิลของแกมมาคาร์บอกซีเอไมด์ของหน่วยกลูตามีน (ทำหน้าที่เป็นตัวให้หมู่เอซิล) ไปยังหมู่แอมิโนปฐมภูมิหรือเอพซิลอน-แอมิโนของหน่วยย่อยไลซีน (ทำหน้าที่เป็นตัวรับหมู่เอซิล) เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยทั้งสองของสายเพปไทด์ (Ha and Luchi, 2003) (รูปที่ 2.7)

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาผลของเอนไซม์ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน Stuchell and Krochta (1994) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดโดยใช้เพอร์ออกซิเดสจากฮอร์สแรดิช ใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อโปรตีนเท่ากับ 1:1000 และเติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 20 มิลลิโมลาร์ พบว่าฟิล์มที่เติมเพอร์ออกซิเดสมีค่ายังก้มอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเอนไซม์



รูปที่ 2. 6 การเกิดพันธะเชื่อมข้ามไดไทโรซีนที่เร่งโดยเพอร์ออกซิเดสในขณะที่มีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ที่มา: Wong and Wessel (2008)



รูปที่ 2. 7 การเกิดพันธะไอโซเพปไทด์เอพซิลอน-(แกมมา-กลูตามิล)ไลซีนที่เร่งโดยทรานส์กลูตามิเนส

ที่มา: Wittaya (2012)

Mariniello et al. (2003) ศึกษาผลของทรานส์กลูตามิเนสต่อสมบัติของฟิล์ม

คอมพอสิตจากเพกทินและฟลาร์วัวร์ถั่วเหลือง ผู้วิจัยพบว่าฟิล์มที่เติมทรานส์กลูตามิเนสมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้น ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเอนไซม์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมเอนไซม์ทำให้ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างของพื้นผิวของฟิล์มเรียบเนียนมากขึ้น

Jiang et al. (2007) ศึกษาผลของทรานส์กลูตามิเนสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง โดยเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4-60 หน่วย/กรัมโปรตีน พบว่าการเติมทรานส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4-10 หน่วย/กรัมโปรตีน มีผลทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์ม

โปรตีนถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อความเข้มข้นของแทรนส์กลูทามิเนสสูง
กว่า 20 หน่วย/กรัมโปรตีน ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองกลับมีความต้านทานแรงดึงขาดลดต่ำลง ในด้านการ
ยึดตัวถึงจุดขาดพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของแทรนส์กลูทามิเนสเพิ่มขึ้น

Su et al. (2007) ศึกษาผลของการเติมแทรนส์กลูทามิเนสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน
3 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ฟิล์มคอมพอสิตของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและฟลาวาร์
ถั่วเหลือง และฟิล์มคอมพอสิตของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเวย์โปรตีน โดยแปรความเข้มข้นของ
แทรนส์กลูทามิเนสเป็น 0-20 หน่วย/กรัม พบว่าความเข้มข้นของแทรนส์กลูทามิเนสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้
ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนมีค่าสูงขึ้น



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ

Glycerol, food grade (บริษัท สยามแอ็บบิโอโซลูทเคมีคอล จำกัด, กรุงเทพฯ)

Powdered egg albumen, food grade (85.0% protein, wb) (EPS, Rovigo, Veneto, Italy)

3.1.2 สารเคมี

Hydrogen peroxide, 35%, AR grade (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)

Sodium hypochlorite, 5%, AR grade (Fisher Scientific, Leicestershire, UK)

Sodium periodate, AR grade (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)

3.2 อุปกรณ์

Chroma meter, model CR-400 (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan)

Confocal Raman spectrometer, model NTEGRA Spectra (NT-MDT Spectrum Instruments, Moscow, Russia)

Contact angle measuring instrument, model OCA15EC (Data Physics Instrument, Filderstadt, Germany)

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

Laboratory hot air oven, model 5200 (Kubota, Fujioka, Japan)

Platform shaker, Innova[®], model 2050 (New Brunswick Scientific, Edison, NJ, USA)

Scanning electron microscope, model JSM-IT300 (JEOL, Tokyo, Japan)

Thickness gauge, model 7301 (Mitutoyo, Tokyo, Japan)

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

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

Universal materials testing machine, model 5565 (Instron, Norwood, MA, USA)

Water bath, model SW23 (Julabolabortechnik, Seelbach, Germany)

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว

งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว โดยแปรชนิดของตัวออกซิไดส์เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมเพอร์ไอโอเดต (NaIO_4) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ซึ่งมีศักย์รีดักชันมาตรฐาน (standard reduction potential) และความแรงของการเป็นตัวออกซิไดส์ (strength of oxidizing agent) แสดงดังตารางที่ 3.1 แปรความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.02, 0.04 และ 0.06 โมลาร์

ตารางที่ 3. 1 ศักย์รีดักชันมาตรฐาน (E°) ของตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Reduction half-reaction	E° (V)	Strength of oxidizing agent
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.78	Stronger oxidizing agent
$\text{IO}_4^- + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{IO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	+1.60	
$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2 \text{OH}^-$	+0.89	Weaker oxidizing agent

สำหรับขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไข่ขาวดัดแปลงจากวิธีของ Gennadios et al. (1996a) เตรียมสารละลายของไข่ขาวผงทางการค้าเข้มข้น 9% โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น (พีเอช 7.0) ที่มีกลีเซอรอลเข้มข้น 50% โดยน้ำหนักของไข่ขาว โดยกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้โฮโมจีไนเซอร์ (รุ่น X10/25, Ystral, Ballrechten-Dottingen, Germany) ที่ความเร็ว 22,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที ให้ความร้อนแก่สารละลายไข่ขาวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้โปรตีนไข่ขาวเกิดการเสียสภาพธรรมชาติบางส่วน ทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงเติมตัวออกซิไดส์ตามปริมาณที่กำหนด นำสารละลายฟิล์มมาโฮโมจีไนส์ กำจัดฟองอากาศ แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยบีเบตต์สารละลายฟิล์มปริมาตร 20 มิลลิลิตร บรรจุลงในแม่พิมพ์สแตนเลสสตีลที่บุด้วยแผ่นพอลิเททราฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE) ขนาด 9.5 เซนติเมตร × 18 เซนติเมตร แล้วนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ตู้อบลมร้อน (รุ่น 5200, Kubota, Fujioka, Japan) จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออกและนำไปปรับสมดุล (equilibrate) ในภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติดังข้อที่ 3.3.1.1-3.3.1.9 เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมซึ่งได้แก่ฟิล์มไข่ขาวที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์ รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์



3.3.1.1 ความหนา

นำตัวอย่างฟิล์มมาตัดให้มีขนาด 3 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร วัดความหนาโดยใช้เครื่องมือวัดความหนา (รุ่น 7301, Mitutoyo, Tokyo, Japan) สุ่มวัดความหนาของตัวอย่างขึ้นละ 15 จุด นับเป็น 1 ซ้ำ

3.3.1.2 สมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติการดึง (tensile property) ของตัวอย่างฟิล์มด้วยเครื่อง universal materials testing machine (รุ่น 5565, Instron, Norwood, MA, USA) ใช้หัววัด pneumatic side-action grips ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 3 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ติดตั้งลงบนส่วนยึดจับ (grip) ทั้งสองด้าน โดยกำหนดระยะห่างของส่วนยึดจับเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ดึงตัวอย่างฟิล์มด้วยความเร็ว 5.0 มิลลิเมตร/วินาที จนกระทั่งแผ่นฟิล์มขาดออกจากกัน ได้ผลการวัดในรูปของแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน (หน่วยเป็นกรัม-แรง) และระยะทางที่สามารถดึงขึ้นตัวอย่างให้ยืดออกมาได้มากที่สุดก่อนที่จะขาดออกจากกัน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) คำนวณความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดโดยใช้สมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$\text{ความต้านทานแรงดึงขาด (เมกะพาสคาล)} = [F \times 0.009807 \times 10^6] / w d \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน (กรัม-แรง)

w คือ ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง (เมตร)

d คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (เมตร)

$$\text{การยืดตัวถึงจุดขาด (\%)} = L_f \times 100 / L_i \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ L_f คือ ระยะทางที่สามารถดึงขึ้นตัวอย่างให้ยืดออกมาได้มากที่สุดก่อนที่จะขาดออกจากกัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ความยาวของชั้นตัวอย่างระหว่างส่วนยึดจับก่อนดึง (มิลลิเมตร)

3.3.1.3 ความโปร่งใส (transparency)

ประเมินความโปร่งใสของตัวอย่างฟิล์มโดยดัดแปลงจากวิธีของ Tang et al. (2005) โดยแสดงความโปร่งใสในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน (%transmittance) ที่วัดที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ด้วย UV/Vis spectrophotometer (รุ่น V-530, Jasco, Easton, MD, USA) โดยตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 1 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร ติดตั้งแผ่นฟิล์มลงบนพื้นผิวด้านในของด้านที่แสงส่องผ่านด้านหนึ่งของคิวเวตต์ โดยใช้คิวเวตต์เปล่าบรรจุลงใน reference cell (ใช้อากาศเป็นแบล็ก) กำหนดให้แบล็กมีร้อยละของแสงส่องผ่านกับ 100

3.3.1.4 ค่าสี

วัดค่า L^* , a^* และ b^* ในระบบ CIELAB โดยใช้ chroma meter (รุ่น CR-400, Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมอง 10 องศา โดยสุ่มวัดสีของตัวอย่างชั้นละ 5 จุด นับเป็น 1 ซ้ำ และคำนวณมุมสี (hue angle) และความเข้มสี (chroma) ตามสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$\text{มุมสี (องศา)} = \arctan (b^*/a^*) \quad \dots(3.3)$$

$$\text{ความเข้มสี} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad \dots(3.4)$$

3.3.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability)

วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM (1999) นำซิลิกาที่อบแห้งแล้วปริมาณ 20 กรัม บรรจุลงในขวดแก้วทรงกระบอก ทากรีสบริเวณปากขวด จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มขนาด 6 เซนติเมตร x 6 เซนติเมตร วางปิดปากขวด รััดด้วยยางวงแหวน แล้วพันทับด้วยพาราฟิล์ม นำขวดที่ติดตั้งตัวอย่างฟิล์มแล้วไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปบรรจุไว้ในภาชนะปิดสนิทที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

กลั่น เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของขวดทดสอบทุก 2 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำโดยใช้สมการที่ (3.5)

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (มิลลิกรัม มิลลิเมตร/ตารางเมตร ชั่วโมง พาสคาล)} = W d/A t (P_2 - P_1) \dots(3.5)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของขวดทดสอบ (กรัม)

d คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์มที่ไอน้ำผ่านได้ (ตารางเมตร)

t คือ เวลาที่น้ำหนักของขวดทดสอบคงที่ (ชั่วโมง)

$P_2 - P_1$ คือ ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างสองด้านของแผ่นฟิล์ม (พาสคาล)

3.3.1.6 มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

วัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโดยใช้ contact angle measuring instrument (รุ่น OCA15CE, Data Physics Instruments, Filderstadt, Germany) โดยตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 2 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางบนแท่นวางตัวอย่าง หยดน้ำกลั่น 4 ไมโครลิตร บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม แล้ววัดมุมของหยดน้ำบนผิวหน้าแผ่นฟิล์ม วัดตัวอย่างละ 3 ชิ้น นับเป็น 1 ซ้ำ

3.3.1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility)

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำตามวิธีของ Perez-Gago and Krochta (2001) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร นำตัวอย่างฟิล์มไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น 5200, Kubota, Fujioka, Japan) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างฟิล์ม บรรจุตัวอย่างฟิล์มที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เขย่า

อย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องเย่า (รุ่น INNOVA 2050, New Brunswick Scientific, Edison, NJ) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำของผสมที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 4 ที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแล้ว ชะด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำกระดาษกรองและสิ่งที่ค้างอยู่บนกระดาษกรองไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักกระดาษกรองออกแล้วได้เป็นน้ำหนักของตัวอย่างฟิล์มหลังอบ คำนวณความสามารถในการละลายน้ำโดยใช้สมการที่ (3.6)

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ (\%)} = (W_i - W_f) \times 100/W_i \quad \dots(3.6)$$

เมื่อ W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างฟิล์มเริ่มต้น (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักของตัวอย่างฟิล์มหลังอบ (กรัม)

3.3.1.8 ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวาง

ศึกษาลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รุ่น JSM-5410LV, JEOL, Tokyo, Japan) โดยตัดแต่งฟิล์มให้มีความกว้าง 0.5 เซนติเมตร ตัดขวางตามความหนาของตัวอย่างฟิล์มด้วยใบมีดโกนเพื่อให้เกิดเป็นพื้นที่ภาคตัดขวาง จากนั้นติดตั้งตัวอย่างฟิล์มบนแท่งทองเหลืองโดยให้ด้านที่เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางอยู่ด้านบน นำไปฉายด้วยทองและศึกษาลักษณะโครงสร้างที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

3.3.1.9 การติดตามการเกิดพันธะไดซัลไฟด์โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

ติดตามการเกิดพันธะ S-S ด้วยคอนโฟคอลรามานสเปกโตรมิเตอร์ (รุ่น NTEGRA Spectra, NT-MDT Spectrum Instruments, Moscow, Russia) โดยใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (helium-neon laser or HeNe laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร ติดตามความเข้มสัญญาณ (Raman intensity) ในช่วงรามานชิฟท์ (Raman shift) เท่ากับ 100-6000 เซนติเมตร⁻¹ ใช้เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) กำลังขยาย 100 เท่า กำหนด acquisition time

เท่ากับ 60 วินาที (accumulation number เท่ากับ 6 และ exposure time เท่ากับ 10 วินาที) วัดตัวอย่างละ 2 จุด

3.3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มโซ่ขาว

คัดเลือกตัวอย่างฟิล์มโซ่ขาวจากข้อ 3.3.1 (โดยฟิล์มที่คัดเลือกมา ได้แก่ ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ เนื่องจากมีความง่ายในการขึ้นรูปและการที่ฟิล์มดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงขาดที่มีค่าปานกลางจึงมีศักยภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลได้อีก) มาเพื่อศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อน โดยแปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 40, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มมาวิเคราะห์สมบัติดังข้อที่ 3.3.1.1-3.3.1.9

3.3.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ทุกขั้นตอนของการทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test (Cochran and Cox, 1957)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว

สำหรับการศึกษาผลของการเติมตัวออกซิไดส์ต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว ในงานวิจัยนี้ได้แปรชนิดของตัวออกซิไดส์เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมเพอร์ไอโอเดต ($NaIO_4$) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaOCl$) ซึ่งมีความแรงของการเป็นตัวออกซิไดส์จากมากไปน้อยตามลำดับ และแปรความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.02, 0.04 และ 0.06 โมลาร์ โดยกำหนดให้ฟิล์มไข่ขาวที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์เป็นตัวอย่างควบคุม ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างฟิล์มมีดังนี้

4.1.1 ความหนา

ความหนาของตัวอย่างฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าฟิล์มไข่ขาวทุกตัวอย่างมีความหนาไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยมีความหนาอยู่ในช่วง 0.12-0.15 มิลลิเมตร ซึ่งความหนาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติด้านอื่นๆ ของฟิล์ม เช่น สมบัติเชิงกล ความโปร่งใส และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวได้ว่าหากฟิล์มมีสมบัติด้านใดด้านหนึ่งที่แตกต่างกัน ความแตกต่างนั้นไม่ได้เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์ม Mahmoud and Savello (1992) และ Galus et al. (2012) เสนอว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ได้แก่ ปริมาณของแข็ง เนื่องจากตัวอย่างฟิล์มที่ผลิตในงานวิจัยนี้มีปริมาณของแข็งที่ใกล้เคียงกัน ความหนาของตัวอย่างฟิล์มจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับรายงานของ Nuthong et al. (2009) ซึ่งพบว่าฟิล์มพลาสมาโปรตีนจากสุกรที่เติมตัวเชื่อมข้ามฟีนอลิก ซึ่งได้แก่ กรดแทนนิก กรดแคลเฟอิก และกรดเฟรูลิก เข้มข้น 1-3% โดยน้ำหนักของโปรตีน มีความหนาไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$)

ตารางที่ 4. 1 ความหนาของฟิล์มไขขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Thickness (mm) ^{ns}
Control	0	0.12 ± 0.02
H ₂ O ₂ -treated	0.02	0.13 ± 0.01
	0.04	0.12 ± 0.02
	0.06	0.13 ± 0.02
NaIO ₄ -treated	0.02	0.15 ± 0.01
	0.04	0.12 ± 0.02
	0.06	0.14 ± 0.02
NaOCl-treated	0.02	0.12 ± 0.02
	0.04	0.13 ± 0.03
	0.06	0.12 ± 0.02

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

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

นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ González et al. (2011) ซึ่งศึกษาผลของการเติมเจนิพิน (genipin) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมข้ามโปรตีนต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรความเข้มข้นของเจนิพินในช่วง 0-10% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่เติมเจนิพินมีความหนาไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเจนิพิน และความเข้มข้นของเจนิพินไม่มีผลต่อความหนาของตัวอย่างฟิล์ม ($p > 0.05$)

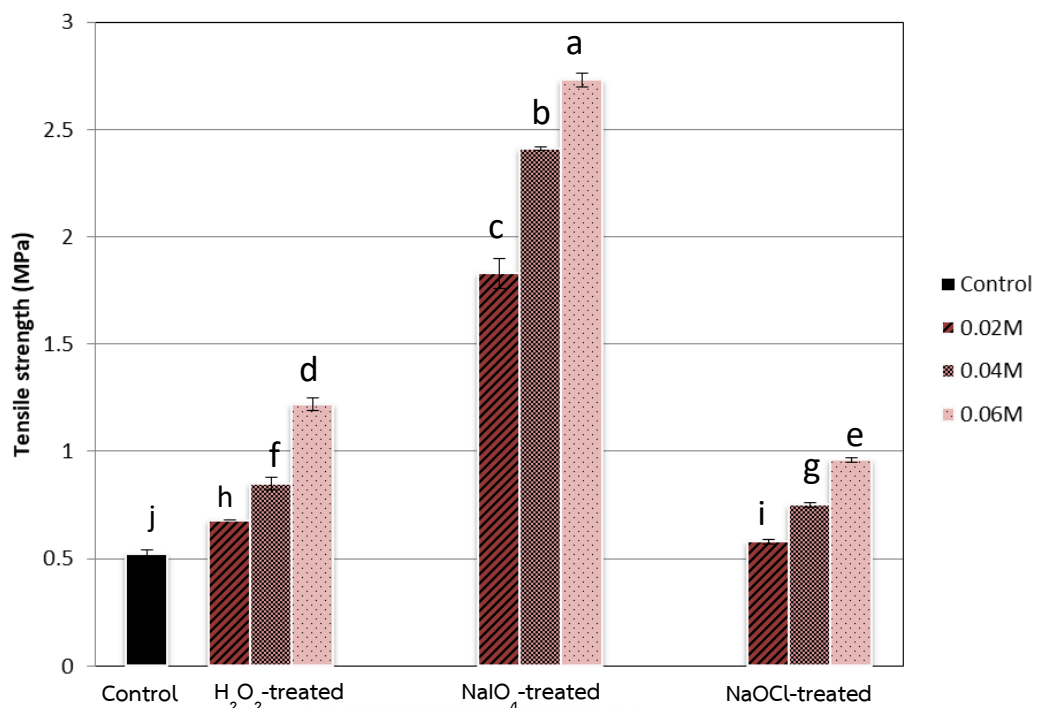
4.1.2 สมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มไขขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ โดยรายงานในรูปความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาด พบว่าชนิดและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มไขขาวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มไขขาวที่เติมตัวออกซิไดส์มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น ในระหว่างตัวออกซิไดส์ 3 ชนิด

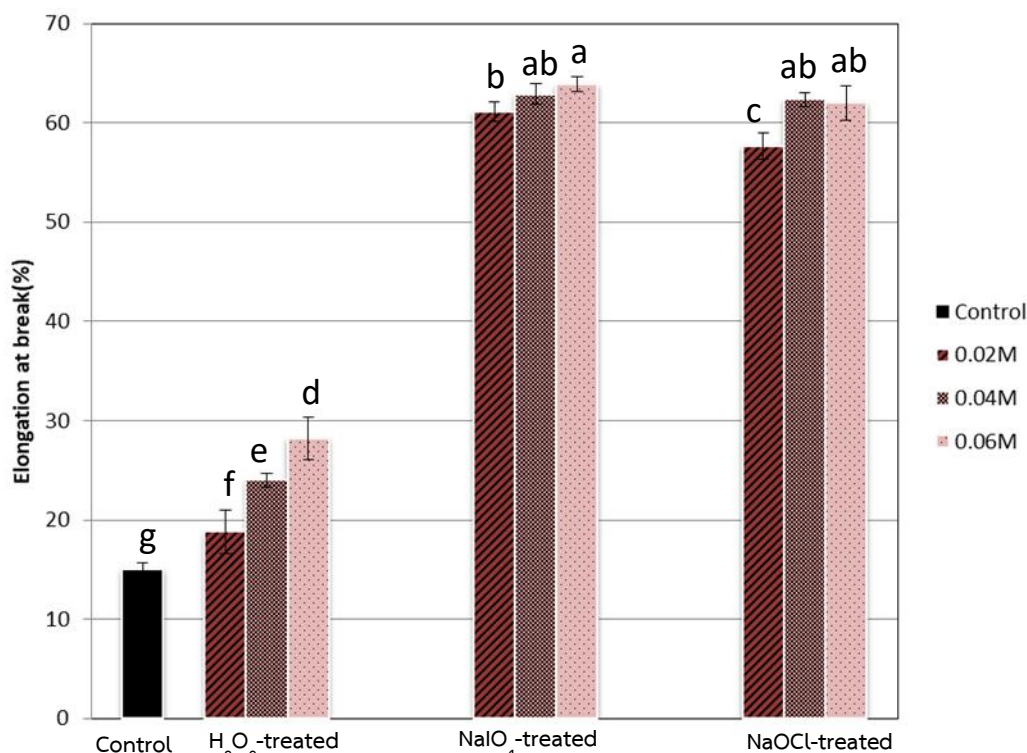
ที่ใช้ในการศึกษานี้ พบว่าโซเดียมเพอร์ไอโอเดตมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการปรับปรุงความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาว โดยฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.06 โมลาร์มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 2.73 เมกะพาสคาล และ 63.89% ซึ่งมีค่าเป็น 425% และ 326% ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ ในด้านความต้านทานแรงดึงขาดพบว่าฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีความต้านทานแรงดึงขาดรองลงมาซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ อย่างไรก็ตามในด้านการยึดตัวถึงจุดขาด พบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีการยึดตัวถึงจุดขาดใกล้เคียงกับฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดต โดยฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำที่สุดในบรรดาฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ซัลฟ์ไฮดริลอิสระในโปรตีนสามารถทำให้เกิดการเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่พบในกระบวนการทางชีววิทยาในธรรมชาติ ในบรรดาตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงที่สุด รองลงมาได้แก่โซเดียมเพอร์ไอโอเดต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ตามลำดับ การที่ฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตอาจเนื่องมาจากตัวออกซิไดส์ที่แรงเกินไปอาจก่อให้เกิดการแตกออกของพันธะเพปไทด์ในโปรตีน ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Hoque et al. (2011) ที่พบว่าฟิล์มเจลาตินจากหนังหมึกกระดองที่เติมตัวออกซิไดส์ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และเพนตันรีเอเจนต์ มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์ ($p \leq 0.05$) โดยความต้านทานแรงดึงขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น แต่หากความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์สูงมากเกินไปจะส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวพบว่าการยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์มีค่าต่ำกว่าหรือไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม

การที่ฟิล์มไข่ขาวที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีการยึดตัวถึงจุดขาดสูงแต่มีความต้านทานแรงดึงขาดต่ำอาจเนื่องมาจากโซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นตัวออกซิไดส์ที่ไม่แรงนัก จึงทำให้เกิดการเชื่อมข้ามโปรตีนในระดับต่ำ ในขณะที่ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงแต่กลับมีผลทำให้ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดไม่สูงมากนักและมีการยึดตัวถึงจุดขาดที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากในระบบเกิดปรากฏการณ์สองอย่างขึ้นพร้อมๆ กัน ได้แก่ การเชื่อมข้ามและดีเกรเดชันของสายพอลิเมอร์



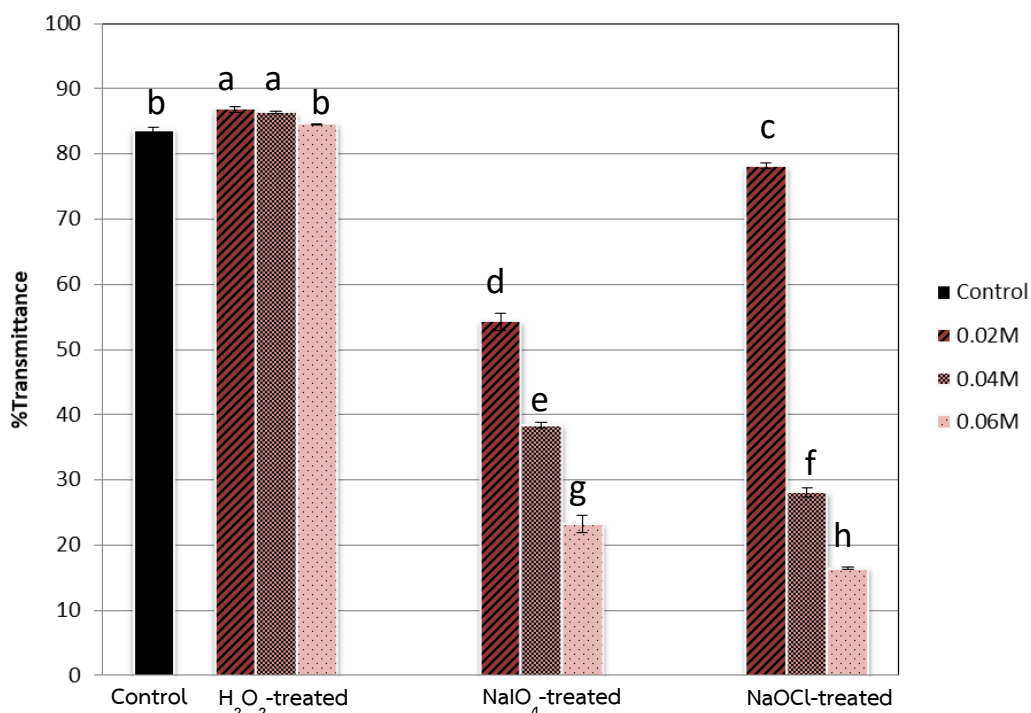
รูปที่ 4. 1 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4. 2 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.1.3 ความโปร่งใส

รูปที่ 4.3 แสดงความโปร่งใสของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่แสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน พบว่าฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีค่าร้อยละของแสงส่องผ่านใกล้เคียงหรือสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटและโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีค่าร้อยละของแสงส่องผ่านต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมมาก ($p \leq 0.05$) มีการรายงานก่อนหน้านี้ในฟิล์มโปรตีนที่เกิดการเชื่อมขวางว่าการที่ความโปร่งใสของฟิล์มโปรตีนลดต่ำลงอาจเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนที่เพิ่มขึ้น (Tang et al., 2005; González et al., 2011) นอกจากนี้การที่ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटและโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีสีที่เข้ม (ผลการทดลองจะรายงานต่อไปในหัวข้อ 4.1.4) จึงอาจทำให้ร้อยละของแสงส่องผ่านมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 4. 3 ความโปร่งใสแสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.1.4 ค่าสี

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ โดยทั่วไปพบว่าฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์มีความสว่าง (L^*) ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อย ในขณะที่ค่าสีแดง ($+a^*$) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดย L^* มีค่าลดลง และ $+a^*$ และ $+b^*$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटและโซเดียมไฮโปคลอไรต์ สำหรับมูมิ พบว่ามูมิของฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม โดยฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีมูมิอยู่ในช่วง 50-55 องศา ซึ่งอยู่ในช่วงสีส้ม (หมายเหตุ มูมิของสีแดงเท่ากับ 0 องศา และมูมิของสีเหลืองเท่ากับ 90 องศา) (McGuire, 1992) ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม (มูมิเท่ากับ 45 องศา) ในขณะที่ความเข้มสีของตัวอย่างที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ก็ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) และความเข้มสีของทั้งตัวอย่างควบคุมและฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ก็มีค่าต่ำมาก เมื่อดูด้วย

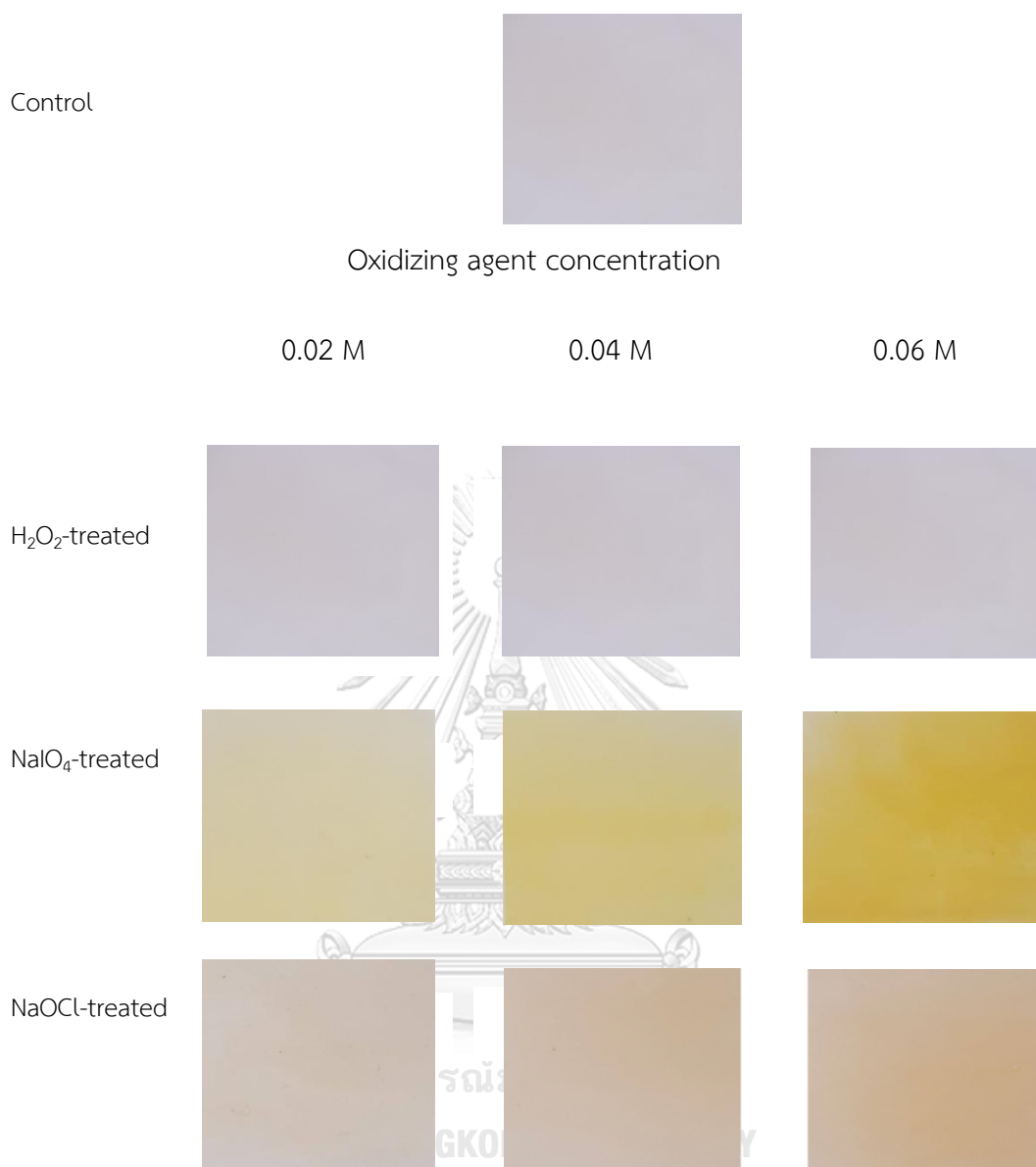
ตาเปล่าฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จึงมีสีที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม (รูปที่ 4.4) ต่างจากฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटซึ่งมีมุมสีในช่วง 81-89 องศา ซึ่งเข้าใกล้มุมสีของสีเหลือง ประกอบกับความเข้มสีที่สูง (ความเข้มสี 10-39) ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटจึงมีสีเหลืองเข้ม (รูปที่ 4.4) ส่วนฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีมุมสีในช่วง 59-71 องศา ซึ่งเป็นมุมสีของสีส้มเหลือง และมีความเข้มสีในช่วง 2-16 ฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์จึงมีสีส้มเหลืองแต่มีความเข้มสีไม่สูงเท่ากับฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेट (รูปที่ 4.4)

ตารางที่ 4. 2 ค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	L^*	a^*	b^*	Hue angle ($^{\circ}$)	Chroma
Control	-	90.14 \pm 0.36 ^a	0.93 \pm 0.19 ^d	1.01 \pm 0.54 ^s	44.53 \pm 11.99 ^d	1.39 \pm 0.52 ^s
H ₂ O ₂ -treated	0.02	90.64 \pm 0.37 ^a	0.99 \pm 0.03 ^d	1.44 \pm 0.36 ^s	54.72 \pm 6.69 ^e	1.76 \pm 0.30 ^s
	0.04	90.21 \pm 0.19 ^a	0.84 \pm 0.11 ^d	1.04 \pm 0.39 ^s	49.92 \pm 6.31 ^{de}	1.34 \pm 0.37 ^s
	0.06	89.51 \pm 0.47 ^b	0.87 \pm 0.04 ^d	1.15 \pm 0.11 ^s	52.93 \pm 1.37 ^{de}	1.44 \pm 0.11 ^s
NaIO ₄ -treated	0.02	89.05 \pm 0.17 ^b	1.44 \pm 0.05 ^f	9.57 \pm 0.39 ^e	81.42 \pm 0.10 ^f	9.68 \pm 0.39 ^e
	0.04	86.63 \pm 0.59 ^c	1.93 \pm 0.13 ^s	21.90 \pm 0.61 ^b	84.97 \pm 0.27 ^f	21.99 \pm 0.62 ^b
	0.06	82.23 \pm 0.10 ^e	0.63 \pm 0.35 ^e	38.68 \pm 0.09 ^a	89.07 \pm 0.05 ^a	38.69 \pm 0.80 ^a
NaOCl-treated	0.02	89.48 \pm 0.15 ^b	1.20 \pm 0.43 ^c	2.00 \pm 0.17 ^f	59.00 \pm 1.84 ^c	2.34 \pm 0.17 ^f
	0.04	84.67 \pm 0.22 ^d	3.89 \pm 0.96 ^b	11.60 \pm 0.31 ^d	71.45 \pm 0.27 ^b	12.23 \pm 0.32 ^d
	0.06	82.64 \pm 0.16 ^e	5.62 \pm 0.12 ^a	15.35 \pm 0.20 ^c	69.89 \pm 0.15 ^b	16.34 \pm 0.22 ^c

ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c,... ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

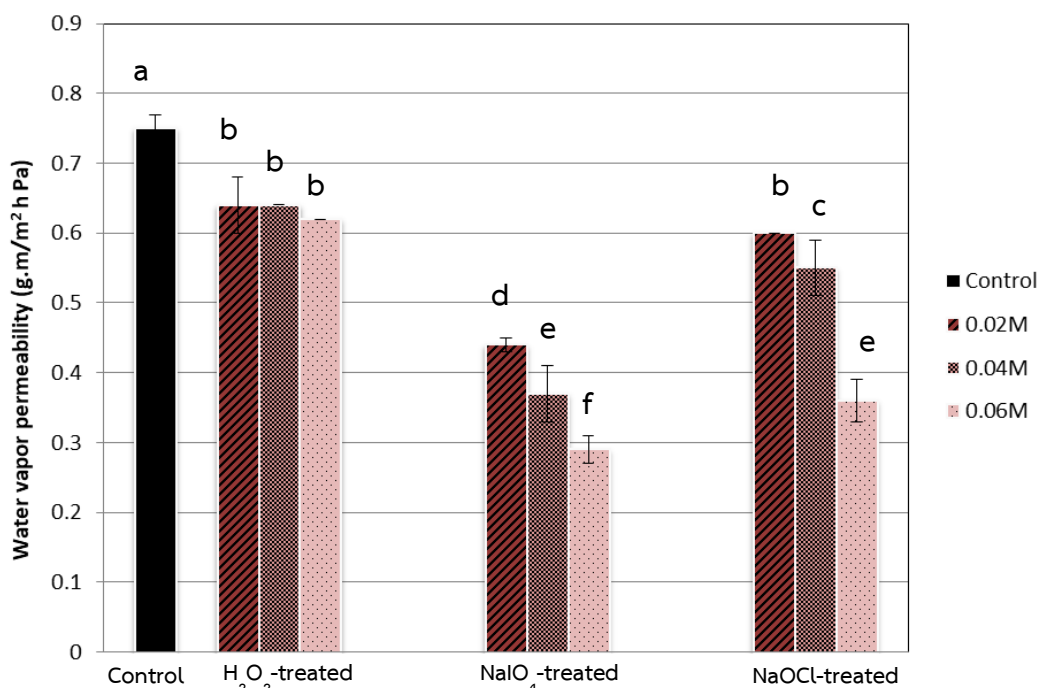


รูปที่ 4. 4 ลักษณะปรากฏของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าตัวอย่างฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์ ฟิล์มไข่ขาวที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेट มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์อื่นๆ การลดลงของสภาพ

ให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำในฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์นี้อาจเป็นผลมาจากการเชื่อมข้ามโปรตีนซึ่งทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของโปรตีนที่มีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 4. 5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ou et al. (2005) ซึ่งศึกษาผลของการเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยกรดเพอรูลิกในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง พบว่าฟิล์มที่เติมกรดเพอรูลิกที่ออกซิไดส์เข้มข้น 50 มิลลิกรัม/100 กรัม มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

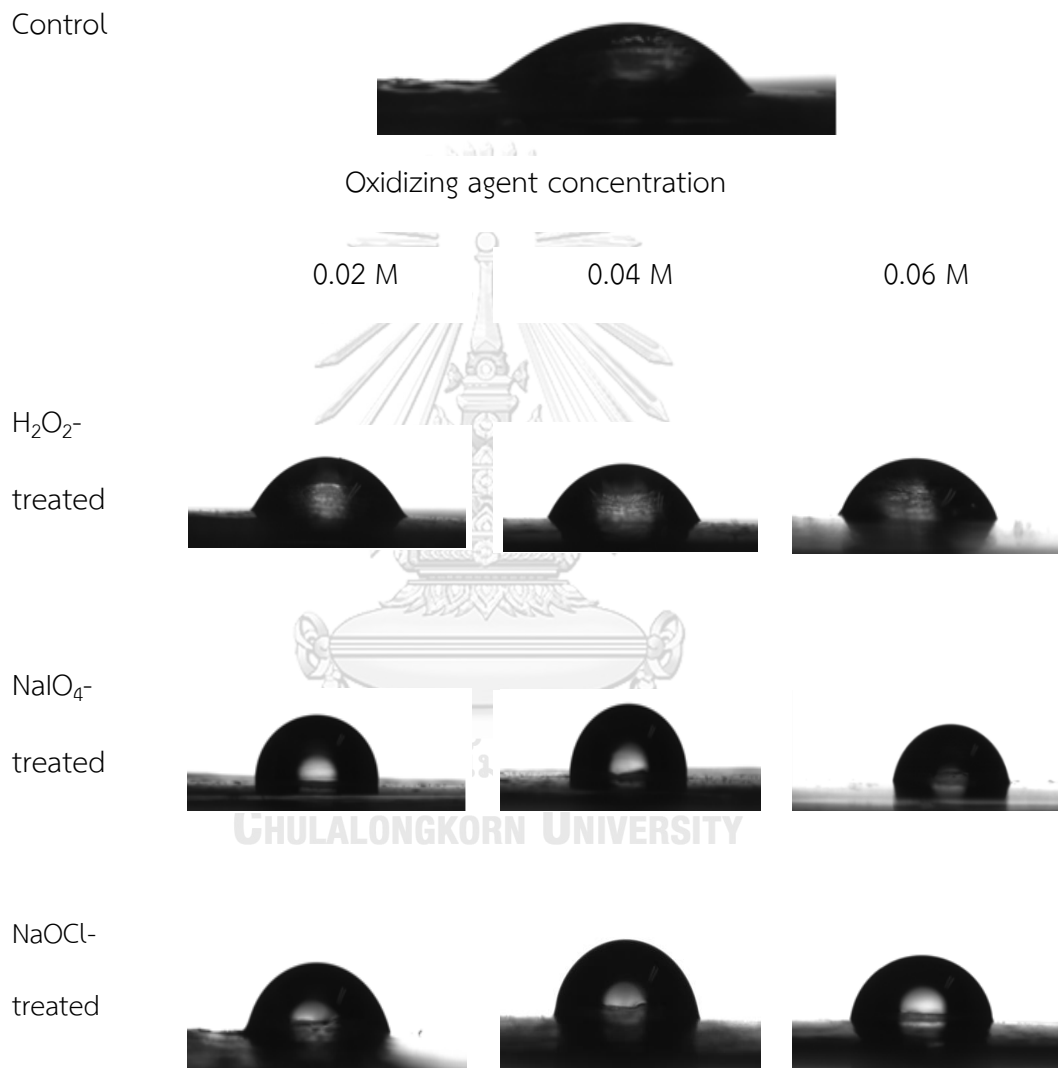
4.1.6 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มแสดงถึงสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilicity) หรือความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ของผิวฟิล์ม ในกรณีผิวฟิล์มที่ชอบน้ำ หยดน้ำจะสามารถแผ่ขยาย (spread) บนผิวฟิล์มได้ ทำให้มุมสัมผัสมีค่าต่ำ ในทางกลับกันหากผิวฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หยดน้ำจะไม่แผ่ขยายบนผิวฟิล์ม จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าสูง รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงรูปร่างของหยด

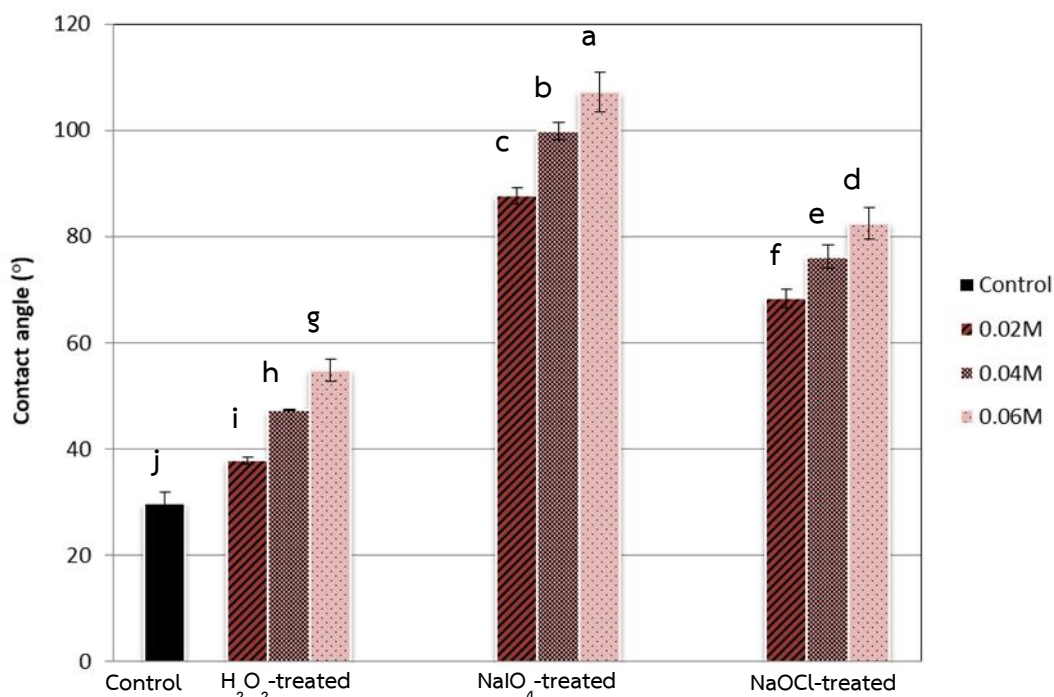
น้ำบนผิวฟิล์มและมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม จากงานวิจัยนี้พบว่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมุมสัมผัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าการเติมตัวออกซิไดส์ส่งผลให้ผิวของฟิล์มไข่ขาวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์ต่างกัน พบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตมีค่ามุมสัมผัสสูงกว่าตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) รองลงมาได้แก่ฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์และฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.04 และ 0.06 โมลาร์ มีมุมสัมผัสสูงกว่า 90 องศา ซึ่งจัดว่าฟิล์มดังกล่าวมีผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface)

Insaward et al. (2014) เสนอว่าการเชื่อมข้ามโปรตีนเป็นการลดปริมาณหมู่เคมีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับน้ำ ฟิล์มโปรตีนที่เกิดการเชื่อมข้ามจึงมีสมบัติความชอบน้ำลดลง โดยผู้วิจัยพบว่าการเชื่อมข้ามโปรตีนในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองด้วยกรดฟีนอลิกมีผลให้ผิวฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้นี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น Orliac et al. (2002) รายงานว่าการเติมแทนนินซึ่งเป็นตัวเชื่อมข้ามโปรตีนมีผลให้มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนเมล็ดดอกทานตะวันมีค่าเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เติมแทนนินมีมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มสูงถึง 51.2 องศา เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมแทนนินซึ่งมีมุมสัมผัสเท่ากับ 17.9 องศา ในทำนองเดียวกัน Ou et al. (2005) พบว่าการใช้กรดฟีนอลิกเชื่อมข้ามโปรตีนทำให้ผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Strauss and Gibson (2004) ศึกษาสมบัติของโคแอเซอร์เวต (coacervate) จากเจลาตินที่เติมสารประกอบฟีนอลิกเป็นตัวเชื่อมข้าม ผู้วิจัยศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของโคแอเซอร์เวตโดยเติมสีย้อมชนิดไม่ชอบน้ำ (hydrophobic dye) ซึ่งได้แก่ Sudan III ลงในสารแขวนลอยของโคแอเซอร์เวต พบว่าโคแอเซอร์เวตที่เติมสารประกอบฟีนอลิกสามารถดูดซับ Sudan III ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่ดูดซับ Sudan III ไว้ได้เลย

ผู้วิจัยจึงสรุปว่าการเชื่อมข้ามด้วยสารประกอบฟีนอลิกสามารถปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของ
โคแอเซอร์เวตจากเจลาตินได้



รูปที่ 4. 6 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มไขขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

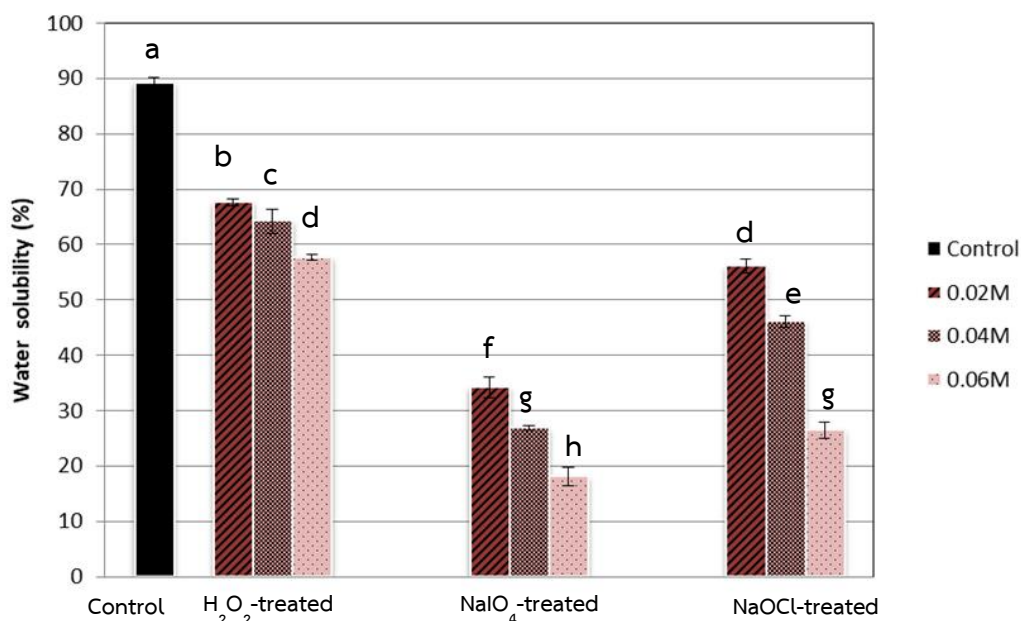


รูปที่ 4. 7 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโซ่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวอย่างฟิล์มโซ่ขาวแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าฟิล์มโซ่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์มีความสามารถในการละลายน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยความสามารถในการละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ต่างกัน พบว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์และฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ตามลำดับ ความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงนี้เนื่องมาจากการที่ตัวออกซิไดส์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับหมู่มีซิวของโปรตีน ทำให้ปริมาณของหมู่ที่ชอบน้ำลดลง ประกอบกับการเชื่อมข้ามทำให้โปรตีนมีน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นและมีโครงร่างที่หนาแน่นมากขึ้น (Rhim et al., 2000; Hoque et al., 2011) สำหรับการที่ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำลดลงไม่มากเท่าฟิล์มที่เติมตัวออกซิไดส์อื่น

อาจเนื่องมาจากการที่ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีความแรงของการเป็นตัวออกซิไดส์สูง ทำให้เกิดปรากฏการณ์สองอย่างซึ่งส่งผลตรงกันข้ามต่อความสามารถในการละลายน้ำ ได้แก่ การเชื่อมข้ามโปรตีนซึ่งทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง และดีเกรเดชันของโปรตีนซึ่งทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

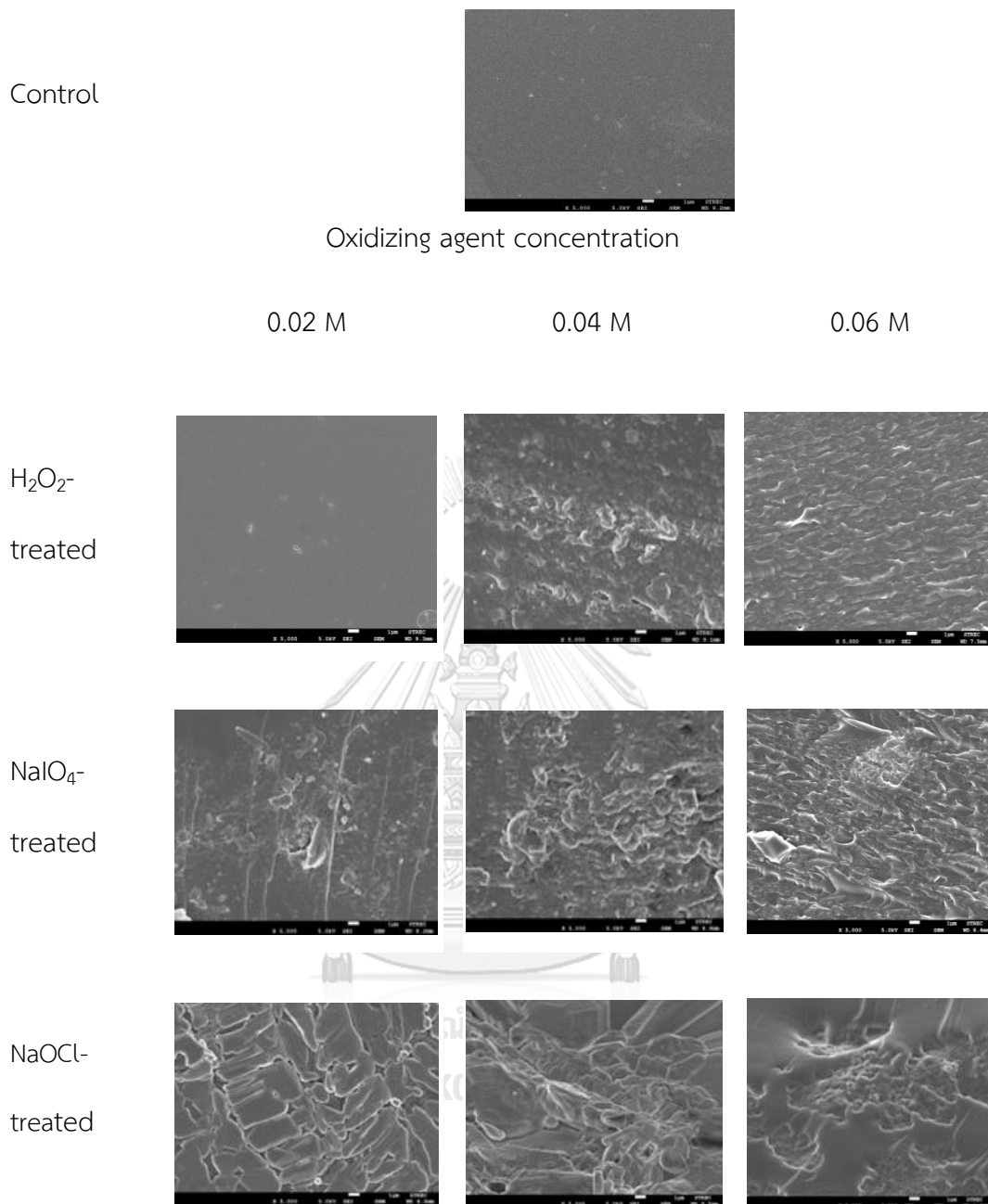


รูปที่ 4. 8 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

Hoque et al. (2011) ศึกษาสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากหมึกกระดองลายเสือ (*Sepia pharaonis*) ที่เชื่อมข้ามโปรตีนโดยเติมสารสกัดจากอบเชย โป๊ยกั๊ก และกานพลูที่ออกซิไดส์ และพบว่าฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมสารสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ González et al. (2011) ซึ่งศึกษาการเชื่อมข้ามในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองด้วยเงินพิน พบว่าการเติมเงินพินในปริมาณ 1% ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองลดลงได้ถึง 45% จากตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตามผู้วิจัยรายงานว่า การเติมเงินพินในปริมาณสูงกว่า 1% ไม่มีผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.1.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง

ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างภาคตัดขวางของฟิล์มโซลเจลที่เติมตัวออกซิไดส์มีความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยโครงสร้างภาคตัดขวางของฟิล์มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดेटและฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีความหนาแน่นสูงกว่าฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ความหนาแน่นของเมทริกซ์ฟิล์มที่เพิ่มขึ้นนี้น่าจะเป็นผลจากการเชื่อมข้ามของโปรตีนที่เหนียวนำโดยตัวออกซิไดส์ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Nuthong et al. (2009) ที่พบว่าฟิล์มโปรตีนพลาสมาจากสุกรที่เชื่อมข้ามโดยกรดแคลอริกที่ออกซิไดส์มีลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีการรวมตัวกันของโปรตีนมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมตัวเชื่อมข้าม นอกจากนี้ González et al. (2011) ยังรายงานในทำนองเดียวกันว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เชื่อมข้ามด้วยเงินพินมีการรวมตัวกันของโปรตีนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเงินพินเพิ่มขึ้น

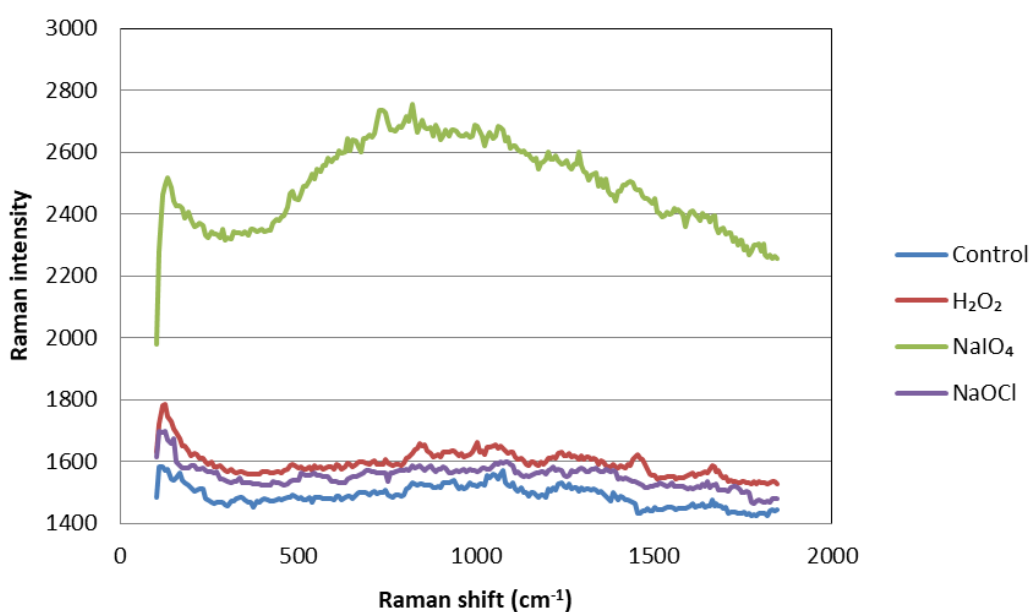


รูปที่ 4. 9 ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มไชนวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.1.9 การเกิดพันธะไดซัลไฟด์

เพื่อยืนยันการเกิดการเชื่อมข้ามโปรตีนในตัวอย่างฟิล์มด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ในงานวิจัยนี้จึงติดตามโดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีในช่วงการยืดของพันธะไดซัลไฟด์ (S-S stretching region) ซึ่งอยู่ที่ช่วงรามานชิฟท์ (Raman shift) ประมาณ $500 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ โดยตัวอย่าง

ฟิล์มที่เลือกมาศึกษา ได้แก่ ตัวอย่างควบคุม ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.06 โมลาร์ และฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของรามานสเปกโทรสโกปี พบว่าในช่วงรามานชิฟท์ประมาณ 500 เซนติเมตร⁻¹ ตัวอย่างที่เติมตัวออกซิไดส์มีการเพิ่มขึ้นของความเข้ม (intensity) จากตัวอย่างควบคุม โดยฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตมีความเข้มในช่วง 500 เซนติเมตร⁻¹ สูงสุด รองลงมา ได้แก่ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์



รูปที่ 4. 10 Raman spectrum ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์

4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว

สำหรับการศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มไข่ขาว ได้คัดเลือกตัวอย่างฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากข้อ 4.1 โดยฟิล์มที่คัดเลือกมาได้แก่ ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ เนื่องจากความง่ายในการขึ้นรูปมีสมบัติเชิงแสงที่ดีและการที่ฟิล์มดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงขาดที่มีค่าปานกลางจึงมีศักยภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลได้อีก ศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนโดยแปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 40, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาการบ่มเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง กำหนดให้ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์และไม่ผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นตัวอย่างควบคุม ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างฟิล์มโปรตีนไข่ขาวมีดังนี้

4.2.1 ความหนา

ความหนาของตัวอย่างฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยฟิล์มทุกตัวอย่างมีความหนาอยู่ในช่วง 0.12-0.14 มิลลิเมตร ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Kim et al. (2002) ซึ่งศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาในการบ่มไม่มีผลต่อความหนาอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ Hoque et al. (2010) ยังรายงานว่าฟิล์มเจลาตินจากหมึกกระดองที่บ่มที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีความหนาไม่แตกต่างกันและไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4. 3 ความหนาของฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Thickness (mm) ^{ns}
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	0.13 ± 0.02
Heat cured-films	40	24	0.12 ± 0.01
		48	0.13 ± 0.01
		72	0.12 ± 0.01
60	24	24	0.14 ± 0.01
		48	0.12 ± 0.02
		72	0.12 ± 0.01
70	24	24	0.13 ± 0.01
		48	0.13 ± 0.03
		72	0.13 ± 0.01
80	24	24	0.12 ± 0.02
		48	0.13 ± 0.02
		72	0.12 ± 0.02

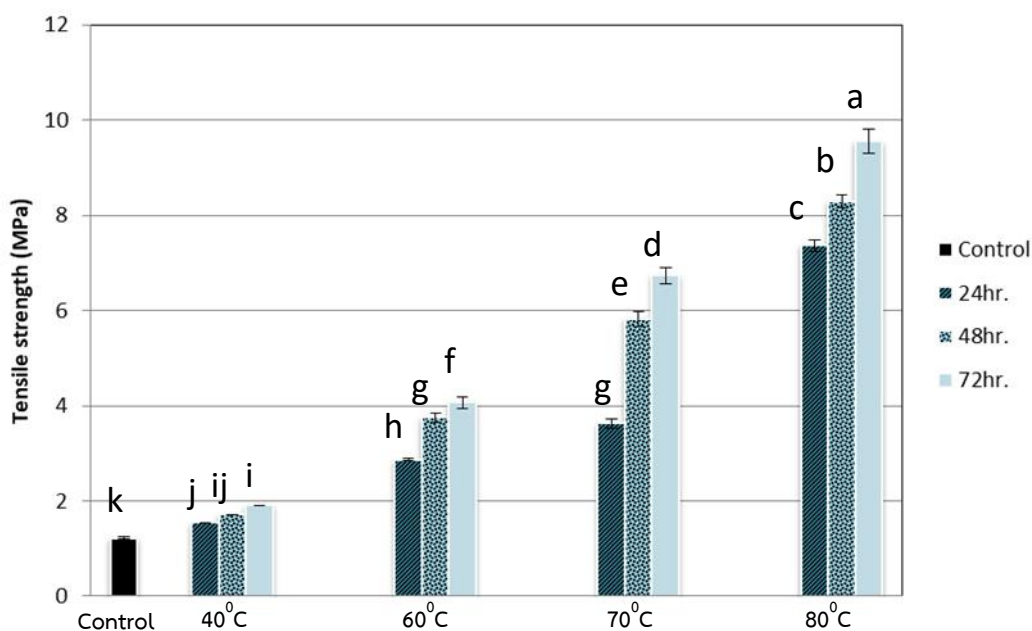
ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

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

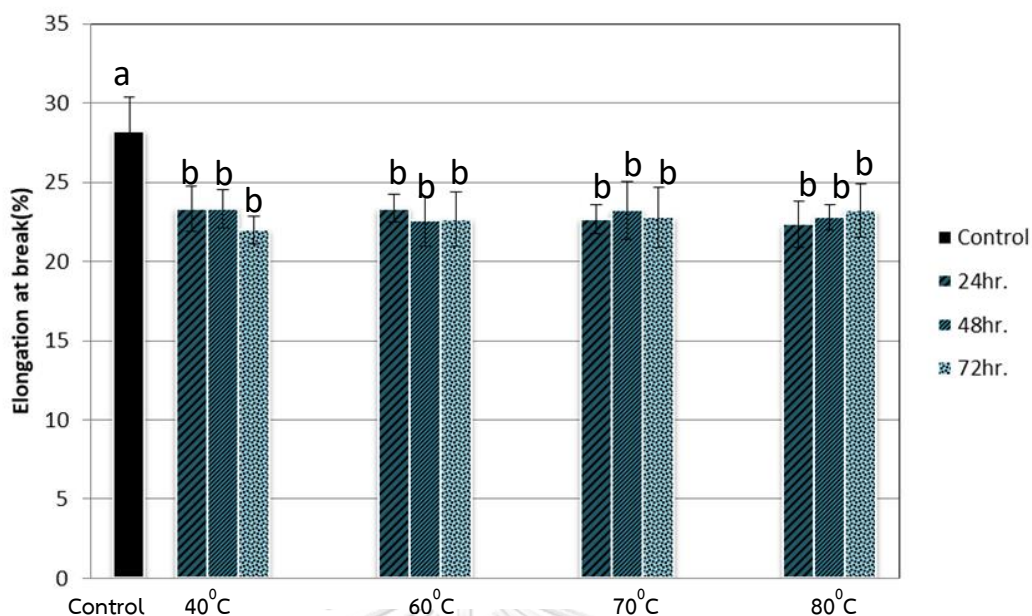
4.2.2 สมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อน พบว่าการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนมีต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนทุกตัวอย่างมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 9.55 เมกะพาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 683% Jensen (1959) เสนอว่าการให้ความร้อนแก่

โปรตีนส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไฮดรอกซิล-ไดซัลไฟด์ซึ่งสามารถเพิ่มการเชื่อมข้ามโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์เป็นพันธะโควาเลนต์จึงมีความแข็งแรงสูง โดยมีพลังงานของการสลายพันธะ (bond dissociation energy) สูงถึง 51 กิโลแคลอรี/โมล ซึ่งสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในการสลายอันตรกิริยาน้ำอ่อน-โควาเลนต์ เช่น พันธะไฮโดรเจนซึ่งมีค่าเพียง 1-5 กิโลแคลอรี/โมล (Freeman, 2000)



รูปที่ 4. 11 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4. 12 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ในแง่การยืดตัวถึงจุดขาด พบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนทุกตัวอย่างมีการยืดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนทุกตัวอย่างมีการยืดตัวถึงจุดขาดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) โดยฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีการยืดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 18.5% การที่ฟิล์มมีการยืดตัวถึงจุดขาดที่ลดลงอาจเนื่องมาจากการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ โดยพันธะไดซัลไฟด์มีความยาวพันธะประมาณ 2.05 อังสตรอม (205 พิโคเมตร) ซึ่งสั้นกว่าพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความยาวพันธะประมาณ 3.00 อังสตรอม (300 พิโคเมตร) (Iozzi et al., 2011) จึงทำให้ระยะระหว่างหมู่ที่เกิดอันตรกิริยาของโมเลกุลพอลิเมอร์มีค่าลดลง และส่งผลทำให้การยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง

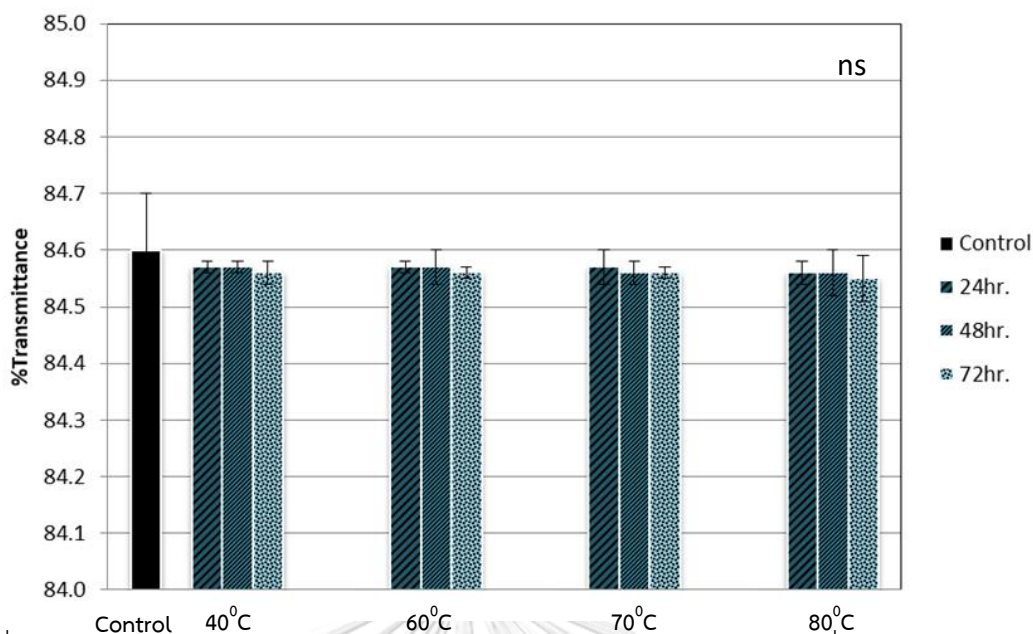
ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Gennadios et al. (1996) ซึ่งศึกษาการบ่มฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่อุณหภูมิ 80 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดที่สูงขึ้น ในอีกการศึกษาหนึ่ง Hernández-Muñoz et al. (2004b) ศึกษาผลของการบ่มฟิล์มไกลอะดินและกลูเตนินจากข้าวสาลี

โดย แปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 40, 55, 70, 85, 95 และ 115 องศาเซลเซียส และบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มโพรตีนข้าวสาลีทั้งสองชนิดมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ Kim et al (2002) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มต่อสมบัติของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลือง โดยบ่มตัวอย่างฟิล์มที่อุณหภูมิ 60, 72.5 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 60 และ 72.5 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ในแง่การยึดตัวถึงจุดขาด Gennadios et al. (1996) ศึกษาการบ่มฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่อุณหภูมิ 80 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง และพบว่า การบ่มด้วยความร้อนส่งผลให้ฟิล์มมีการยึดตัวถึงจุดขาดที่ลดลง นอกจากนี้ Hernández-Muñoz et al. (2004b) รายงานว่าการบ่มฟิล์มไกลอะดินและกลูเตนินจากข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 95 และ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ฟิล์มมีการยึดตัวถึงจุดขาดลดลง 90 และ 94% ตามลำดับเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

4.2.3 ความโปร่งใส

รูปที่ 4.13 แสดงความโปร่งใสของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อน โดยแสดงความโปร่งใสในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน พบว่าการบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนไม่มีผลต่อความโปร่งใสของตัวอย่างฟิล์ม ($p > 0.05$) แม้ว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีร้อยละของแสงส่องผ่านต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อยแต่ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยตัวอย่างฟิล์มทั้งหมดมีค่าแสงส่องผ่านประมาณ 85%



รูปที่ 4. 13 ความโปร่งใส (แสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน) ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

Garcia et al. (2005) ศึกษาการบ่มฟิล์มโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์และฟิล์มโปรตีนซาร์โคพลาสซึมจากปลาในสกุล Tilapia พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ฟิล์มโปรตีนที่ได้มีความทึบแสงมากขึ้น

4.2.4 ค่าสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

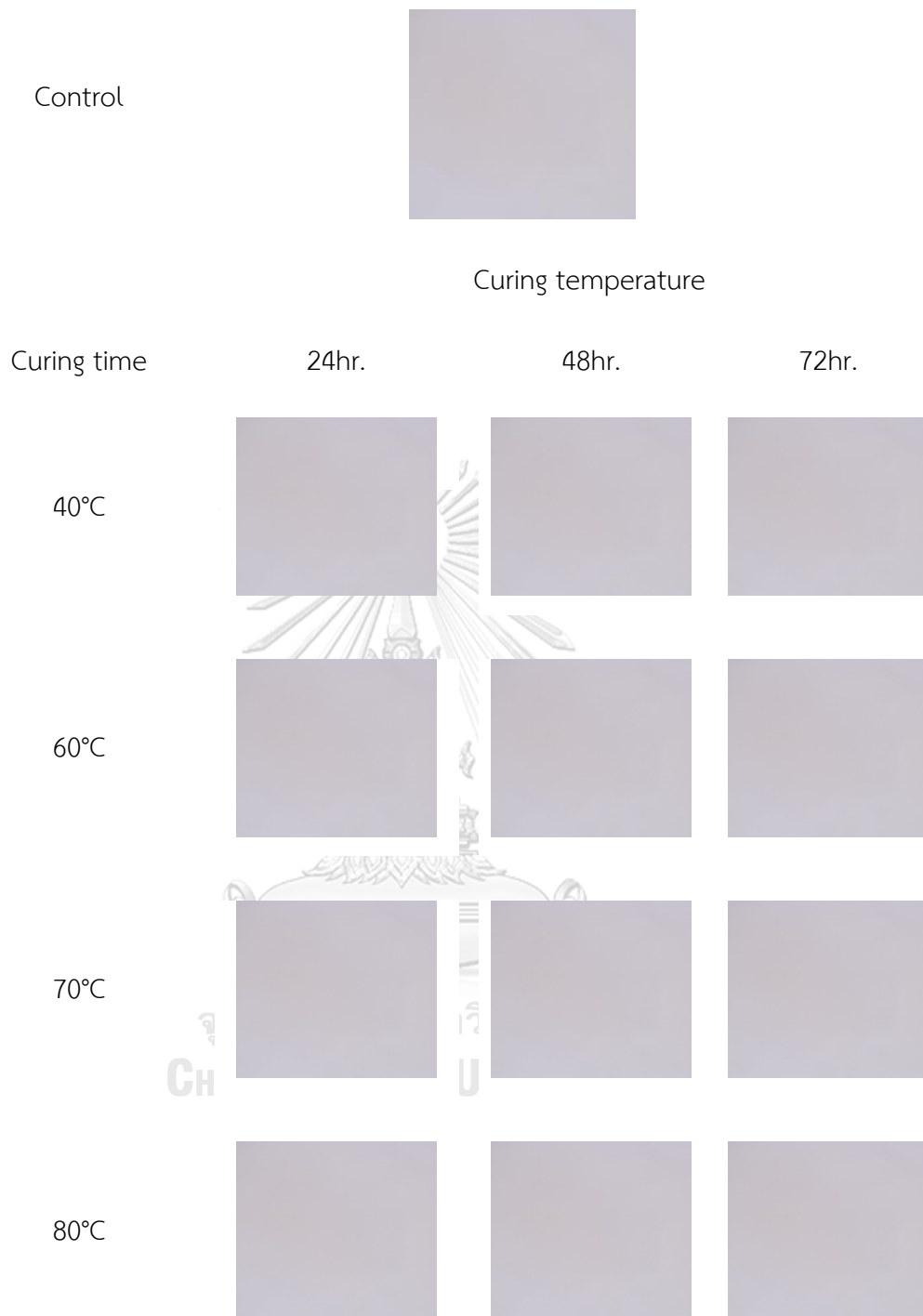
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสีของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ พบว่าความร้อนมีผลต่อค่าสีเพียงเล็กน้อย โดยพบว่าทุกตัวอย่างมีค่า L^* ประมาณ 89 ในขณะที่ a^* มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-1.4 และ b^* มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-2.5 สำหรับมุมสีมีค่าอยู่ในช่วง 17-84 องศา ซึ่งเป็นมุมสีของสีแดงส้มถึงเหลือง อย่างไรก็ตามเนื่องจากทุกตัวอย่างมีความเข้มสีต่ำมาก (0.6-2.9) เมื่อดูด้วยตาเปล่าทุกตัวอย่างจึงปรากฏเป็นสีเทาใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.14)

ตารางที่ 4. 4 ค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		L^*	a^*	b^*	Hue angle (°)	Chroma
	Temp (°C)	Time (hr)					
Control	-	-	89.51±0.47 ^{ab}	0.87±0.04 ^{cd}	1.15±0.11 ^d	52.93±1.36 ^{ef}	1.44±0.11 ^d
Heat-cured films	40	24	89.58 ±0.02 ^a	0.68 ±0.04 ^{de}	0.22 ± 0.12 ^c	17.50 ±8.09 ^d	0.73± 0.07 ^e
		48	89.54±0.11 ^a	1.45 ± 0.12 ^a	2.50 ± 0.28 ^e	59.86 ±0.91 ^f	2.89 ± 0.30 ^a
		72	89.55 ±0.07 ^a	0.65± 0.05 ^{ef}	0.27 ± 0.10 ^c	23.46 ±6.45 ^d	0.69 ± 0.08 ^e
	60	24	89.58 ±0.05 ^a	1.08 ± 0.29 ^b	1.04 ± 0.32 ^d	43.65 ±2.55 ^e	1.50 ±0.42 ^{cd}
		48	89.57 ±0.05 ^a	0.51 ± 0.03 ^{ef}	0.17±0.05 ^c	18.33 ±4.90 ^d	0.55 ± 0.04 ^e
		72	89.48±0.09 ^{abc}	1.39± 0.10 ^a	1.47 ± 0.14 ^d	46.56 ±1.03 ^e	2.02 ±0.17 ^{bc}
	70	24	89.56 ± 0.08 ^a	0.46 ± 0.04 ^f	0.59 ± 0.10 ^b	51.74 ±2.02 ^b	0.75 ± 0.10 ^e
		48	89.30±0.11 ^{abcd}	0.24 ± 0.04 ^g	2.50 ± 0.76 ^a	84.39 ±1.00 ^a	2.51 ±0.76 ^{ab}
		72	89.22 ± 0.15 ^{bcd}	0.89 ± 0.11 ^c	0.30 ±0.15 ^{bc}	19.22±10.50 ^c	0.96 ±0.07 ^{de}
	80	24	89.11±0.27 ^d	0.87 ±0.08 ^{cd}	0.44 ± 0.21 ^b	26.67±12.65 ^c	0.99 ±0.05 ^{de}
		48	89.11±0.05 ^d	0.55 ± 0.08 ^{ef}	2.00 ± 0.12 ^a	74.56 ±2.62 ^a	2.07 ±0.11 ^{bc}
		72	89.18 ±0.09 ^{cd}	0.21 ± 0.06 ^g	2.23 ± 0.69 ^a	83.99 ±2.94 ^a	2.24 ± 0.69 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c,... ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

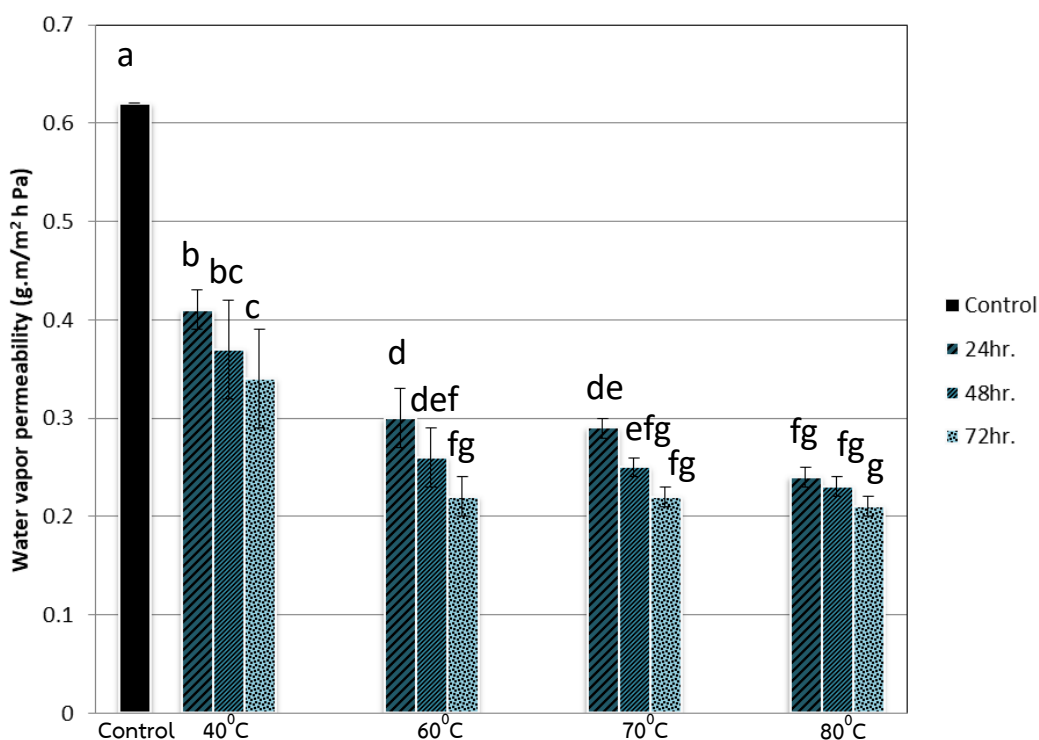


รูปที่ 4. 14 ลักษณะปรากฏของฟิล์มไซขาวที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

4.2.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

รูปที่ 4.15 แสดงสภาพให้ซึมผ่านได้ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ พบว่าการบ่มด้วยความร้อนทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Ali et al. (1997) ที่ศึกษาการบ่มฟิล์มกลูเตนที่อุณหภูมิ 65, 80 และ 95 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อบ่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ฟิล์มทุกตัวอย่างมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

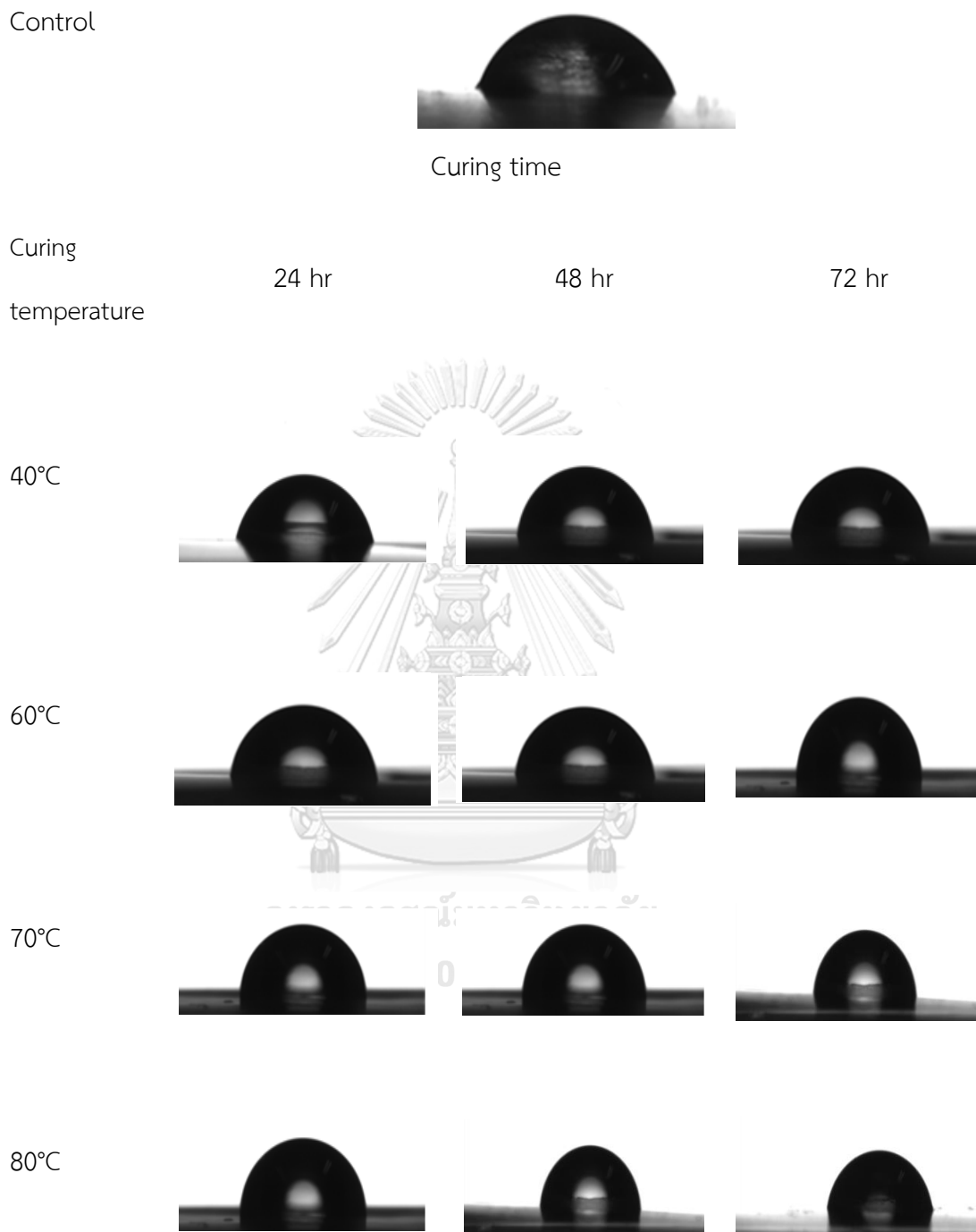


รูปที่ 4. 15 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

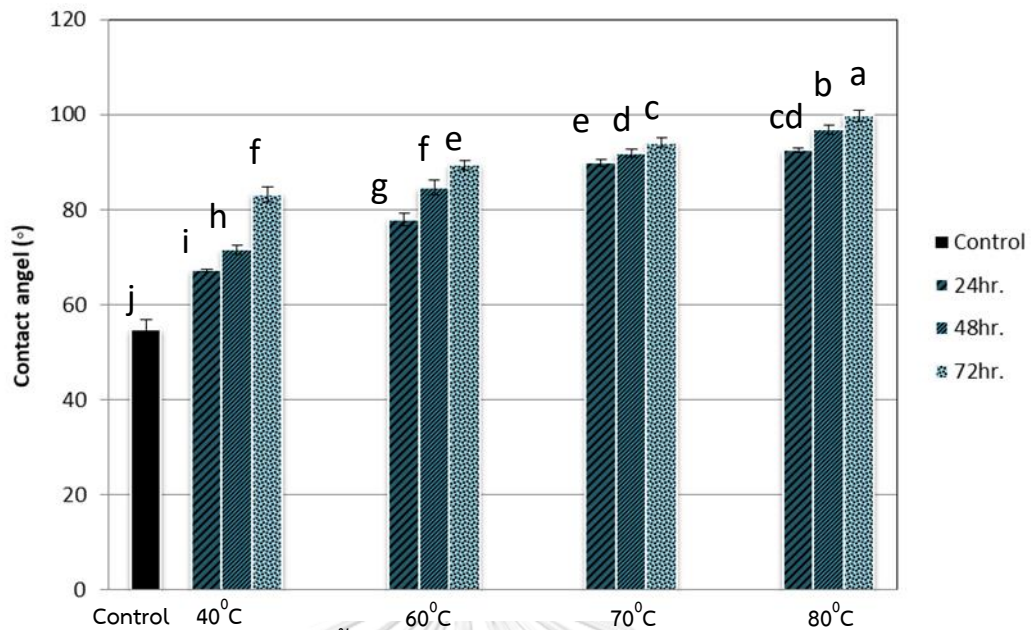
การที่การบ่มแผ่นฟิล์มทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนช่วยเร่งให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ไอน้ำจึงซึมผ่านได้ช้าลง (Gennadios et al. 1996)

4.2.6 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโซ่ยาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำของผิวสามารถจำแนกได้จากมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิว หากมุมมีค่าต่ำกว่า 90 องศา ผิวนั้นมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) หากมุมมีค่าสูงกว่า 90 องศา ผิวนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และหากมุมมีค่าสูงกว่า 150 องศา ผิวนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่ง (superhydrophobic) สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าตัวอย่างควบคุมมีมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มเท่ากับ 55 องศา หมายความว่าผิวของตัวอย่างควบคุมมีสมบัติชอบน้ำ ส่วนฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อน พบว่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มีมุมสัมผัสสูงกว่า 90 องศา ซึ่งจัดว่ามีผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ได้แก่ ตัวอย่างที่บ่มโดยใช้ภาวะดังนี้ 70 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง, 70 องศาเซลเซียส/72 ชั่วโมง, 80 องศาเซลเซียส/24 ชั่วโมง, 80 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส/72 ชั่วโมง การที่ผิวฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเชื่อมข้ามโปรตีนเป็นการลดปริมาณหมู่เคมีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับน้ำ ฟิล์มโปรตีนที่เกิดการเชื่อมข้ามจึงมีสมบัติความชอบน้ำลดลง (Insaward et al., 2014)



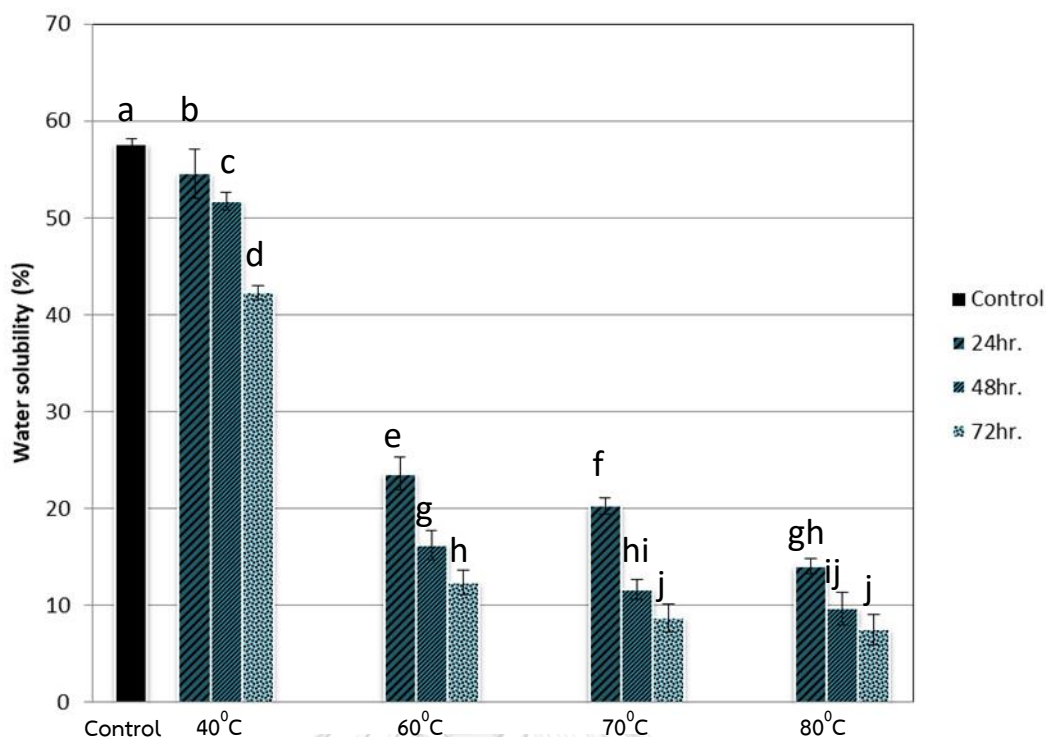
รูปที่ 4. 16 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มโซลเจลที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4. 17 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ

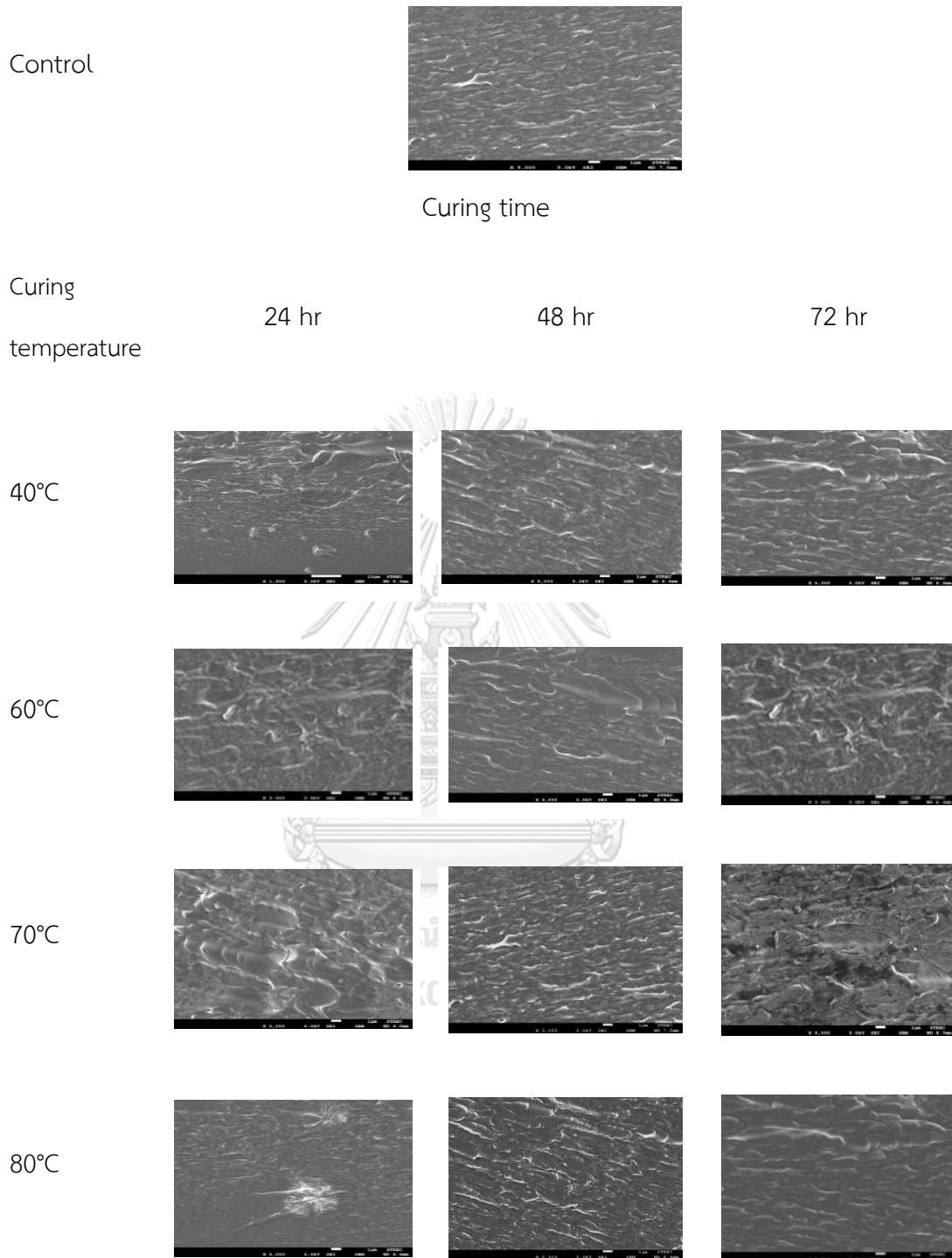
ความสามารถในการละลายน้ำของตัวอย่างฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.18 ฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง โดยฟิล์มที่บ่มที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 7.51% หรือละลายน้ำได้ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 87% ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gennadios et al. (1996) ที่รายงานว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่บ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4. 18 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.2.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง

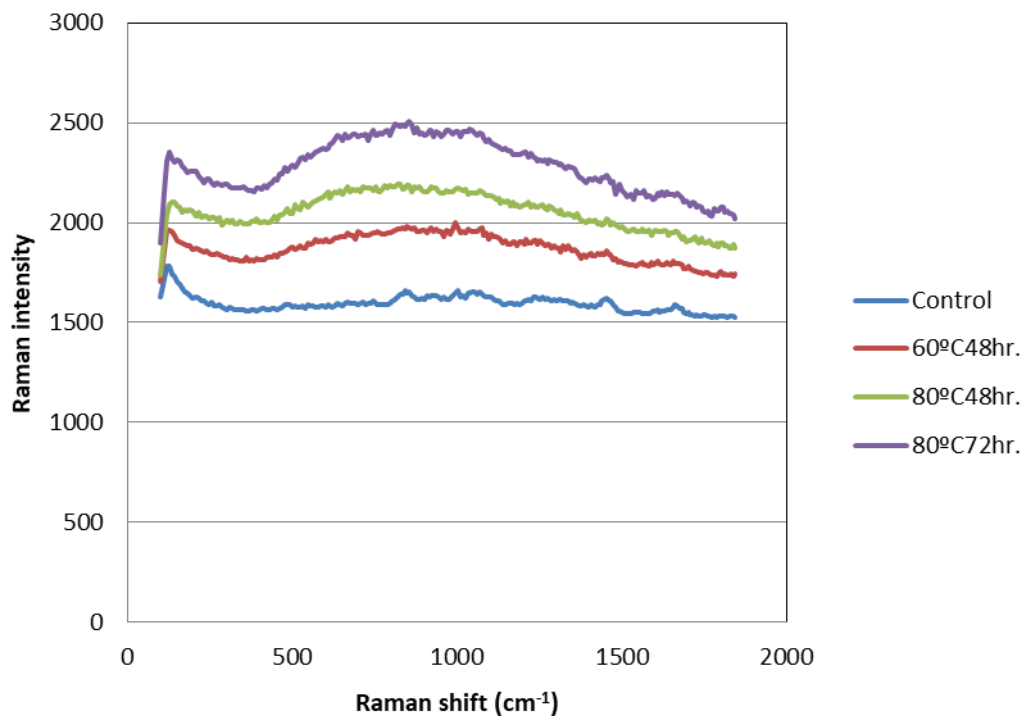
ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางของตัวอย่างฟิล์มที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีการรวมตัวกันของโปรตีนหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Wang et al.(2013) และ อัญญา อินสวาสดี และคณะ (2557) ที่รายงานการรวมตัวกันของโปรตีนทำให้เกิดเป็นเมทริกซ์ของฟิล์มที่หนาแน่นมากขึ้นในฟิล์มเวียโปรตีนที่บ่มด้วยความร้อน และในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่บ่มด้วยความร้อน ตามลำดับ



รูปที่ 4. 19 ลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.2.9 การเกิดพันธะไดซัลไฟด์

ในการทดลองนี้ได้ใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเพื่อยืนยันการเกิดการเชื่อมข้ามโปรตีนในตัวอย่างฟิล์มด้วยพันธะไดซัลไฟด์ โดยตัวอย่างฟิล์มที่เลือกมาศึกษา ได้แก่ ตัวอย่างควบคุมที่ไม่บ่มด้วยความร้อน และตัวอย่างฟิล์มที่บ่มที่ภาวะดังต่อไปนี้ 60 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง, 80 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส/72 ชั่วโมง (รูปที่ 4.20) พบว่าในช่วงรามานชิฟท์ประมาณ 500 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นช่วงการยืดของพันธะไดซัลไฟด์ ความเข้มรามานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและ/หรือระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้ยืนยันการเกิดพันธะไดซัลไฟด์



รูปที่ 4. 20 Raman spectrum ของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่า การเติมตัวออกซิไดส์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโซเดียมโพรตีนที่มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโพรตีนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์ ในระหว่างตัวออกซิไดส์ที่ใช้ในการศึกษา พบว่าโซเดียมเพอร์ไอโอเดตมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโซเดียมโพรตีน โดยฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.06 โมลาร์มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 2.73 เมกะพาสคาล และการยึดตัวถึงจุดขาดเท่ากับ 63.89% ซึ่งมีค่าเป็น 425% และ 326% ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ สำหรับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์แม้ว่าจะเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงกว่าโซเดียมเพอร์ไอโอเดต แต่ฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์กลับมีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดต ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารที่มีความแรงของการเป็นตัวออกซิไดส์สูงนอกจากจะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโพรตีนแล้ว ยังอาจทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเพปไทด์ด้วย ส่วนโซเดียมไฮโปคลอไรต์ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่มีความแรงต่ำสุดมีผลทำให้ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดต่ำกว่าฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดต และฟิล์มที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แต่มีการยึดตัวถึงจุดขาดใกล้เคียงกับฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดต ความสามารถในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของตัวออกซิไดส์เป็นผลมาจากความสามารถในการออกซิไดส์หมู่ซัลฟ์ไฮดริลในโพรตีนเกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามโพรตีน ซึ่งยืนยันได้จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในช่วงการยึดของพันธะไดซัลไฟด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมตัวออกซิไดส์ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของฟิล์มโซเดียมโพรตีน โดยทำให้ฟิล์มมีความโปร่งใสลดลงและมีสีเข้มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตและฟิล์มที่เติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ โดยทั่วไปพบว่าการเติมตัวออกซิไดส์ทำให้ฟิล์มมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำและความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มลดลง และทำให้ผิวฟิล์มมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดย

ฟิล์มที่เติมโซเดียมเพอร์ไอโอเดตเข้มข้น 0.04 และ 0.06 โมลาร์ มีมุมสัมผัสสูงกว่า 90 องศา ซึ่งจัดว่าฟิล์มดังกล่าวมีผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ

สำหรับการศึกษาผลของการบ่มแผ่นฟิล์มโซเดียมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 40, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าการบ่มด้วยความร้อนทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มที่บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 9.55 เมกะพาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่บ่มด้วยความร้อนถึง 683% ในส่วนของการยึดตัวถึงจุดขาด พบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ในช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มที่ศึกษา ฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนที่ได้มีการยึดตัวถึงจุดขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สาเหตุที่การบ่มด้วยความร้อนสามารถปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโซเดียมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ได้เป็นผลมาจากการเกิดพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามโพรตีน ซึ่งยืนยันได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในช่วงการยึดของพันธะไดซัลไฟด์ ในด้านสมบัติเชิงแสงพบว่าการบ่มแผ่นฟิล์มโซเดียมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ด้วยความร้อนไม่มีผลต่อความโปร่งใส ($p > 0.05$) และมีผลน้อยต่อสีของฟิล์มเนื่องจากตัวอย่างฟิล์มที่ได้มีความเข้มข้นต่ำมากซึ่งทำให้ฟิล์มทุกตัวอย่างปรากฏเป็นสีเทาเมื่อดูด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มด้วยความร้อนทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำและความสามารถในการละลายน้ำลดลง และทำให้ผิวฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยการบ่มแผ่นฟิล์มที่ภาวะรุนแรง (ได้แก่ 70 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง, 70 องศาเซลเซียส/72 ชั่วโมง, 80 องศาเซลเซียส/24 ชั่วโมง, 80 องศาเซลเซียส/48 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส/72 ชั่วโมง) ทำให้มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มมีค่าสูงกว่า 90 องศา ซึ่งทำให้ผิวฟิล์มดังกล่าวมีสมบัติไม่ชอบน้ำ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- นลินทิพย์ คงแก้ว. (2554). ผลของลิกนินและการบ่มด้วยความร้อนต่อสมบัติของฟิล์มอิมัลชันโปรตีนถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชญา อินสวาสดี. (2557). การเตรียมฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดโดยใช้กรดฟีนอลิกและการบ่ม, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Agoston, V., Cemazar, M., Kajan, L., & Pongor, S. (2005). Graph-representation of oxidative folding pathways. *BMC Bioinformatics*, 6, 19.
- Ahmadi, R., Kalbasi-Ashtari, A., Oromiehie, A., Yarmand, M.-S., & Jahandideh, F. (2012). Development and characterization of a novel biodegradable edible film obtained from psyllium seed (*Plantago ovata* Forsk). *Journal of Food Engineering*, 109(4), 745-751.
- Ali, Y., Ghorpade, V. M., & Hanna, M. A. (1997). Properties of thermally-treated wheat gluten films. *Industrial Crops and Products*, 6(2), 177-184.
- Anonymous. (2005). Easy to find easy to buy? , Available Source: <http://www.duckeggs.com/duckegg-nutrition-compare.htm>, September 28.
- ASTM. (1999). Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Banker, G. S. (1966). Film Coating Theory and Practice. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 55(1), 81-89.
- Bourtoom, T., & Chinnan, M. S. (2009). Improvement of Water Barrier Property of Rice Starch-chitosan Composite Film Incorporated with Lipids. *Food Science and Technology International*, 15(2), 149-158.
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1957). Experimental designs.
- Damodaran, S. (1996). Amino acids, Peptides, and Proteins, pp. 328. In O.R. Fennema, M. Karel, G.W. Sanderson, S.R. Tannenbaum, P. Walstra and J.R. Whitaker, eds. *Food Chemistry*, 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Dias, A. B., Müller, C. M. O., Larotonda, F. D. S., & Laurindo, J. B. (2010). Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *Journal of Cereal Science*, 51(2), 213-219.
- Fernandes, P. A., & Ramos, M. J. (2004). Theoretical Insights into the Mechanism for Thiol/Disulfide Exchange. *Chemistry – A European Journal*, 10(1), 257-266.
- Fernández, L., Díaz de Apodaca, E., Cebrian, M., Villarán, M., & I. Maté, J. (2007). *Effect of the unsaturation degree and concentration of fatty acids on the properties of WPI-based edible films* (Vol. 224).
- Fujimori, E. (1965). Ultraviolet light-induced change in collagen macromolecules. *Biopolymers*, 3(2), 115-119.
- Galiotta, G., Di Gioia, L., Guilbert, S., & 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.
- Galus, S., Mathieu, H., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2012). Effect of modified starch or maltodextrin incorporation on the barrier and mechanical properties, moisture sensitivity and appearance of soy protein isolate-based edible films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 148-154.
- García, F. T., & Sobral, P. J. d. A. (2005). Effect of the thermal treatment of the filmogenic solution on the mechanical properties, color and opacity of films based on muscle proteins of two varieties of Tilapia. *LWT - Food Science and Technology*, 38(3), 289-296.
- Genadios, A., Weller, C. L., Hanna, M. A., & Froning, G. W. (1996a). Mechanical and Barrier Properties of Egg Albumen Films. *Journal of Food Science*, 61(3), 585-589.
- Gennadios A., M. Ghorpade V., L. Weller C., & A. Hanna M. (1996b). Heat Curing of Soy Protein Films. *Transactions of the ASAE*, 39(2), 575.
- Ghanbarzadeh, B., Musavi, M., Oromiehie, A. R., Rezayi, K., Rad, E. R., & Milanib, J. (2007). Effect of plasticizing sugars on water vapor permeability, surface energy and microstructure properties of zein films. *LWT - Food Science and Technology*, 40(7), 1191-1197.

- Ghanbarzadeh, B., & Oromiehi, A. R. (2008). Biodegradable biocomposite films based on whey protein and zein: Barrier, mechanical properties and AFM analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 43(2), 209-215.
- Gontard Nathalie., Duchez Christophe., CuqU Jean-Louis., & Guilbert Stéphane. (1994). Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 29(1), 39-50.
- González, A., Strumia, M. C., & Alvarez Igarzabal, C. I. (2011). Cross-linked soy protein as material for biodegradable films: Synthesis, characterization and biodegradation. *Journal of Food Engineering*, 106(4), 331-338.
- Gossett, P. W., Rizvi, S. S. H., & Banker, R. C. (1984). Quantitative analysis of gelation in egg proteins systems. *Food Technol.* 38(5), 67-74, 96.
- Ha, C. R., & Luchi, I. (2003). Transglutaminase. In J. R. Whitaker, A. G. J. Voragen and D. W. S. Wong (Eds.) *Handbook of Food Enzymology* (pp.367-655). New York, NY: Marcel Dekke.
- Han, J. H., Seo, G. H., Park, I. M., Kim, G. N., & Lee, D. S. (2006). Physical and mechanical properties of pea starch edible films containing beeswax emulsions. *Journal of Food Science* 71, E290-E296.
- Harper, B. A., Barbut, S., Lim, L. T., & Marcone, M. F. (2013). Characterization of 'wet' alginate and composite films containing gelatin, whey or soy protein. *Food Research International*, 52(2), 452-459.
- Hernández-Muñoz, P., Villalobos, R., & Chiralt, A. (2004a). Effect of thermal treatments on functional properties of edible films made from wheat gluten fractions. *Food Hydrocolloids*, 18(4), 647-654.
- Hernández-Muñoz, P., Villalobos, R., & Chiralt, A. (2004b). Effect of cross-linking using aldehydes on properties of glutenin-rich films. *Food Hydrocolloids*, 18(3), 403-411.
- Hoque, M. S., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2010). Effect of heat treatment of film-forming solution on the properties of film from cuttlefish (*Sepia pharaonis*) skin gelatin. *Journal of Food Engineering*, 96(1), 66-73.

- Hoque, M. S., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2011). Properties of film from cuttlefish (*Sepia pharaonis*) skin gelatin incorporated with cinnamon, clove and star anise extracts. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1085-1097.
- Insaward, A., Duangmal, K., & Mahawanich, T. (2014a). Effects of Heat Curing on Properties of Soy Protein Film Incorporated with Gallic acid. *Agricultural Sci. J.* 45(2)(Suppl.), 25-28.
- Insaward, A., Duangmal, K., & Mahawanich, T. (2014b). Mechanical, Optical, and Barrier Properties of Soy Protein Film As Affected by Phenolic Acid Addition. *J Agric Food Chem*, 63(43), 9421-9426.
- lozzi, M., Helgaker, T., & Uggerud, E. (2011). *Influence of External Force on Properties and Reactivity of Disulfide Bonds* (Vol. 115).
- Jangchud, A., & Chinnan, M. S. (1999). Properties of Peanut Protein Film: Sorption Isotherm and Plasticizer Effect. *LWT - Food Science and Technology*, 32(2), 89-94.
- Jensen, E. V. (1959). Thiol-disulfide interchang. *Science*, 130: 1319-1323.
- Jiang, Y., Tang, C.-H., Wen, Q.-B., Li, L., & Yang, X.-Q. (2007). Effect of processing parameters on the properties of transglutaminase-treated soy protein isolate films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(2), 218-225.
- Kamper, S. L., and O. N. Fennema. (1984). Water Vapor Permeability of an Edible, Fatty Acid, Bilayer Film. *Journal of Food Science*, 49(6), 1482-1485.
- Kanatt, S. R., Rao, M. S., Chawla, S. P., & Sharma, A. (2012). Active chitosan-polyvinyl alcohol films with natural extracts. *Food Hydrocolloids*, 29(2), 290-297.
- Kester, J. J., & Fennema, O. R. (1986). Edible films and coating: Review. *Food Technol.* 40(12):47-59.
- Kiernan, J. A. (2000). Formaldehyde, Formalin, Paraformaldehyde And Glutaraldehyde: What They Are And What They Do. *Microscopy Today*, 8(1), 8-13.
- Kim, K. M., Weller, C. L., Hanna, M. A., & Gennadios, A. (2002). Heat Curing of Soy Protein Films at Selected Temperatures and Pressures. *LWT - Food Science and Technology*, 35(2), 140-145.

- Kokoszka, S., Debeaufort, F., Lenart, A., & Voilley, A. (2010). Liquid and vapour water transfer through whey protein/lipid emulsion films. *J Sci Food Agric*, *90*(10), 1673-1680.
- Krochta, J. M. (2002). *Proteins as raw materials for films and coatings: definitions, current status and opportunity*.
- Kunte, L. A., A. Gennadios, S. L. Cuppet, M. A. Hanna, and C. L. Weller. (1997). Cast films from soy protein isolates and fractions. *Cereal Chemistry* *74*, 115-118.
- Li-Chan, E., & Nakai, S. (1989). Biochemical basis for the properties of egg white. *CRC Critical Reviews in Poultry Biology* *2*, 21-58.
- Lim, L.-T., Mine, Y., & Tung, M. A. (1998). Transglutaminase Cross-Linked Egg White Protein Films: Tensile Properties and Oxygen Permeability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *46*(10), 4022-4029.
- Ma, W., Tang, C.-H., Yang, X.-Q., & Yin, S.-W. (2013). Fabrication and characterization of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolate–chitosan composite films at acidic pH. *Food Hydrocolloids*, *31*(2), 237-247.
- Mahmoud, R., & Savello, P. A. (1992). Mechanical Properties of and Water Vapor Transferability Through Whey Protein Films¹. *Journal of Dairy Science*, *75*(4), 942-946.
- Mariniello, L., Di Pierro, P., Esposito, C., Sorrentino, A., Masi, P., & 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.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hortscience* *27*, 1254-1255.
- McHugh, T. H., and J. M. Krochta. (1994). Water vapor permeability properties of edible whey protein-lipid emulsion films. *Journal of the American Oil Chemists' Society* *71*, 307-312.
- Michon, T., Chenu, M., Kellershon, N., Desmadril, M., & Gueguen, J. (1997). Horseradish peroxidase oxidation of tyrosine-containing peptides and their subsequent polymerization: a kinetic study. *Biochemistry*, *36*(28), 8504-8513.

- Mine, Y. (1995). Recent advances in the understanding of egg white protein functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 6(7), 225-232.
- Monedero, F. M., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2009). Effect of oleic acid-beeswax mixtures on mechanical, optical and water barrier properties of soy protein isolate based films. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 509-515.
- Morillon, V., Debeaufort, F., Blond, G., Capelle, M., & Voilley, A. (2002). Factors affecting the moisture permeability of lipid-based edible films: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 42(1), 67-89.
- Nimni, M. E., Han, B., & Cordoba, F. (2007). Are we getting enough sulfur in our diet? *Nutrition & Metabolism*, 4, 24-24.
- Nuthong, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2009). Effect of phenolic compounds on the properties of porcine plasma protein-based film. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 736-741.
- O'Brien, P. J., Siraki, A. G., & Shangari, N. (2005). Aldehyde sources, metabolism, molecular toxicity mechanisms, and possible effects on human health. *Crit Rev Toxicol*, 35(7), 609-662.
- Orliac, O., Rouilly, A., Silvestre, F., & Rigal, L. (2002). Effects of additives on the mechanical properties, hydrophobicity and water uptake of thermo-moulded films produced from sunflower protein isolate. *Polymer*, 43(20), 5417-5425.
- Ou, S., Wang, Y., Tang, S., Huang, C., & Jackson, M. G. (2005). Role of ferulic acid in preparing edible films from soy protein isolate. *Journal of Food Engineering*, 70(2), 205-210.
- Pelissari, F. M., Andrade-Mahecha, M. M., Sobral, P. J. d. A., & Menegalli, F. C. (2013). Comparative study on the properties of flour and starch films of plantain bananas (*Musa paradisiaca*). *Food Hydrocolloids*, 30(2), 681-690.
- Pérez-Mateos, M., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. C. (2009). Formulation and stability of biodegradable films made from cod gelatin and sunflower oil blends. *Food Hydrocolloids*, 23(1), 53-61.
- Perez-gago, M. B., & Krochta, J. M. (2001). Denaturation Time and Temperature Effects on Solubility, Tensile Properties, and Oxygen Permeability of Whey Protein Edible Films. *Journal of Food Science*, 66(5), 705-710.

- Peroval, C., Debeaufort, F., Despre, D., & Voilley, A. (2002). Edible arabinoxylan-based films. 1. Effects of lipid type on water vapor permeability, film structure, and other physical characteristics. *J Agric Food Chem*, 50(14), 3977-3983.
- Rayner M, Ciolfi V, Maves B, Stedman P, & Mittal G.S. (2000). Development and application of soy-protein films to reduce fat intake in deep-fried foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(6), 777-782.
- Ressouany, M., Vachon, C., & Lacroix, M. (2000). Microbial resistance of caseinate films crosslinked by gamma irradiation. *Journal of Dairy Research*, 67(1), 119-124.
doi:undefined
- Rhim, J. W., Gennadios, A., Handa, A., Weller, C. L., & Hanna, M. A. (2000). Solubility, Tensile, and Color Properties of Modified Soy Protein Isolate Films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(10), 4937-4941.
- Sabato, S. F., N. Nakamurakare, and P. J. Sobral. (2005). Effect of ionizing radiation on tilapia (*Oreochromis niloticus*) protein biofilms. *International symposium on utilization of acellerators* 37, 115-123.
- Salmoral, E. M., Gonzalez, M. E., Mariscal, M. P., & Medina, L. F. (2000). Comparison of chickpea and soy protein isolate and whole flour as biodegradable plastics. *Industrial Crops and Products*, 11(2), 227-236.
- Shellhammer, T. H., & Krochta, J. M. (1997). Whey Protein Emulsion Film Performance as Affected by Lipid Type and Amount. *Journal of Food Science*, 62(2), 390-394.
- Soazo, M., Pérez, L. M., Rubiolo, A. C., & Verdini, R. A. (2013). Effect of freezing on physical properties of whey protein emulsion films. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 256-263.
- Stadelman, W. J., & Cotterill, O. J. (1995). *Egg Science and Technology*. 4th ed. Food Produce Press, New York.
- Strauss, G., & Gibson, S. M. (2004). Plant phenolics as cross-linkers of gelatin gels and gelatin-based coacervates for use as food ingredients. *Food Hydrocolloids*, 18(1), 81-89.

- Stuchell, Y. M., & Krochta, J. M. (1994). Enzymatic Treatments and Thermal Effects on Edible Soy Protein Films. *Journal of Food Science*, 59(6), 1332-1337.
- Su, G., Cai, H., Zhou, C., & Wang, Z. (2007). Formation of edible soybean and soybean-complex protein films by a cross-linking treatment with a new streptomyces transglutaminase. *Food Technology and Biotechnology* 45, 381-388.
- Tang, C.-H., Jiang, Y., Wen, Q.-B., & 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.
- Van, D. P. I., Van, L. A., & E. G. Hendrickx, M. (2005). Changes in sulfhydryl content of egg white proteins due to heat and pressure treatment. *Agricultural and food chemistry*, 5726-5733.
- Warner, R. C. (1954). Egg Protein. In H. Neurath and K. Bailey, eds. *The Proteins*. Academic Press, New York.
- Witt, D. (2008). Recent Developments in Disulfide Bond Formation. *Synthesis*, 2008(16), 2491-2509.
- Wittaya, T. (2012). Protein-Based Edible Films: Characteristics and Improvement of Properties. doi:10.5772/48167
- Wong, J. L., & Wessel, G. M. (2008). Free-radical crosslinking of specific proteins alters the function of the egg extracellular matrix at fertilization. *Development*, 135(3), 431-440.
- Wu, K., Wang, Y., & Zhitomirsky, I. (2010). Electrophoretic deposition of TiO₂ and composite TiO₂-MnO₂ films using benzoic acid and phenolic molecules as charging additives. *Journal of Colloid and Interface Science*, 352(2), 371-378.
- Yang, L., & Paulson, A. T. (2000). Effects of lipids on mechanical and moisture barrier properties of edible gellan film. *Food Research International*, 33(7), 571-578.
- Yu, S.-H., Hsieh, H.-Y., Pang, J.-C., Tang, D.-W., Shih, C.-M., Tsai, M.-L., . . . Mi, F.-L. (2013). Active films from water-soluble chitosan/cellulose composites incorporating releasable caffeic acid for inhibition of lipid oxidation in fish oil emulsions. *Food Hydrocolloids*, 32(1), 9-19.

Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B., & Sedaghat, N. (2010). Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 102-108.





ภาคผนวก

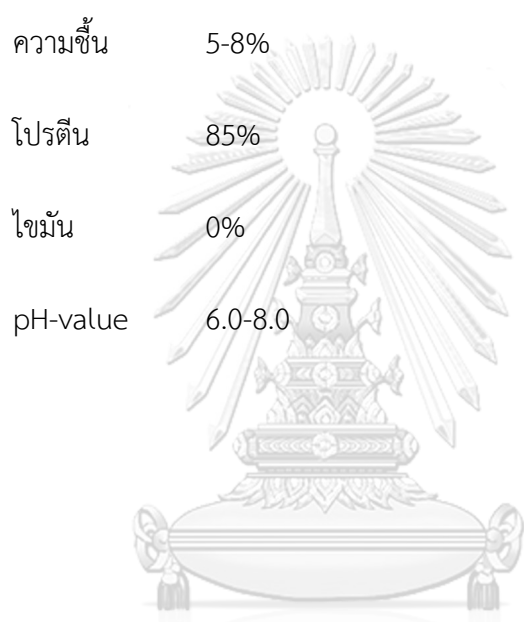
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ข้อมูลเฉพาะผลิตภัณฑ์

ก.1 โปรตีนไข่ขาว

ผลิตภัณฑ์ของ: บริษัท: EPS (Rovigo, Veneto, Italy)

ข้อมูลวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์:



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข. 1 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Tensile strength (MPa)
Control	0	0.52 ± 0.02^j
H ₂ O ₂ -treated	0.02	0.68 ± 0.00^h
	0.04	0.85 ± 0.03^f
	0.06	1.22 ± 0.03^d
NaIO ₄ -treated	0.02	1.83 ± 0.07^c
	0.04	2.41 ± 0.01^b
	0.06	2.73 ± 0.03^a
NaOCl-treated	0.02	0.58 ± 0.01^i
	0.04	0.75 ± 0.01^g
	0.06	0.96 ± 0.01^e

ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข. 2 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโพลีเอทิลีนที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Elongation at break (%)
Control	0	15.00 ± 0.67 ^g
H ₂ O ₂ -treated	0.02	18.78 ± 2.22 ^f
	0.04	24.00 ± 0.67 ^e
	0.06	28.22 ± 2.14 ^d
NaIO ₄ -treated	0.02	61.11 ± 1.02 ^b
	0.04	62.89 ± 1.01 ^{ab}
	0.06	63.89 ± 0.70 ^a
NaOCl-treated	0.02	57.67 ± 1.34 ^c
	0.04	62.33 ± 0.67 ^{ab}
	0.06	62.00 ± 1.76 ^{ab}

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ ข. 3 ความโปร่งใสแสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Transmittance (%)
Control	0	83.70 ± 0.35 ^b
H ₂ O ₂ -treated	0.02	86.90 ± 0.44 ^a
	0.04	86.37 ± 0.15 ^a
	0.06	84.60 ± 0.10 ^b
NaIO ₄ -treated	0.02	54.30 ± 1.32 ^d
	0.04	38.37 ± 0.42 ^e
	0.06	23.27 ± 1.27 ^g
NaOCl-treated	0.02	78.13 ± 0.42 ^c
	0.04	28.13 ± 0.71 ^f
	0.06	16.43 ± 0.23 ^h

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ตารางที่ ข. 4 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Water vapor permeability (g.m/m ² h Pa)
Control	0	0.75 ± 0.02 ^a
H ₂ O ₂ -treated	0.02	0.64 ± 0.04 ^b
	0.04	0.64 ± 0.00 ^b
	0.06	0.62 ± 0.00 ^b
NaIO ₄ -treated	0.02	0.44 ± 0.01 ^d
	0.04	0.37 ± 0.04 ^e
	0.06	0.29 ± 0.02 ^f
NaOCl-treated	0.02	0.60 ± 0.00 ^b
	0.04	0.55 ± 0.04 ^c
	0.06	0.36 ± 0.03 ^e

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ ข. 5 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มไขขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Contact angle ($^{\circ}$)
Control	0	29.73 ± 2.07^j
H ₂ O ₂ -treated	0.02	37.76 ± 0.65^i
	0.04	47.38 ± 0.15^h
	0.06	54.78 ± 2.13^g
NaIO ₄ -treated	0.02	87.65 ± 1.48^c
	0.04	99.81 ± 1.60^b
	0.06	107.21 ± 3.69^a
NaOCl-treated	0.02	68.30 ± 1.71^f
	0.04	76.17 ± 2.24^e
	0.06	82.48 ± 2.87^d

ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



ตารางที่ ข. 6 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมตัวออกซิไดส์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Film samples	Oxidizing agent concentration (M)	Water solubility (%)
Control	0	89.13 ± 0.98 ^a
H ₂ O ₂ -treated	0.02	67.62 ± 0.59 ^b
	0.04	64.18 ± 2.21 ^c
	0.06	57.62 ± 0.49 ^d
NaIO ₄ -treated	0.02	34.14 ± 1.92 ^f
	0.04	26.80 ± 0.37 ^g
	0.06	18.04 ± 1.68 ^h
NaOCl-treated	0.02	56.11 ± 1.35 ^d
	0.04	46.07 ± 0.97 ^e
	0.06	26.41 ± 1.51 ^g

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)



ตารางที่ ข. 7 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Tensile strength (MPa)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	1.22 ± 0.03 ^k
Heat cured-films	40	24	1.54 ± 0.01 ⁱ
		48	1.71 ± 0.01 ^{ij}
		72	1.91 ± 0.00 ⁱ
60	24	24	2.87 ± 0.02 ^h
		48	3.75 ± 0.09 ^s
		72	4.07 ± 0.12 ^f
70	24	24	3.63 ± 0.09 ^s
		48	5.82 ± 0.15 ^e
		72	6.74 ± 0.17 ^d
80	24	24	7.37 ± 0.12 ^c
		48	8.30 ± 0.13 ^b
		72	9.55 ± 0.25 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ ข. 8 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโซลเจลที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Elongation at break (%)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	28.22 ± 2.14 ^a
Heat cured-films	40	24	23.33 ± 1.45 ^b
		48	23.33 ± 1.20 ^b
		72	22.00 ± 0.88 ^b
	60	24	23.33 ± 0.88 ^b
		48	22.55 ± 1.57 ^b
		72	22.67 ± 1.73 ^b
	70	24	22.67 ± 0.88 ^b
		48	23.22 ± 1.83 ^b
		72	22.78 ± 1.92 ^b
	80	24	22.33 ± 1.45 ^b
		48	22.78 ± 0.77 ^b
		72	23.22 ± 1.71 ^b

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ตารางที่ ข. 9 ความโปร่งใส (แสดงในรูปร้อยละของแสงส่องผ่าน) ของฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Transmittance (%)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	84.60 ± 0.10
Heat cured-films	40	24	84.57 ± 0.01
		48	84.57 ± 0.01
		72	84.56 ± 0.02
60	60	24	84.57 ± 0.01
		48	84.57 ± 0.03
		72	84.56 ± 0.01
70	70	24	84.57 ± 0.03
		48	84.56 ± 0.02
		72	84.56 ± 0.01
80	80	24	84.56 ± 0.02
		48	84.56 ± 0.04
		72	84.55 ± 0.04

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ns ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ ข. 10 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Water vapor permeability (g.m/m ² h Pa)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	0.62 ± 0.00 ^a
Heat cured-films	40	24	0.41 ± 0.02 ^b
		48	0.37 ± 0.05 ^{bc}
		72	0.34 ± 0.05 ^c
60	24	24	0.30 ± 0.03 ^d
		48	0.26 ± 0.03 ^{def}
		72	0.22 ± 0.02 ^{fg}
70	24	24	0.29 ± 0.01 ^{de}
		48	0.25 ± 0.01 ^{efg}
		72	0.22 ± 0.01 ^{fg}
80	24	24	0.24 ± 0.01 ^{fg}
		48	0.23 ± 0.01 ^{fg}
		72	0.21 ± 0.01 ^g

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ ข. 11 รูปร่างของหยดน้ำบนผิวฟิล์มไขขาวที่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Contact angel (°)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	54.78 ± 2.13 ^j
Heat cured-films	40	24	67.24 ± 0.33 ⁱ
		48	71.55 ± 0.92 ^h
		72	83.30 ± 1.56 ^f
60	24	24	77.98 ± 1.27 ^g
		48	84.63 ± 1.53 ^f
		72	89.42 ± 0.95 ^e
70	24	24	89.85 ± 0.76 ^e
		48	91.82 ± 0.79 ^d
		72	94.09 ± 0.93 ^c
80	24	24	92.54 ± 0.44 ^{cd}
		48	96.80 ± 0.92 ^b
		72	99.79 ± 1.19 ^a

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ ข. 12 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไข่ขาวที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลาร์ และบ่มแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

Film samples	Heat curing condition		Water solubility (%)
	Temperature (°C)	Time (hr)	
Control	-	-	57.62 ± 0.49 ^a
Heat cured-films	40	24	54.56 ± 2.50 ^b
		48	51.72 ± 0.92 ^c
		72	42.30 ± 0.75 ^d
60	24	24	23.61 ± 1.72 ^e
		48	16.27 ± 1.50 ^g
		72	12.37 ± 1.31 ^h
70	24	24	20.27 ± 0.85 ^f
		48	11.70 ± 1.04 ^{hi}
		72	8.71 ± 1.47 ^j
80	24	24	14.04 ± 0.76 ^{gh}
		48	9.67 ± 1.74 ^{ij}
		72	7.51 ± 1.61 ^j

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a,b,c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอินท์วาริน กิตติอักษรศรีกุล เกิดเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557

นางสาวอินท์วาริน กิตติอักษรศรีกุล ได้นำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 43 ณ อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างวันที่ 17-19 ตุลาคม พ.ศ. 2560

ผลงานตีพิมพ์

Kittiakkharasrikul, I. and Mahawanich, T. 2017. Modification of egg albumen film properties using oxidizing agents. Proceedings of the 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT43). Chaloe Rajakumari 60 Building, Chulalongkorn University. October 17-19, 2017.