

เอกสารวิชาการฉบับที่ ๑/๒๕๖๖



Technical Paper No. 1/2023

การผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล
Production of Biodegradable Film from Milkfish (*Chanos chanos*, Forskal)
Skin Gelatin

ชนากานต์ จันทร์สมบูรณ์

Chanakan Chansomboon

ศศิธร ชันขจรกุล

Sasithorn Chankajornkul

กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ

Fisheries Industrial Technology

Research and Development Division

กรมประมง

Department of Fisheries

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

Ministry of Agriculture and Cooperatives

เอกสารวิชาการฉบับที่ ๑/๒๕๖๖



Technical Paper No. 1/2023

การผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล
Production of Biodegradable Film from Milkfish (*Chanos chanos*, Forskal)
Skin Gelatin

ชนากานต์ จันทร์สมบูรณ์

Chanakan Chansomboon

ศศิธร ชันขจรกุล

Sasithorn Chankajornkul

กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ

Fisheries Industrial Technology

Research and Development Division

กรมประมง

Department of Fisheries

๒๕๖๖

2023

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์	8
วิธีดำเนินการ	9
1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	9
2. วิธีดำเนินงาน	10
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	13
1. องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล	13
2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล	13
3. ผลการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล	18
สรุปผลการทดลอง	24
คำขอบคุณ	24
เอกสารอ้างอิง	24

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล	13
2 ร้อยละของผลผลิต และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่สกัดด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินทางการค้า	17
3 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)	19
4 ร้อยละการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และค่าความโปร่งใส (Transparency) ของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)	20
5 ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความยืดเมื่อขาดของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)	21
6 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)	22

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน	4
2 ขั้นตอนการสกัดเจลาติน	6
3 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเจลาตินที่แตกต่างกัน	6
4 พอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถใช้ในการผลิตไบโอฟิล์ม	7
5 ร้อยละของน้ำหนักหนังปลาที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดอะซิติก	15
6 แถบโปรตีนของเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่สกัดด้วยสภาวะต่างกันด้วยวิธี SDS-PAGE	18
7 ลักษณะของแผ่นฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)	19

การผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล

ชนากานต์ จันทรสมบูรณ์* และศศิธร ชื่นขจรกุล
กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล โดยแปรระยะเวลาในการปรับสภาพหนังปลาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 M เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ตามด้วยการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.25 M เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาสกัดเจลาตินด้วยน้ำกลั่นแปรร้อนอุณหภูมิและเวลา คือ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล คือ การปรับสภาพหนังปลาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 M ที่ 12 ชั่วโมง ตามด้วยการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดอะซิติก 0.25 M ที่ 1 ชั่วโมง และสกัดเจลาตินด้วยน้ำกลั่นที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ให้ร้อยละผลผลิตเจลาตินและค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่สุด เมื่อนำเจลาตินที่สกัดได้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยผสมกับพลาสติกไซเซอร 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและกรดโอเลอิก พบว่า ฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลผสมกลีเซอรอล (GG) มีลักษณะใส นิ่มและยืดหยุ่น มีค่า L^* ค่าการส่องผ่านของแสง และค่าความยืดเมื่อขาดสูงกว่าฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลผสมกรดโอเลอิก (GO) ที่มีลักษณะขุ่น แข็งและไม่ยืดหยุ่น ($p \leq 0.05$) แต่ฟิล์ม GO ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์ม GG รวมทั้งค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์ม GO มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม GG ($p \leq 0.05$) ส่วนความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์ม GG และฟิล์ม GO มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าร้อยละ 32.22 ± 0.93 และ 27.35 ± 1.10 ตามลำดับ ดังนั้นเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพ

คำสำคัญ: เจลาติน, ฟิล์มเจลาติน, ปลานวลจันทร์ทะเล, หนังปลา

Production of Biodegradable Film from Milkfish (*Chanos chanos*, Forskal)

Skin Gelatin

Chanakan Chansomboon* and Sasithorn Chankajornkul

Fisheries Industrial Technology Research and Development Division

Abstract

This study aims at identifying the optimal conditions for extracting gelatin from milkfish skins by varying the periods for conditioning the skins with 0.25 M sodium hydroxide solution for 12 and 24 hours, then conditioning 0.25 M acetic acid solution for 1 and 2 hours and finally extracting gelatin with the distilled water (1) 55 °C for 2 hours and (2) 70 °C for 1 hour and 30 minutes. It was found that the optimal condition for extracting gelatin from the milkfish skins was as follows: conditioning the fish skins with 0.25 M sodium hydroxide solution for 12 hours, 0.25 M acetic acid solution for 1 hour and extracting gelatin with the distilled water at 70 °C for 1 hour and 30 minutes, resulting in the highest yield of gelatin and strongest gel strength. By forming the films with the extracted gelatin mixed with plasticizers (i.e., glycerol and oleic acid), it was shown that the gelatin films from the milkfish skins mixed with glycerol (GG) were clear, soft and elastic with the lightness (L^*) and value of elongation-at-break higher than those of the gelatin from the milkfish skins mixed with oleic acid (GO) that were unclear, hard and inelastic ($p \leq 0.05$). However, the GO films had the tensile strength higher than the GG films. Moreover, the water vapor transmission rate and the oxygen transmission rate of the GO films were lower than those of the GG films ($p \leq 0.05$). The water solubility of the GG films and the GO films were significantly different ($p \leq 0.05$) with the percentages of 32.22 ± 0.93 and 27.35 ± 1.10 , respectively. Therefore, the milkfish skin gelatin could be used for making biodegradable films.

Keywords: gelatin, gelatin film, Milkfish, fish skin

*Corresponding author: Kaset-klang Chatuchak, Bangkok 10900 Tel. 0 2940 6130-45 ext. 4207

E-mail: chanakanc@fisheries.go.th

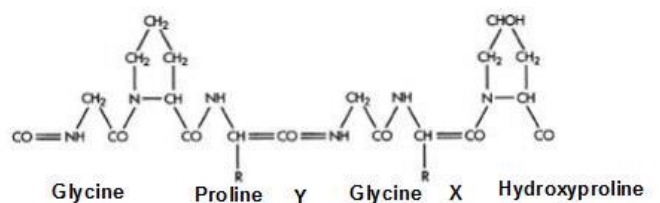
คำนำ

ปลานวลจันทร์ทะเล (*Chanos chanos*, Forskal) ชื่อสามัญ คือ Milkfish เป็นปลาผิวน้ำในช่วงวัยอ่อนอาศัยอยู่ในบริเวณน้ำกร่อยและจะออกไปอาศัยอยู่ในทะเลเมื่อโตขึ้น พบแพร่กระจายในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และทางตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิก ประเทศไทยสำรวจพบปลานวลจันทร์ทะเลครั้งแรกในปี พ.ศ. 2493 บริเวณชายฝั่งทะเลบ้านคลองวาฬ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และได้มีการเพาะเลี้ยงสำเร็จเมื่อปี พ.ศ. 2508 โดยพระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร และสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง ได้เสด็จพระราชดำเนินไปทอดพระเนตรการเลี้ยงปลาดังกล่าว ณ สถานีประมงคลองวาฬ ซึ่งปัจจุบัน คือ ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งประจวบคีรีขันธ์ ทรงพบว่า ปลานวลจันทร์ทะเลสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพความเค็มของน้ำได้หลายระดับ (Euryhaline behavior) แม้สภาพน้ำมีระดับความเค็มต่ำ แต่ปลานวลจันทร์ทะเลสามารถเจริญเติบโตและขายได้ราคาดี ในปี พ.ศ. 2556 มีการจัดตั้งกลุ่มแปรรูปปลานวลจันทร์ทะเลบ้านคลองวาฬตามแนวพระราชดำริ โดยรับปลาจากเกษตรกรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้ปลานวลจันทร์ทะเลเริ่มได้รับความนิยมแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ลูกชิ้น ปลากระป๋อง ปลาตากแห้งหรือปลาแดดเดียว ปลานวลจันทร์ทะเลต้มเค็ม ปลานวลจันทร์ทะเลจึงเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค และเป็นสัตว์น้ำที่มีศักยภาพในการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์มากขึ้น (ชาติชาย, 2559)

นอกจากนี้ปลานวลจันทร์ทะเลยังเป็นที่ยอมรับบริโภคและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจในประเทศฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย ใต้หวัน และกลุ่มประเทศตะวันออกกลาง ซึ่งนิยมเลี้ยงและซื้อขายกันตลอดทั้งปี (Bagarinao, 1999 อ้างโดย ปกรณ์, 2546) ปลานวลจันทร์ทะเลเป็นปลาที่มีเนื้อมากประมาณร้อยละ 60 กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง นำปลาชนิดนี้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ ปลานวลจันทร์ทะเลกึ่งนึ่งรมควัน (จิรวรรณ, 2532; กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, 2561) และปลานวลจันทร์ทะเลต้มเค็มบรรจุกระป๋อง (วราทิพย์ และคณะ, 2535) นอกจากนี้ วชิรี และอรรวรรณ (2558) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปลานวลจันทร์ทะเล ได้แก่ ปลาเค็ม ไส้กรอกปลา และลูกชิ้นปลา ซึ่งจากการแปรรูปดังกล่าวมีเศษเหลือคิดเป็นร้อยละ 30-40 เช่น หนัง หัว ก้าง เกล็ด และไส้ปลา ซึ่งเป็นแหล่งของโปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดี (Nam *et al.*, 2020) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือจากอุตสาหกรรมประมง และเป็นการช่วยลดปัญหาขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (กรมประมง, 2560)

เจลาติน คือ โปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดจากการเสียสภาพของคอลลาเจน ด้วยการให้ความร้อนหรือการไฮโดรไลซิสบางส่วนของโมเลกุล เจลาตินสามารถสกัดได้จากกระดูก และหนังสัตว์ การผลิตเจลาตินเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่สกัดจากเศษเหลือของสุกรและวัว ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาหนังปลาเป็นแหล่งผลิตเจลาตินทางเลือกใหม่ เนื่องจากอาหารฮาลาลมีแนวโน้มเป็นที่ต้องการเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าชาวมุสลิมไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์จากสุกรมาใช้ประกอบอาหาร รวมถึงไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์จากวัวที่ไม่ผ่านกระบวนการเชือดตามบทบัญญัติของศาสนา (Boran and Regenstein, 2010; Ahmed *et al.*, 2020) นอกจากนี้การระบาดของโรควัวบ้า (Bovine Spongiform Encephalopathy, BSE) เป็นปัญหาสำคัญของการผลิตเจลาตินจากวัวที่สวนทางกับแหล่งที่ใช้ผลิตเจลาตินเชิงพาณิชย์ ดังนั้น หนังปลาที่เป็นเศษเหลืออันอุดมไปด้วยคอลลาเจนจึงเป็น

ทางเลือกใหม่สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดเจลาตินที่มีศักยภาพในการตอบสนองความต้องการของชาวมุสลิม ภายใต้มาตรฐานอาหารฮาลาล และไม่มีความเสี่ยงต่อโรคควัวบ้า (Nurilmala *et al.*, 2022) โดยวัตถุดิบเหล่านี้ถูกนำมาปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดหรือด่างเพื่อให้โครงข่ายร่างแหของคอลลาเจนคลายเกลียว (สารโรจน์, 2556) ซึ่งการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดเป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการสกัดเจลาตินจากหนังหมูหรือหนังปลา ในขณะที่การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างมักนิยมใช้กับหนังของสัตว์ใหญ่ เช่น หนังวัวและหนังควาย (นิสานารถ และคณะ, 2561) ทั้งนี้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเจลาตินขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการสกัด เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีปริมาณกรดอะมิโนในสัดส่วนที่ต่างกัน กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเจลาติน คือ ไกลซีน (Glycine) โพรลีน (Proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline) (ทัตดาว และคณะ, 2559) โดยทั่วไปสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีปริมาณร้อยละ 24 และปลา มีปริมาณร้อยละ 16-18 ส่วนปลาที่อาศัยในน้ำเย็น เช่น ปลาค็อด มีปริมาณ Hydroxyproline ต่ำมาก ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจล และการหลอมเหลวต่ำ (Gilsenan and Ross-Murphy, 2000) โดยเจลาตินมีโครงสร้างดังภาพที่ 1 ปัจจุบันปริมาณเจลาตินมีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทั่วโลก ประมาณ 30,000 ตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นมูลค่าเฉลี่ยปีละประมาณ 10,439 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 329,430 ล้านบาท (กองวิจัยเศรษฐกิจการค้ามหภาค, 2563) เพราะเป็นวัตถุดิบที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีคุณสมบัติที่ดี เช่น การเกิดเจล, ความสามารถในการอุ้มน้ำ, ความสามารถในการจับตัว, ความสามารถในการทำให้เป็นอิมัลชัน, ความหนืด, คุณสมบัติเชิงกล, การก่อตัวเป็นฟิล์ม, ความสามารถในการละลายน้ำ, และเจลสามารถคืนสภาพได้หลังจากผ่านความร้อน (Thermoreversible) ซึ่งเจลจะเริ่มหลอมเมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลว ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เรียกว่า ละลายในปาก (Melt in the mouth) (สินีนาถ, 2555) ด้วยคุณสมบัติที่ดีเหล่านี้ทำให้เจลาตินมีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ยา การถ่ายภาพ ทั้งยังได้รับความสนใจสำหรับนำมาผลิตฟิล์มไบโอพอลิเมอร์ (Jongjareonrak *et al.*, 2006)



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน

(ที่มา: Mahmood *et al.*, 2016)

การสกัดเจลาตินมีขั้นตอนการสกัด ดังภาพที่ 2 ซึ่งในการสกัดเจลาตินนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้น การสกัดเจลาติน และการทำแห้งเจลาติน หรืออาจมีขั้นตอนการกำจัดไขมัน หรือแร่ธาตุออกขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัด

1. ขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้น (Pretreatment process) เป็นขั้นตอนที่ช่วยกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่คอลลาเจนออกจากวัตถุดิบ นิยมปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายด่างหรือกรด โดยการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการสกัดนั้น นอกจากช่วยกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่คอลลาเจนออกแล้ว ยังช่วยทำให้คอลลาเจนอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการสกัดเจลาตินต่อไป โดยจะทำลายพันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุลคอลลาเจน

ทำให้เจลาตินละลายออกมา แต่ทำลายพันธะเพปไทด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Zhou and Regenstien, 2005) การใช้สารละลายต่างหรือกรดเพื่อทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ (van de Waals force) ทำให้คอลลาเจนในหนังปลาเกิดการพองตัวแบบ Osmotic เป็นการทำให้โครงสร้างของคอลลาเจนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยแยกออกจากกันบางส่วน ซึ่งจะทำให้คอลลาเจนเปลี่ยนเป็นเจลาตินได้ง่ายขึ้น (วรรณวิมล, 2540) สารละลายต่างหรือกรดที่ใช้ในการปรับสภาพนิยมใช้เป็นสารละลายเจือจาง เนื่องจากสารละลายต่างหรือกรดเจือจางจะทำลายเฉพาะพันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุล ส่วนพันธะภายในโมเลกุลของคอลลาเจนจะถูกทำลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Gómez-Guillén *et al.*, 2009)

การปรับสภาพด้วยสารละลายต่าง (Alkaline process) ต่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่างจะทำให้คอลลาเจนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่ทำให้คอลลาเจนเกิดการละลาย แต่จะทำให้สารที่ไม่ใช่คอลลาเจน (non-collagen) สามารถละลายและตกตะกอนได้ เช่น เคราติน อัลบูมิน โกลบูลิน มิวโคโพลิแซ็กคาไรด์

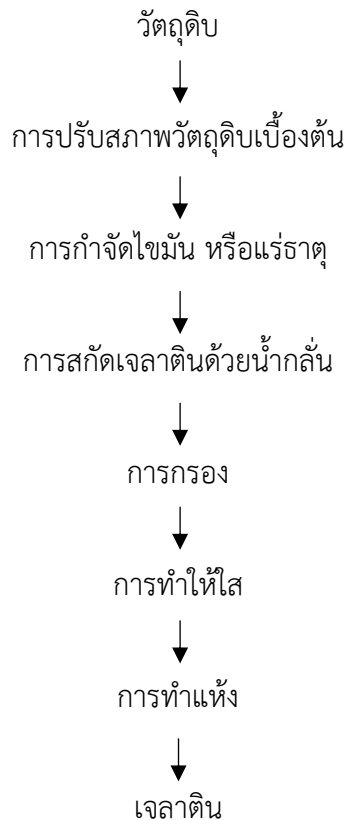
การปรับสภาพด้วยสารละลายกรด (Acid process) กรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) (Gomez and Montero, 2001) โดยการใช้กรดจะทำให้การเชื่อมของโคเวเลนต์ (Covalent cross links) ภายในโมเลกุลคอลลาเจนถูกทำลายเพื่อทำให้เกิดสายโซ่แอลฟา (α -Chain) ของเจลาตินในขั้นตอนการสกัดต่อไป (Johnston-Bank, 1990)

ปัจจุบันมีการใช้สารละลายต่างและสารละลายกรดร่วมในการปรับสภาพวัตถุดิบมากขึ้น เนื่องจากสารละลายต่างและกรดช่วยลดการสูญเสียคอลลาเจนในระหว่างการสกัด ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของเจลและความหนืดของเจลาตินอย่างมีนัยสำคัญ (Hao *et al.*, 2009) Zhou and Regenstien (2005) ศึกษาผลการปรับสภาพหนังปลา Alaska Pollock เพื่อสกัดเจลาติน พบว่า การปรับสภาพด้วยสารละลายต่างแล้วตามด้วยสารละลายกรดช่วยกำจัดโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน และช่วยให้ pH ของหนังปลาเหมาะสมสำหรับการสกัด ซึ่งอาจเป็นผลให้ได้ร้อยละผลผลิตและค่าความแข็งแรงของเจลที่ดี และจากงานวิจัย Zhang *et al.*, 2007 พบว่า การปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาที่ต่างกันทำให้ฟิล์มเจลาตินที่ขึ้นรูปจากเจลาตินที่ถูกปรับสภาพหนังปลาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.025 M แล้วตามด้วยสารละลายกรดอะซิติก 0.09 M ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์มเจลาตินที่ขึ้นรูปจาก เจลาตินที่ถูกปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว และ Alves *et al.* (2022) รายงานว่าการปรับสภาพหนังปลาคือดด้วยสารละลายต่างและสารละลายกรดให้ค่าความแข็งแรงของเจลที่ดี และมีร้อยละผลผลิตสูงกว่าการปรับสภาพด้วยกรดเพียงอย่างเดียว

2. ขั้นตอนการสกัดเจลาติน (Extraction Process) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนคอลลาเจนซึ่งไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นสารละลายเจลาติน โดยการใช้อุณหภูมิสูงสำหรับการสกัด ความร้อนจะทำลายพันธะทำให้โครงสร้างเกลียว triple helix ไม่เสถียร เกิด helix-to-coil transition ได้เป็นเจลาติน ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเจลาตินมีหลายรูปแบบ ดังภาพที่ 3 ได้แก่ α -Chain มีน้ำหนักโมเลกุล 90-110 กิโลดาลตัน (kDa) สายโซ่เบต้า (β -Chain) คือ α -Chain ที่เชื่อมกันสองสาย มีน้ำหนักโมเลกุล 180-220 kDa และสายโซ่แกมมา (γ -Chain) คือ α -Chain ที่เชื่อมกันสามสาย มีน้ำหนักโมเลกุล 270-330 kDa (Haug and Draget, 2011) ขั้นตอนการสกัดเจลาตินนิยมใช้น้ำร้อนเพื่อสกัดให้เจลาตินออกมาจากวัตถุดิบ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ได้ผลผลิตเจลาตินที่สูงขึ้น แต่ความร้อนที่สูงเกินไปอาจทำลายพันธะภายในของเจลาตินทำให้ขนาดโมเลกุลเจลาตินเล็กลง ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเจลาติน เช่น ความแข็งแรงของเจลลดลง (Kasankala *et al.*, 2007)

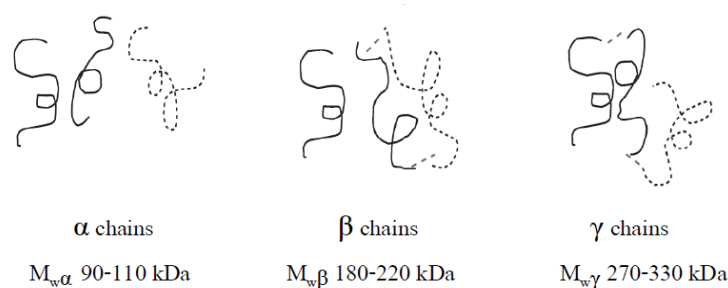
3. ขั้นตอนการทำแห้งเจลาติน (Drying)

หลังจากขั้นตอนการสกัดเจลาตินจะได้สารละลายเจลาติน ซึ่งต้องนำสารละลายเจลาตินที่ได้ไปกรอง อาจจะมีขั้นตอนการระเหยน้ำออกก่อนนำไปทำแห้ง เพื่อช่วยลดระยะเวลาการทำแห้งลง โดยการระเหยน้ำออกควรใช้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเจลาตินมีความไวต่ออุณหภูมิสูง หากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เจลาตินที่ได้มีค่าความแข็งแรงของเจลต่ำ จากนั้นจึงนำสารละลายเจลาตินเข้มข้นไปทำแห้งโดยวิธีต่าง ๆ เช่น การทำแห้งด้วยตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot Air Oven) และการทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสกัดเจลาติน

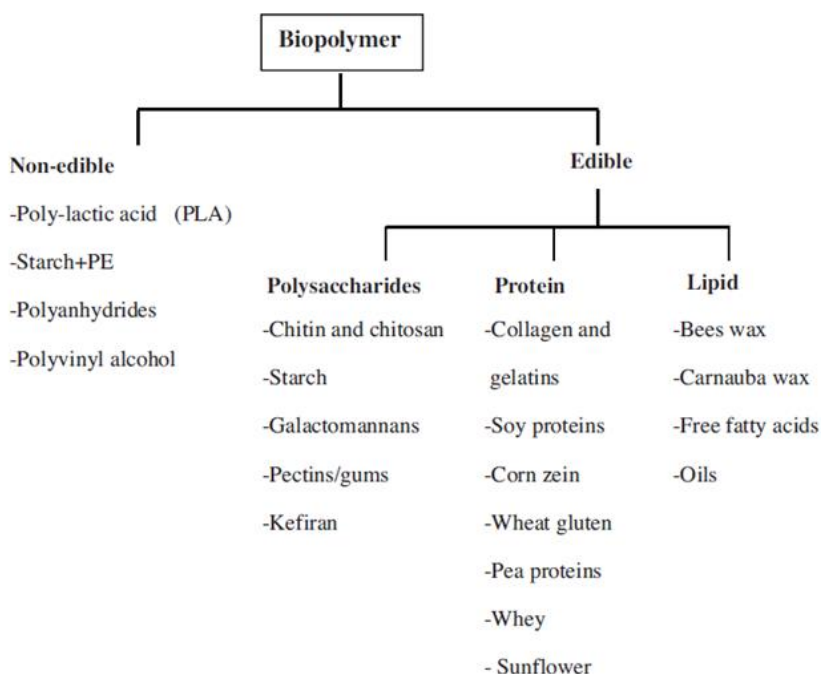
(ที่มา: ดัดแปลงจาก Benjakul *et al.*, 2012)



ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเจลาตินที่แตกต่างกัน

(ที่มา: Haug and Draget, 2011)

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากไบโอพอลิเมอร์จากธรรมชาติ หรือไบโอฟิล์มกำลังได้รับความสนใจอย่างมากแทนการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Di Giorgio *et al.*, 2019) และถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอาหารและยา เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยอาศัยสภาวะแวดล้อม หรือการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเพื่อย่อยสลายให้กลายเป็นสารประกอบในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (ภัทรนันท์ และคณะ, 2563) ไบโอฟิล์มมีคุณสมบัติที่สามารถช่วยปกป้องอาหารจาก น้ำ ก๊าซ กลิ่น จุลินทรีย์ และการเกิดออกซิเดชันของไขมัน รวมถึงช่วยถนอมหรือปรับปรุงคุณภาพอาหาร (Kim and Ustunol, 2001) วัสดุชีวภาพที่อาจนำไปใช้ในการผลิตไบโอฟิล์ม มี 2 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่บริโภคได้และที่ไม่สามารถบริโภคได้ ดังภาพที่ 4 ซึ่งโปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ และลิพิด เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถบริโภคได้และได้รับความสนใจอย่างมาก (Nur Hanani *et al.*, 2014) โดยเฉพาะไบโอฟิล์มที่ผลิตจากโปรตีนชนิดต่าง ๆ เช่น คอลลาเจน เจลาติน โปรตีนข้าวโพด โปรตีนข้าวสาลี และโปรตีนถั่วเหลือง ได้รับความสนใจมากกว่าการผลิตจากลิพิด และพอลิแซ็กคาไรด์ (Krochta, 1997) เนื่องจากโปรตีนมีโครงสร้างที่จำเพาะและคุณสมบัติเชิงหน้าที่หลากหลาย จึงทำให้ฟิล์มจากโปรตีนมีคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพในการป้องกันก๊าซดีกว่าฟิล์มจากพอลิแซ็กคาไรด์ (Ou *et al.*, 2004) ในบรรดาไบโอพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เจลาตินได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติในการขึ้นรูปและความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อน (Tongnuanchan *et al.*, 2016) นอกจากนี้ ฟิล์มเจลาตินยังมีคุณสมบัติป้องกันกลิ่นและแสง UV ได้อย่างดี รวมทั้งมีคุณสมบัติในการป้องกันออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี (Gómez Guillén *et al.*, 2009)



ภาพที่ 4 พอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถใช้ในการผลิตไบโอฟิล์ม

(ที่มา: Nur Hanani *et al.*, 2014)

งานวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะของฟิล์มเจลาตินบริโภคได้จากหนังปลาชนิดต่าง ๆ เช่น ปลากระพงแดงข้างแฉวง (*Lutjanus vitta*) และปลาตาหวาน (*Priacanthus macracanthus*) พบว่า ฟิล์มเจลาตินจากหนังปลากระพงแดงข้างแฉวง

มีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength : TS) และความหนามากกว่าฟิล์มเจลลาตินจากหนังปลาตาหวาน (Jongjareonrak *et al.*, 2006) เนื่องจากปลาทั้ง 2 สายพันธุ์มีปริมาณและองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่ต่างกัน (Jongjareonrak *et al.*, 2005a, 2005b) และในปี พ.ศ. 2553 มีรายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของฟิล์มเจลลาตินจากหนังปลาบึกและกระดุกว้าว พบว่า ฟิล์มเจลลาตินจากหนังปลาบึกมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดและค่าความยืดเมื่อขาด (Elongation at Break : EAB) สูงกว่าฟิล์มเจลลาตินจากกระดุกว้าว (Rawdkuen *et al.*, 2010) เห็นได้ว่าปริมาณโปรตีนมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีปริมาณโปรตีนมากจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงและความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการป้องกันแสง UV ได้มากขึ้นด้วย (Jongjareonrak *et al.*, 2006) แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มโปรตีนจากเจลลาตินมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มจากโปรตีนชนิดอื่น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้น จึงมีรายงานการศึกษาวิจัยหลายฉบับมุ่งเน้นพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มเจลลาตินจากปลาในแหล่งต่าง ๆ โดยการเติมสารสกัดจากธรรมชาติ เช่น การเสริมสารคาเทชิน (Catechin) และไลโซไซม์ (Lysozyme) ที่เป็นสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในฟิล์มเจลลาตินบริโภคน้ำจืดจากหนังปลาบึก ซึ่งฟิล์มดังกล่าวสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และสามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหารได้ดี (ดำรงพล และคณะ, 2554) นอกจากนี้ Salem *et al.* (2021) ศึกษาและพัฒนาฟิล์มเจลลาตินย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากหนังปลาฉลามหลังหนาม (*Squalus acanthias*) ด้วยการเสริมสารสกัดอินทรีจากเมล็ดเทียนแดง (*Lepidium sativum*) เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) สำหรับเก็บรักษาเนยแข็ง พบว่า นอกจากฟิล์มเจลลาตินย่อยสลายได้เป็นวัสดุห่อหุ้มอาหารที่สามารถบริโภคได้แล้วยังช่วยปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของเนยแข็งด้วย

ดังนั้น นักวิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของเศษเหลือจากปลานวลจันทร์ทะเล จึงสนใจศึกษาการผลิตฟิล์มเจลลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ย่อยสลายได้สำหรับทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก ช่วยลดปัญหาขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับหนังปลาและปลานวลจันทร์ทะเล

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล
2. ศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มเจลลาตินที่ผลิตจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล

วิธีดำเนินการ

1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1.1 วัตถุดิบ

หนังปลานวลจันทร์ทะเลสด จากจังหวัดฉะเชิงเทราขนส่งมายังห้องปฏิบัติการกองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ จากนั้นนำหนังปลาล้างทำความสะอาด แช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และตัดหนังปลาขนาด 1×1 เซนติเมตร บรรจุใส่ถุงพลาสติก และเก็บรักษาไว้ในห้องแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก่อนนำมาสกัดเจลาติน

1.2 สารเคมี

- 1.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Merck
- 1.2.2 กรดอะซิติก (CH_3COOH) ยี่ห้อ Suplco
- 1.2.3 กลีเซอรอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) ยี่ห้อ Global Green Chemicals
- 1.2.4 กรดโอเลอิก ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
- 1.2.5 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 94-97% ยี่ห้อ Merck
- 1.2.6 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) (ampule) 1 N ยี่ห้อ Merck
- 1.2.7 กรดบอริก (H_3BO_3) ยี่ห้อ Kemaus
- 1.2.8 อินดิเคเตอร์ (Sher mix indicator) ยี่ห้อ Buchi
- 1.2.9 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ยี่ห้อ Merck
- 1.2.10 โบโรโมไธมอลบลู ยี่ห้อ Merck
- 1.2.11 เมทิลเรด ยี่ห้อ Merck
- 1.2.12 เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ยี่ห้อ Merck
- 1.2.13 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (C_6H_{14}) ยี่ห้อ Qrec

1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1.3.1 เครื่องย่อยและกลั่นวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน ยี่ห้อ Buchi รุ่น K-435 และ B324 ตามลำดับ
- 1.3.2 เครื่องสกัดไขมัน ยี่ห้อ Tecator Soxtec รุ่น system HT
- 1.3.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Radiometer รุ่น PHM210
- 1.3.4 ตู้อบ (Hot air oven) ยี่ห้อ Termaks รุ่น Type. TS 8265
- 1.3.5 เตาเผาแก้ว ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CWF 1100
- 1.3.6 เครื่องปั่นผสม ยี่ห้อ Ystral รุ่น X 10/20
- 1.3.7 เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Innova รุ่น 4230
- 1.3.8 ตู้ดูดความชื้น ยี่ห้อ Sanplatec
- 1.3.9 เครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น MS 6001 S
- 1.3.10 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AC 210 S

- 1.3.11 เครื่องวัดความหนา ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น ID-C112BS
- 1.3.12 เครื่องวัดสี (Chroma meter) ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-5
- 1.3.13 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-1800
- 1.3.14 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyser) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA-XT2i
- 1.3.15 แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 70x70x5 มิลลิเมตร
- 1.3.16 ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับวัดการซึมผ่านไอน้ำ
- 1.3.17 โถดูดความชื้น

2. วิธีดำเนินงาน

2.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และความชื้น ตามวิธี AOAC (2019) และเก่า ตามวิธี ISO (1998)

2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล (ดัดแปลงจากวรรณวิมล, 2540)

จากการศึกษาเบื้องต้นทดลองแปรความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับแช่หนังปลาที่ 0.1 M, 0.25 M และ 0.5M (อัตราส่วนหนังปลา: สารละลาย = 1:20 w/v) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม 1 ความเข้มข้น ที่ให้ลักษณะหนังปลาใส พองตัว แต่ไม่เปื่อยยุ่ย ก่อนนำไปปรับสภาพด้วยกรดอะซิติกต่อไป

2.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลานวลจันทร์ทะเล

ดำเนินการโดยแช่หนังปลาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.25 M (อัตราส่วนหนังปลา: สารละลาย = 1:20 w/v) แปรระยะเวลาในการแช่หนังปลาที่ 12 และ 24 ชั่วโมง กวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 10 ± 1 °C เมื่อครบเวลา ล้างตัวอย่างด้วยน้ำประปา จน pH ของน้ำล้างเป็นกลาง ตั้งไว้ให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งน้ำหนังหนังปลา สังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ และคำนวณร้อยละของน้ำหนังหนังปลาที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 1 จากนั้นนำหนังปลาที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาแช่ด้วยสารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0.25 M (อัตราส่วนหนังปลา: สารละลาย = 1:20 w/v) แปรระยะเวลาในการแช่หนังปลาที่ 1 และ 2 ชั่วโมง กวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 10 ± 1 °C เมื่อครบเวลา ล้างหนังปลาด้วยน้ำประปา จน pH ของน้ำล้างเป็นกลาง ตั้งไว้ให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งน้ำหนังหนังปลา พิจารณาลักษณะทางกายภาพของหนังปลา และคำนวณร้อยละของน้ำหนังหนังปลาที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2

ร้อยละของน้ำหนังหนังปลาที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =

$$\frac{\text{น้ำหนังหนังปลาที่เพิ่มขึ้นหลังแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์}}{\text{น้ำหนังหนังปลาเริ่มต้น}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายกรดอะซิติก} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายกรดอะซิติก}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนการแช่สารละลายกรดอะซิติก}} \times 100 \quad (2)$$

2.2.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาติน

นำหนังปลาที่ปรับสภาพจากข้อ 2.2.1 ทั้ง 4 ชุดการทดลอง มาสกัดด้วยสถานะที่ 1 คือ สกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 55 °C เวลา 2 ชั่วโมง (จิรภา และนพพร, 2556) และสถานะที่ 2 คือ สกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C เวลาในการสกัด 1 ชั่วโมง 30 นาที (วรรณวิมล, 2540) เมื่อสกัดเรียบร้อยแล้วนำสารละลายเจลาตินที่ได้กรองด้วยผ้าขาวบาง และนำไปอบแห้งที่ 55 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

ตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่สกัดได้ ได้แก่ รูปแบบโปรตีนของเจลาตินด้วยวิธี SDS-PAGE ตามวิธีของ Laemmli (1970) ร้อยละของผลผลิตเจลาตินแห้งที่ได้จากสมการที่ 3 และค่าความแข็งแรงของเจล (Gel strength) ทดสอบโดยใช้หัววัด P/0.5R อัตราเร็วในการกด 0.5 mm/s และระยะเวลาในการกด 4.0 mm ซึ่งค่าความแข็งแรงของเจล คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการกด (กรัม) จากนั้นเลือกวิธีการสกัดเจลาตินที่ให้ร้อยละของผลผลิตเจลาตินและค่าความแข็งแรงของเจลที่ดีที่สุด เป็นสถานะในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเลเพื่อใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

$$\text{ร้อยละของผลผลิตเจลาติน} = \frac{\text{น้ำหนักเจลาตินที่ได้}}{\text{น้ำหนักหนังปลาเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3)$$

2.3 ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล

2.3.1 การขึ้นรูปฟิล์มเจลาติน

ชั่งผงเจลาติน 4.00±0.50 กรัม พลาสติกไซเซอร์ 2.00±0.50 กรัม และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ดัดแปลงจาก Jongjareonrak *et al.* (2006) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม 1 นาที โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ ได้แก่ กลีเซอรอลและกรดโอเลอิก จากนั้นคนด้วยเครื่องกวนสาร เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60±5 °C นาน 15 นาที เทสารละลาย 8 มิลลิลิตร ลงแม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 70×70×5 มิลลิเมตร วางให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บแผ่นฟิล์มในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±5 นาน 48-72 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม

2.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเลของฟิล์ม ดังนี้

(1) ความหนาของฟิล์ม วัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนา ตัวอย่างละ 5 จุด และหาค่าเฉลี่ย

(2) ค่าสี โดยระบบสี CIE L*, a* และ b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยแกน L* บรรยายความสว่าง L = 0 สีที่ได้จะมีดำเป็นสีดำ L = 100 สีที่ได้จะสว่างเป็นสีขาว แกน a* บรรยายค่าสีแดง หรือสีเขียว หากค่า a เป็น + วัตถุมีสีออกแดง ค่า a เป็น - วัตถุมีสีออกเขียว และแกน b* บรรยายค่าสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน โดยค่า b เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง ถ้าค่า b เป็น - วัตถุมีสีออกน้ำเงิน

(3) ค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) และค่าความโปร่งใสของฟิล์ม (Transparency) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังสมการที่ 4 ตามวิธีของ Tee *et al.*, (2016)

$$\text{ค่าความโปร่งใสของฟิล์ม} = \frac{\text{ค่าความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร}}{\text{ความหนาของแผ่นฟิล์ม (มิลลิเมตร)}} \quad (4)$$

(4) ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืดเมื่อขาด (Elongation at Break) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-12 (ASTM, 2012) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด กว้าง 20 ± 0.5 มิลลิเมตร และยาว 50 ± 0.5 มิลลิเมตร ใช้หัวทดสอบแบบ tension หนีบทัวอย่างฟิล์มบนและล่าง ตั้งระยะห่าง 30 มิลลิเมตร ดึงฟิล์มด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที

(5) ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability) ทดสอบด้วยวิธี Cup method ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E96/E96M-10 (ASTM, 2010)

3.2.6 ค่าอัตราการซึมผ่านออกซิเจน (Oxygen transmission rate) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3985-17 (ASTM, 2017)

3.2.7 ความสามารถในการละลายของฟิล์ม ทดสอบด้วยวิธี Gontard and Guilbert (1994) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 1×1 เซนติเมตร และทำให้แห้งในตู้อบที่ 100 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟิล์มแต่ละแผ่นแช่ในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟิล์มออกจากน้ำกลั่นและทำให้แห้งอีกครั้งที่ 100 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณความสามารถในการละลายของฟิล์ม ดังสมการที่ 5

$$\text{ความสามารถในการละลาย} = \frac{(\text{น้ำหนักแผ่นฟิล์มเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแผ่นฟิล์มสุดท้าย})}{\text{น้ำหนักแผ่นฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100\% \quad (5)$$

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิธีดำเนินงานข้อ 2.1-2.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มทดลองอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan' New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และข้อ 2.3 ทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยการทดสอบสมมติฐานของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน (T-test independent) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล (ตารางที่ 1) พบว่า ความชื้นมีปริมาณร้อยละ 66.03 รองลงมา คือ โปรตีนร้อยละ 31.98 ไขมันร้อยละ 1.54 และเถ้าร้อยละ 0.15 โดยโปรตีนจัดเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในหนังปลาสำหรับการสกัดเจลาติน เพราะประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด (Amino acid) เรียงต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (Peptide bond) และร้อยละ 30 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมดเป็นแหล่งกำเนิดของเจลาติน (นักสิทธิ์, 2561) ดังนั้น วัตถุดิบตั้งต้นมีปริมาณโปรตีนสูงจึงส่งผลให้การสกัดเจลาตินได้สูง งานวิจัยของวรรณวิมล (2540) พบว่า หนังปลากะพงแดงมีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 65.84 โปรตีนร้อยละ 29.23 ไขมันร้อยละ 2.34 และเถ้าร้อยละ 2.57 จีรภา และนพพร (2556) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลาแซลมอนก่อนนำมาสกัดเจลาติน พบว่า มีความชื้นร้อยละ 68.14 โปรตีนร้อยละ 28.54 ไขมันร้อยละ 0.19 และเถ้าร้อยละ 3.12 นอกจากนี้ ปวเรศวร์ และนลินรัตน์ (2558) รายงานว่า หนังปลานิลมีความชื้นร้อยละ 67.29 โปรตีนร้อยละ 30.75 ไขมันร้อยละ 1.64 และเถ้าร้อยละ 0.25 ซึ่งเห็นได้ว่าหนังปลานวลจันทร์ทะเลมีปริมาณโปรตีนสูงที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการสกัดเจลาตินได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของหนังปลานวลจันทร์ทะเล

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	31.98 ± 2.01
ไขมัน	1.54 ± 0.34
ความชื้น	66.03 ± 4.60
เถ้า	0.15 ± 0.03

2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานวลจันทร์ทะเล

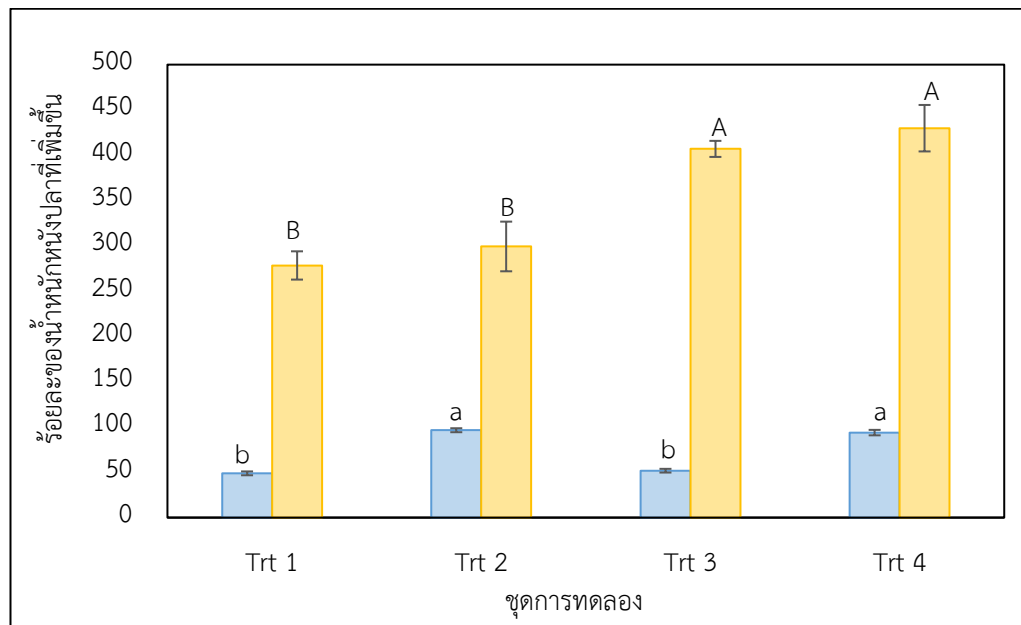
2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลานวลจันทร์ทะเล

จากการศึกษาเบื้องต้นในการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาเพื่อสกัดเจลาตินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการแช่หนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 M, 0.25 M และ 0.5 M เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ระดับความเข้มข้น 0.1 M หนังปลา มีการพองตัวน้อยที่สุด ไม่ใส มีสีขาวขุ่น ในขณะที่ระดับความเข้มข้น 0.5 M หนังปลา มีการพองตัว และมีความใสมากกว่าระดับความเข้มข้น 0.25 M แต่สังเกตเห็นลักษณะการเปื่อยยุ่ยของหนังปลา ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปปรับสภาพด้วยกรดในขั้นตอนถัดไป เนื่องจากเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้หนังปลาพองตัวได้มากขึ้น แต่หากใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้หนังปลาพองตัวมากขึ้นจนมีลักษณะเปื่อยยุ่ย ส่งผลให้โครงสร้างของคอลลาเจนเสียสภาพ หนังปลาที่ได้จึงไม่เหมาะสำหรับการทดลองในขั้นตอนการปรับสภาพด้วยกรด (วรรณวิมล,

2540) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hao *et al.* (2009) รายงานว่า การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะได้ร้อยละของผลผลิตที่เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลลดลง ดังนั้น จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 M สำหรับการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาในขั้นตอนแรกก่อนนำไปแช่ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเนื่องจากหนังปลาที่ได้มีการฟองตัวดี สี ไม่เปื่อยยุ่ย

จากการศึกษาระยะเวลาในการแช่หนังปลาที่ 12 และ 24 ชั่วโมง ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนนำไปแช่ในสารละลายกรดอะซิติกที่ 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่า การแช่หนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนแรก หนังปลาจะค่อย ๆ ฟองตัวขึ้น ได้ร้อยละของน้ำหนักหนังปลาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่หนังปลา ดังภาพที่ 5 การแช่หนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 24 ชั่วโมง (Trt 2 และ Trt 4) ทำให้ร้อยละของน้ำหนักหนังปลาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ 12 ชั่วโมง (Trt 1 และ Trt 3) Creighton, (1993) กล่าวว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึมผ่านเข้าไปรบกวนพันธะไฮโดรโฟบิกของคอลลาเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งทั้งสองพันธะนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้โครงสร้างของคอลลาเจนมีความคงตัว เมื่อพันธะถูกรบกวนจึงมีผลให้เส้นใยคอลลาเจนคลายตัวออก น้ำจึงสามารถซึมเข้าไปจับกับโมเลกุลภายในของคอลลาเจนจึงทำให้หนังปลาทองตัวและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จากการศึกษาเมื่อนำหนังปลาหลังแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาแช่ต่อด้วยสารละลายกรดอะซิติก เห็นได้ว่า ระยะเวลาการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อนำมาแช่ต่อด้วยสารละลายกรดอะซิติกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลผลิตของเจลาตินไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับการแช่ด้วยสารละลายกรดอะซิติกที่ 2 ชั่วโมง แต่หากเปรียบเทียบระยะเวลาในการแช่สารละลายกรดอะซิติกระหว่าง 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากสารละลายกรดเป็นตัวช่วยในการช่วยขจัดแร่ธาตุออกจากวัตถุดิบ และทำให้คอลลาเจนเกิดการจัดโครงสร้างทางกายภาพใหม่ (Ockerman, 1988; Peng *et al.*, 2022) ช่วยเพิ่มการฟองตัวของคอลลาเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดีขึ้น เหมาะสมต่อการสกัดเจลาติน และส่งผลให้ผลผลิตของเจลาตินเพิ่มขึ้น (Ali *et al.*, 2018; Rather *et al.*, 2022)

จากงานวิจัยที่ศึกษาคูณลักษณะของฟิล์มเจลาตินจากหนังปลา channel catfish (*Ictalurus punctatus*) ที่มีการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาที่ต่างกัน พบว่า ฟิล์มเจลาตินที่ขึ้นรูปจากเจลาตินที่ถูกปรับสภาพหนังปลาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.025 M แล้วตามด้วยกรดอะซิติก 0.09 M ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าฟิล์มเจลาตินที่ขึ้นรูปจากเจลาตินที่ถูกปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว (Zhang *et al.*, 2007) รวมถึงการปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาสเตอร์เจียนโดยการใช้ทั้งสารละลายต่างและกรด ยังช่วยลดการสูญเสียคอลลาเจนในระหว่างการสกัด ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของเจลและความหนืดของเจลาตินอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย (Hao *et al.*, 2009) ดังนั้น การปรับสภาพวัตถุดิบหนังปลาด้วยสารละลายต่างและกรดช่วยให้สกัดเจลาตินที่มีคุณภาพดีขึ้นได้



■ ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลาย NaOH

■ ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลาย NaOH และตามด้วยการแช่สารละลาย CH₃COOH

a, b, A, B อักษรที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

Trt 1 คือ การแช่หนังปลาด้วย 0.25 M NaOH 12 ชั่วโมง และ 0.25 M CH₃COOH 1 ชั่วโมง

Trt 2 คือ การแช่หนังปลาด้วย 0.25 M NaOH 24 ชั่วโมง และ 0.25 M CH₃COOH 1 ชั่วโมง

Trt 3 คือ การแช่หนังปลาด้วย 0.25 M NaOH 12 ชั่วโมง และ 0.25 M CH₃COOH 2 ชั่วโมง

Trt 4 คือ การแช่หนังปลาด้วย 0.25 M NaOH 24 ชั่วโมง และ 0.25 M CH₃COOH 2 ชั่วโมง

ภาพที่ 5 ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดอะซิติก

2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาติน

จากตารางที่ 2 ร้อยละของผลผลิตเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลอยู่ในช่วงร้อยละ 19.80–22.16 และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลอยู่ในช่วง 140.13–165.46 กรัม เมื่อพิจารณาการปรับสภาพวัตถุดิบที่สภาวะเดียวกัน แต่ใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดด้วยน้ำกลั่นที่สภาวะต่างกัน พบว่า T1 และ T2 ให้ร้อยละของผลผลิต และค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับ T3 และ T4 ในขณะที่ T5 และ T6 ปรับสภาพด้วยการแช่หนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24 ชั่วโมง ตามด้วยการแช่หนังปลาในสารละลายกรดอะซิติก 1 ชั่วโมง พบว่า T6 สกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ให้ร้อยละของผลผลิตสูงกว่า T5 ที่สกัดด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่มีค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สำหรับ T7 และ T8 มีการปรับสภาพหนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24 ชั่วโมง แช่หนังปลาในสารละลายกรดอะซิติก 2 ชั่วโมง และสกัดด้วยสภาวะที่ต่างกันให้ค่าร้อยละของผลผลิตไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ T8 มีการสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ได้ค่าความแข็งแรงของเจลอ้อยที่สุด ($p \leq 0.05$) แต่ยังมีค่าความแข็งแรงของเจลไม่ต่างกับเจลาตินทางการค้าจากหมู ($p > 0.05$) และมีค่าสูงกว่าเจลาตินทางการค้าจากวัว ($p \leq 0.05$) เห็นได้ว่าการปรับสภาพหนังปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24 ชั่วโมง ตามด้วยสารละลายกรดอะซิติก 2 ชั่วโมง และสกัดด้วย

น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที (T8) เป็นสภาวะที่รุนแรงเกินไปซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินที่ลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะการสกัดอื่น ๆ

จากงานวิจัยของเจนสิรา และคณะ (2549) ทดลองสกัดเจลาตินจากหนังปลานิลด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิการสกัดเพิ่มขึ้นหรือสูงเกินไป ทำให้ร้อยละของผลผลิตเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงของเจลลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของจิรภา และนพพร (2556) ศึกษาการสกัดเจลาตินหนังปลาแซลมอนที่อุณหภูมิ 45, 55 และ 65 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีร้อยละของผลผลิต 2.98, 6.35 และ 10.81 ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 12.80, 12.77 และ 10.17 กรัม นอกจากนี้ Limpisophon *et al.* (2009) รายงานว่าการสกัดเจลาตินจากหนังปลาฉลาม (Blue shark) ด้วยอุณหภูมิ 45, 60, 80 และ 100 °C ระยะเวลาตั้งแต่ 30–300 นาที พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการสกัดช่วยเพิ่มร้อยละของผลผลิตได้ แต่หากใช้อุณหภูมิสูงและเวลาที่มากเกินไปอาจทำให้ร้อยละของผลผลิตและค่าความแข็งแรงของเจลลดลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดการย่อยของโปรตีนหรือสายเพปไทด์เป็นพอลิเพปไทด์และกรดอะมิโน ซึ่งการย่อยสลายที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้เจลาตินไม่สามารถเกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติ (Junction zone) จึงไม่เกิดเจล (Karim and Bhat, 2009; Kittiphattanabawon *et al.*, 2010) ดังนั้น จึงเลือกชุดการทดลอง T2 สำหรับใช้เป็นสภาวะในการสกัดเจลาตินเพื่อศึกษาในขั้นต่อไป คือ การปรับสภาพหนังปลาโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 ชั่วโมง ตามด้วยการแช่หนังปลาในสารละลายกรดอะซิติก 1 ชั่วโมง และสกัดด้วยน้ำกลั่นที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เพราะให้ร้อยละของผลผลิตและค่าความแข็งแรงของเจลสูง และใช้ระยะเวลาปรับสภาพวัตถุดิบเร็วกว่าชุดการทดลองอื่นที่ให้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน โดยเจลาติน T2 มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีนร้อยละ 95.23±0.53 ไขมันร้อยละ 0.03±0.01 ความชื้นร้อยละ 4.40±0.22 และเถ้าร้อยละ 0.27±0.04 ซึ่งปริมาณเถ้าเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เจลาติน (มอก. 799–2548) คือ มีปริมาณเถ้าไม่เกินร้อยละ 2 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548)

ผลการวิเคราะห์น้ำหนักและชนิดของโปรตีนในเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล (ภาพที่ 6) พบว่า เจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลจากทุกสภาวะการทดลอง (8 ชุดการทดลอง) มีแถบโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก 3 แถบ คือ β -Chain มีมวลโมเลกุลประมาณ 250 kDa α 1-Chain และ α 2-Chain มีมวลโมเลกุลระหว่าง 100–150 kDa โดยเทียบกับโปรตีนมาตรฐาน (Protein Marker) และเมื่อเปรียบเทียบกับเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลทุกชุดการทดลองกับเจลาตินทางการค้าที่สกัดจากหมูและวัว พบว่า เจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลมีแถบโปรตีน β -Chain α 1-Chain และ α 2-Chain เข้มกว่าเจลาตินทางการค้า และโดยเฉพาะเจลาติน T2 มีแถบโปรตีน β -Chain α 1-Chain และ α 2-Chain ที่หนาและเข้มกว่าชุดการทดลองอื่น ซึ่งเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลจากทุกชุดการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับลักษณะแถบโปรตีนของเจลาตินจากหนังปลากลาย (พณัฐ, 2559) และเจลาตินจากหนังปลาอีสก (Ali *et al.*, 2018) นอกจากนี้ Cole (2000) รายงานว่า α -Chain ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100 kDa ทำให้เกิดความแข็งแรงของเจลมากที่สุด ส่วนโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า คือ β -Chain ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 200 kDa และ γ -Chain น้ำหนักโมเลกุล 300 kDa ตลอดจนไมโครเจล (Microgel) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300 kDa ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของเจลเพียงเล็กน้อย

น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนจะส่งผลต่อการเกิดโครงร่างตาข่ายของเจล รวมถึงค่าความแข็งแรงของเจล ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และอุทกพลศาสตร์ของสายโพลีเพปไทด์ในโครงข่ายเจล น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำสุดที่โปรตีนสามารถเกิดโครงร่างตาข่ายของเจลได้ คือ 23 kDa (Wang and Damodaran, 1990) โดยทั่วไปเจลาตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะให้ความแข็งแรงของเจลและความหนืดต่ำ ในขณะที่เจลาตินที่มี α -Chain มากทำให้เกิดความแข็งแรงของเจลมากขึ้น (Mariod and Adam, 2013; Hanani, 2016)

ตารางที่ 2 ร้อยละของผลผลิต และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่สกัดด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินทางการค้า

ตัวอย่าง	ร้อยละของผลผลิต	ค่าความแข็งแรงของเจล (กรัม)
T1	19.80±0.83 ^b	161.45±1.37 ^{ab}
T2	20.93±1.13 ^{ab}	165.46±2.76 ^a
T3	21.50±1.19 ^{ab}	159.05±8.30 ^{ab}
T4	21.54±0.84 ^{ab}	161.28±3.56 ^{ab}
T5	19.88±1.02 ^b	161.43±2.47 ^{ab}
T6	22.16±0.90 ^a	156.76±4.31 ^{ab}
T7	21.36±1.31 ^{ab}	156.14±5.39 ^b
T8	21.49±0.86 ^{ab}	140.13±5.41 ^c
เจลาตินทางการค้า (จากหมู)	-	138.21±2.45 ^c
เจลาตินทางการค้า (จากวัว)	-	126.79±4.51 ^d

a, b, A, B ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรยกกำลังแตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

T1 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T2 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T3 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

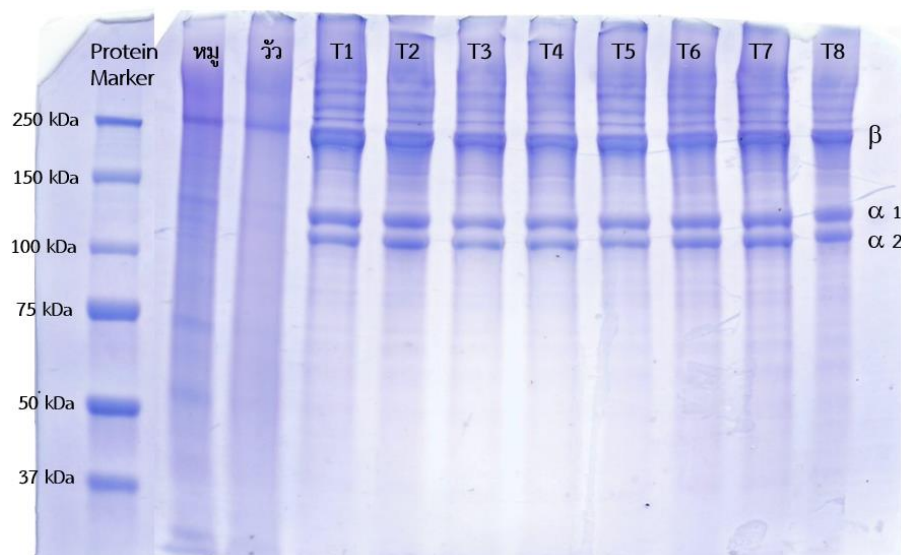
T4 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T5 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T6 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T7 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 55 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T8 คือ การแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH₃COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 6 แอโบโปรตีนของเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่สกัดด้วยสภาวะต่างกันด้วยวิธี SDS-PAGE

หมายเหตุ: หมู คือ เจลาตินทางการค้าที่สกัดจากหมู วัว คือ เจลาตินทางการค้าที่สกัดจากวัว

T1 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 55°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T2 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T3 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 55°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T4 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 12 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T5 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 55°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T6 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 1 ชั่วโมง และสกัดที่ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

T7 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 55°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

T8 คือ เจลาตินที่ได้จากการแช่หนังปลาใน NaOH 24 ชั่วโมง ตามด้วย CH_3COOH 2 ชั่วโมง และสกัดที่ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

3. ผลการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเล

3.1 ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ความหนาของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมพลาสติกไซเซอรที่แตกต่างกัน คือ กลีเซอรอล และกรดโอเลอิก พบว่า ฟิล์มเจลาตินที่ผสมกลีเซอรอล (GG) มีความหนา 0.057 ± 0.004 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาน้อยกว่าฟิล์มเจลาตินที่ผสมกรดโอเลอิก (GO) ที่มีความหนา 0.068 ± 0.003 มิลลิเมตร แต่ความหนาของฟิล์มทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยความหนาของฟิล์มทั้งสองชนิดมีความหนาอยู่ในช่วงของฟิล์มบรรจุเชิงพาณิชย์ซึ่งมีความหนา 0.025–0.075 มิลลิเมตร (Allahvaisi, 2012) สอดคล้องกับงานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษาฟิล์มโปรตีนละลายน้ำของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไซเซอร คือ กลีเซอรอลและกรดโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า ลักษณะของฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลมีความนิ่มและบาง ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิกที่มีความหนากว่า ส่วน Debora *et al.* (2020) ศึกษาผลของกรดโอเลอิกต่อความหนาของฟิล์มบรีโอกได้ พบว่า ฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมกรดโอเลอิกมีความหนาประมาณ 0.050 มิลลิเมตร ซึ่งหนาน้อยกว่าฟิล์มที่เติมกรดโอเลอิกเข้มข้นร้อยละ 20 มีความหนาประมาณ 0.075 มิลลิเมตร เมื่อความเข้มข้นของกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น

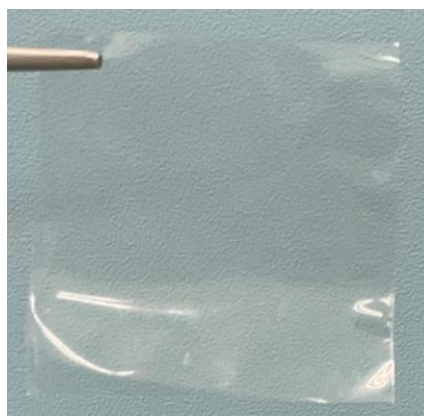
3.2 ค่าสี (L^* , a^* และ b^*)

จากตารางที่ 3 แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ของฟิล์มเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมพลาสติกไฮเซอรอลที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์ม GG มีค่า L^* มากกว่าฟิล์ม GO โดยฟิล์ม GG ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มใส ไม่มีสี ในขณะที่ฟิล์ม GO มีลักษณะฟิล์มขาวขุ่นเล็กน้อย ดังภาพที่ 7 เช่นเดียวกับงานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษาฟิล์มโปรตีนละลายน้ำได้ของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไฮเซอรอลและกรดโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลมีสีเหลืองเข้มและใส ส่วนฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิกมีสีเหลืองนวลและขุ่น ปวเรศวร์ (2551) ศึกษาฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนเนื้อปลาสาวย และกิตติมา และคณะ (2561) ศึกษาฟิล์มเจลลาตินจากหนังปลานิลที่เติมกลีเซอรอล พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อค่าสีของฟิล์ม คือ เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง L^* ของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มมีความสว่างและความโปร่งใสมากขึ้น และ Taqi *et al.* (2011) ศึกษาผลของกรดโอเลอิกต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนบริโกลได้จากไข่ขาว พบว่า ฟิล์มที่เติมกรดโอเลอิกร้อยละ 1 และ 1.5 มีค่า L^* เท่ากับ 92.39 และ 90.98 ตามลำดับ เห็นได้ว่า ปริมาณกรดโอเลอิกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีค่า L^* ลดลง ดังนั้นฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรอลจะมีความใสและสว่างกว่าฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิก ส่วนค่า a^* ซึ่งหากมีค่า + แสดงถึงค่าทางสีแดง และค่าเป็น - แสดงถึงค่าทางสีเขียว ฟิล์ม GG และ GO ให้ค่า - ซึ่งแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีค่าไปทางสีเขียว ในขณะที่ค่า b^* หากมีค่า + แสดงถึงค่าทางสีเหลือง และค่าเป็น - แสดงถึงค่าทางสีน้ำเงิน โดยฟิล์ม GG และ GO ให้ค่า + ซึ่งแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีค่าไปทางสีเหลือง

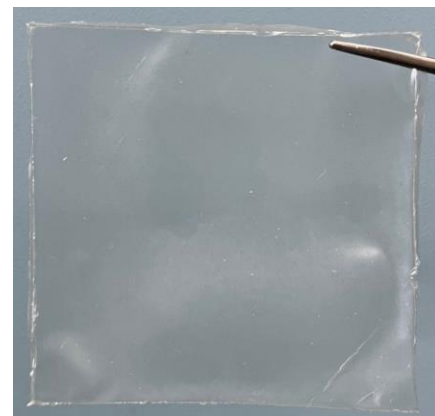
ตารางที่ 3 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของฟิล์มเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)

ตัวอย่าง	ค่า L^*	ค่า a^*	ค่า b^*
GG	30.96 ± 0.48^a	-0.51 ± 0.03^b	1.48 ± 0.06^a
GO	24.74 ± 0.53^b	-0.29 ± 0.02^a	0.53 ± 0.04^b

^{a, b} ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรยกกำลังแตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



ฟิล์มเจลลาตินที่ผสมกลีเซอรอล (GG)



ฟิล์มเจลลาตินที่ผสมกรดโอเลอิก (GO)

ภาพที่ 7 ลักษณะของแผ่นฟิล์มเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)

3.3 ค่าการส่องผ่านของแสงและค่าความโปร่งแสง

จากตารางที่ 4 ร้อยละการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และค่าความโปร่งแสง (Transparency) ของฟิล์มเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมพลาสติกไฮเซอรอลที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ทุกความยาวคลื่น ฟิล์ม GG ให้ ค่า % Transmittance สูงกว่าฟิล์ม GO ($p \leq 0.05$) ซึ่ง % Transmittance หากมีค่าสูงแสดงถึงความใสของฟิล์มที่แสงสามารถส่องผ่านได้ หากมีค่าต่ำแสดงถึงความขุ่นของฟิล์ม ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Transparency หากค่า Transparency สูง แสดงว่าฟิล์มมีความขุ่น แสงสามารถผ่านได้น้อย สอดคล้องกับลักษณะความใสของฟิล์ม GG และความขุ่นของฟิล์ม GO ดังภาพที่ 7 สำหรับช่วงความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร ทั้งฟิล์ม GG และ GO มีค่า % Transmittance ในช่วงคลื่นแสง UV ต่ำ (200-280 นาโนเมตร) แสดงว่าฟิล์มทั้งสองมีความสามารถในการป้องกันการส่องผ่านของแสง UV ได้ดี เนื่องจากฟิล์มโปรตีนมีกรดอะมิโนที่มีวงแหวน (aromatic amino acid) เป็นองค์ประกอบที่สามารถช่วยดูดซับแสง UV ได้ (Hamaguchi *et al.*, 2007) Jongjareonrak *et al.* (2006) ศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มเจลลาตินบริโกลได้จากหนังปลาทูนาและปลากะพงแดงข้างแถว พบว่าการเติมกลีเซอรอลในปริมาณที่สูงทำให้ค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรอลที่ไม่มีสี จึงสามารถเพิ่มการส่องผ่านของแสงของฟิล์มได้ โดยฟิล์มมีค่าร้อยละการส่องผ่านแสง UV ที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร มีค่า % Transmittance เท่ากับ 0.3 และที่ความยาวคลื่น 400, 600 และ 800 นาโนเมตร % Transmittance อยู่ในช่วง 76.8–85.1 ซึ่งสูงกว่าฟิล์ม GG ที่อยู่ในช่วง 59.626–71.331 นอกจากนี้ การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งช่วงแสง UV และช่วงแสงที่มองเห็นได้ (200–800 นาโนเมตร) ลดลง แสดงว่า แสงสามารถผ่านฟิล์มได้น้อย เมื่อความเข้มข้นของโปรตีนในฟิล์มเพิ่มขึ้นและฟิล์มมีความหนามากขึ้น จึงช่วยดูดซับแสงได้มากกว่าฟิล์มที่มีปริมาณโปรตีนและความหนาน้อยกว่า

ลักษณะของฟิล์ม GG และ GO สอดคล้องกับงานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษาฟิล์มโปรตีนละลายน้ำของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไฮเซอรอลชนิดกลีเซอรอลและโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลมีความใสมากกว่าฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิก นอกจากนี้ ปวเรศวร์ (2551) ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนปลาสาวย พบว่า ฟิล์มที่ใช้ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 25 มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงต่ำที่สุดในทุกช่วงคลื่นแสง คือ 0.9–62.6 ในขณะที่ฟิล์มที่ใช้ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 45 มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงสูงที่สุดในทุกช่วงคลื่นแสง คือ 1.3–69.3 ดังนั้น ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเจือจางโปรตีนโดยกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารไม่มีสี ฟิล์มจึงมีความใสเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ร้อยละการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และค่าความโปร่งใส (Transparency) ของฟิล์มเจลลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)

ตัวอย่าง	% Transmittance ที่ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)				Transparency
	200	400	600	800	
GG	0.019 ± 0.004^a	59.626 ± 3.770^a	68.881 ± 3.446^a	71.331 ± 3.076^a	1.93 ± 0.25^b
GO	0.005 ± 0.001^b	46.195 ± 2.554^b	53.853 ± 2.525^b	56.492 ± 2.526^b	3.42 ± 0.21^a

^{a, b} ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีอักษรยกกำลังแตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3.4 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดเมื่อขาด

จากตารางที่ 5 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความยืดเมื่อขาดของฟิล์มเจลาตินหนังปลา นวลจันทร์ทะเลที่ผสมพลาสติกไฮเซอรที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์ม GG มีค่าความต้านทานแรงดึง 2.53 ± 0.12 MPa น้อยกว่าฟิล์ม GO ที่มีค่าเท่ากับ 5.46 ± 0.92 MPa แต่ฟิล์ม GG ให้ค่าความยืดเมื่อขาดเท่ากับร้อยละ 98.61 ± 1.41 มากกว่าฟิล์ม GO ที่มีค่าเพียงร้อยละ 1.52 ± 0.43 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกลีเซอรอลช่วยให้ฟิล์ม มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้น จึงมีค่าความยืดเมื่อขาดสูงและมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อย ในขณะที่ฟิล์มที่ผสม กรดโอเลอิกไม่มีความยืดหยุ่น ดังนั้น จึงมีค่าความยืดเมื่อขาดน้อยแต่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง สอดคล้องกับ งานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษาฟิล์มโปรตีนละลายน้ำของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไฮเซอรชนิด กลีเซอรอลและกรดโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า ฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิกมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 34.30 MPa ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลที่มีค่าเพียง 2.15 MPa เนื่องจากกรดโอเลอิกเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโมเลกุลยาว จึงสามารถเข้าไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลโปรตีนและเรียงตัวกัน ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงต่างจากกลีเซอรอล ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก มีโครงสร้างเป็นน้ำตาลของแอลกอฮอล์ส่งผลให้ฟิล์มมีความอ่อนตัวมากจึงใช้แรงดึงน้อยกว่า กลีเซอรอลทำให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง แต่มีค่าความยืดเมื่อขาดสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ กลีเซอรอลแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของฟิล์ม และไปลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของโปรตีน ทำให้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลโปรตีนลดลง เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลโปรตีนเพิ่มขึ้นสายโซ่โปรตีนจึงเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง จึงส่งผลให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้น (ปรมาภรณ์, 2545; ปาเรศวร์, 2551; กิตติมา และคณะ, 2561) นอกจากนี้ Nur Hanani *et al.* (2013) รายงานว่า กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรที่ สามารถลดแรงระหว่างโมเลกุลของโปรตีน ช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นและความสามารถในการยืดตัวของฟิล์ม เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำสูง ฟิล์มจึงสามารถดูดน้ำได้มากส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความยืดเมื่อขาดของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa)	ค่าความยืดเมื่อขาด (%)
GG	2.53 ± 0.12^b	98.61 ± 1.41^a
GO	5.46 ± 0.92^a	1.52 ± 0.43^b

^{a, b} ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรยกกำลังแตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3.5 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ

จากตารางที่ 6 ฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสมกลีเซอรอล (GG) มีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่า ฟิล์มกรดโอเลอิก (GO) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ $4.40 \pm 2.06 \times 10^{-9}$ และ $3.69 \pm 1.75 \times 10^{-9}$ g m⁻¹ s⁻¹ Pa⁻¹ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cuq *et al.* (1997) ที่ศึกษาผลของ Hydrophilic Plasticizers ต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์มโปรตีนจากปลา พบว่า การใช้ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้ ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่มีความชอบน้ำ และสามารถเข้าไปแทรกตัวตาม โครงร่างตาข่ายของโปรตีน ทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง จึงเกิดการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น Tanaka *et al.* (2001) ศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอรต่อคุณสมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากเนื้อปลากระโทงแทงสีน้ำเงิน

(Makaira mazara) พบว่า พิล์มที่ใช้กลีเซอรอลร้อยละ 50 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำ $11.95 \times 10^{-11} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ สูงกว่า พิล์มที่ใช้กรดโอเลอิกที่ปริมาณเท่ากัน ที่มีค่า $2.5 \times 10^{-11} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ประมาณ (2545) ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ ต่อคุณสมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนละลายน้ำจากปลาทรายแดง พบว่า พิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 40 50 และ 60 มีค่าการซึมผ่านไอน้ำ 1.49×10^{-10} 1.88×10^{-10} และ $2.03 \times 10^{-10} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น พิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของบวรสวรรค์ (2551) ศึกษาผลของ ปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนเนื้อปลาทราย พบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น และจากงานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษาฟิล์มโปรตีนละลายน้ำ ของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลและกรดโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า พิล์มโปรตีนที่ละลายน้ำของ เนื้อปลาที่ใช้กลีเซอรอลมีค่าการซึมผ่านไอน้ำ $1.42 \times 10^{-13} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ สูงกว่าฟิล์มที่ใช้กรดโอเลอิกที่มีค่าเท่ากับ $0.35 \times 10^{-13} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ชอบน้ำซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ฟิล์มจึง สามารถดูดน้ำได้มากทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำสูง (Limpisophon *et al.*, 2009) นอกจากนี้ Limpisophon *et al.*, 2010 ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มอิมัลชันของกรดไขมันและเจลาตินจากหนังปลาฉลามสีน้ำเงิน พบว่า การเติม กรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันเข้าไปในฟิล์มสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านไอน้ำได้

ตารางที่ 6 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลที่ผสม กลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO)

ตัวอย่าง	การซึมผ่านของไอน้ำ ($\times 10^{-9} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	การซึมผ่านออกซิเจน ($\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$)
GG	4.40 ± 2.06^a	197.43 ± 63.96^a
GO	3.69 ± 1.75^b	9.39 ± 3.71^b

^{a, b} ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีอักษรยกกำลังแตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3.6 ค่าการซึมผ่านออกซิเจน

ฟิล์มเจลาตินหนังปลานวลจันทร์ทะเลผสมกลีเซอรอล (GG) มีค่าการซึมผ่านออกซิเจนสูงกว่าฟิล์มกรด โอเลอิก (GO) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าการซึมผ่านออกซิเจนเท่ากับ 197.43 ± 63.96 และ $9.39 \pm 3.71 \text{ cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 6) สอดคล้องกับงานวิจัยของระพีพรรณ และคณะ (2558) ศึกษา ฟิล์มโปรตีนละลายน้ำของเนื้อปลาที่ใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลและกรดโอเลอิกที่ระดับเท่ากัน พบว่า พิล์มที่ ใช้กรดโอเลอิกมีค่าการซึมผ่านออกซิเจนต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล เนื่องจากกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันที่มี โครงสร้างเป็นคาร์บอนสายยาวที่เรียงตัวภายในเนื้อฟิล์มอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้ต้านทานการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่ดีของฟิล์มเจลาตินในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน สามารถช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน ของไขมันและการเสื่อมสภาพของสีในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แช่แข็งได้ (Gennadios *et al.*, 1994; Krochta and Johnston, 1997) Villegas *et al.* (1999) พบว่า การเคลือบเจลาตินบนชิ้นแฮมและเบคอนปรุงสุกที่ เก็บรักษาแบบแช่แข็ง สามารถช่วยลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มความคงตัวให้กับสีของผลิตภัณฑ์ Nur Hanani *et al.* (2013) ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์มเจลาติน พบว่า พิล์มที่เติมกลีเซอรอลมี ค่าการซึมผ่านออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจากร้อยละ 0.2 เป็น 1.1 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกลีเซอรอล ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลของโปรตีนลดลง และมี

การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ออกซิเจนสามารถซึมผ่านได้มากขึ้น และ Kim *et al.* (2012) รายงานว่า ความสามารถในการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์มมีอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนาของฟิล์ม ชนิด และปริมาณพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งฟิล์มทางการค้าต้องมีการซึมผ่านออกซิเจนต่ำ โดยฟิล์มเจลลาตินปลาทูน่ามีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจน $5.3 \text{ cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ในขณะที่ฟิล์มเจลลาตินจากหมูเท่ากับ $7.4 \text{ cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ แสดงว่าฟิล์มเจลลาตินปลาทูน่าสามารถใช้เป็นวัสดุบรรจุอาหารได้ดีกว่าฟิล์มเจลลาตินจากหมูเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันหรือการเสื่อมคุณภาพที่เกิดจากออกซิเจน

จากคุณสมบัติที่ดีในการซึมผ่านออกซิเจนที่ต่ำของฟิล์มเจลลาตินสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ หรือการทำแคปซูลในอุตสาหกรรมอาหารและยา เพื่อลดการเกิดออกซิเดชันและยืดอายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์ เช่น งานวิจัยของ Ali *et al.* (2020) ศึกษาคุณภาพของแครกเกอร์ปลาที่บรรจุในถุงเจลลาติน พบว่า ถุงที่ทำจากเจลลาตินสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชันสูงได้

3.7 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มเจลลาติน

ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มเจลลาตินที่ผสมกลีเซอรอล (GG) และกรดโอเลอิก (GO) มีค่าร้อยละ 32.22 ± 0.93 และ 27.35 ± 1.10 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติชอบน้ำ จึงทำให้มีค่าการละลายที่สูงกว่ากรดโอเลอิกที่เป็นกรดไขมันซึ่งไม่ชอบน้ำ ประมาณ (2545) ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนละลายน้ำจากปลาทรายแดง พบว่า ฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 40, 50 และ 60 มีค่าร้อยละการละลายอยู่ที่ 50.10, 50.33 และ 65.65 ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ ฟิล์มจะมีค่าการละลายสูงขึ้น เช่นเดียวกับ ปวเรศวร์ (2551) ศึกษาปริมาณของกลีเซอรอลต่อค่าการละลายของฟิล์มบริโกลได้จากโปรตีนปลาทราย พบว่า ฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 25, 35 และ 45 มีค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 23.46 ± 6.36 , 26.49 ± 8.78 และ 30.54 ± 5.90 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการละลายของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารประกอบที่ชอบน้ำและละลายน้ำได้สูง เมื่อนำไปทดสอบการละลายโดยการแช่น้ำจึงทำให้ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเกิดการละลายได้มากขึ้น ในขณะที่ Taqi *et al.* (2011) ศึกษาผลของกรดโอเลอิกต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนบริโกลได้จากไข่ขาว พบว่า ฟิล์มที่เติมกรดโอเลอิกร้อยละ 1 และ 1.5 มีค่าการละลายประมาณร้อยละ 40 และ 30 ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดโอเลอิกทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มลดลง เนื่องจากกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ

สรุปผลการทดลอง

1. หนึ่งปลานวลจันทร์ทะเลมีความชื้นร้อยละ 66.03 โปรตีนร้อยละ 31.98 ไขมันร้อยละ 1.54 และเถ้าร้อยละ 0.15 ซึ่งจัดเป็นหนึ่งปลาที่มีปริมาณโปรตีนสูง สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับสกัดเจลาตินได้
2. ร้อยละของผลผลิตเจลาตินหนึ่งปลานวลจันทร์ทะเลอยู่ในช่วงร้อยละ 19.80–22.16 และค่าความแข็งแรงของเจลจากเจลาตินหนึ่งปลานวลจันทร์ทะเลอยู่ในช่วง 140.13–165.46 กรัม โดยสมภาวะการสกัดเจลาตินที่ให้ค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่สุด คือ การปรับสภาพหนึ่งปลาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 M เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตามด้วยการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดอะซิติก 0.25 M เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสกัดเจลาตินออกจากหนึ่งปลาด้วยน้ำกลั่นที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยเจลาตินที่ได้มีโปรตีนร้อยละ 95.23 ± 0.53 ไขมันร้อยละ 0.03 ± 0.01 ความชื้นร้อยละ 4.40 ± 0.22 และเถ้าร้อยละ 0.27 ± 0.04
3. เจลาตินหนึ่งปลานวลจันทร์ทะเลจากทุกชุดการทดลองมีแถบโปรตีนซึ่งแสดงน้ำหนักและชนิดของโปรตีน 3 แถบเป็นองค์ประกอบหลัก คือ β -Chain มีมวลโมเลกุลประมาณ 250 kDa $\alpha 1$ -Chain และ $\alpha 2$ -Chain มีมวลโมเลกุลระหว่าง 100–150 kDa และเจลาตินหนึ่งปลานวลจันทร์ทะเลมีแถบโปรตีนทั้ง 3 แถบ เข้มกว่าเจลาตินทางการค้าที่สกัดจากหมูและวัว
4. ฟิล์มเจลาตินผสมกลีเซอรอล (GG) มีลักษณะใส นิ่ม และยืดหยุ่น มีค่า L^* ค่าการส่องผ่านของแสง ค่าความยืดเมื่อขาด ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ค่าการซึมผ่านออกซิเจน และค่าการละลายสูงกว่าฟิล์มเจลาตินผสมกรดโอเลอิก (GO) ในขณะที่ฟิล์ม GO มีลักษณะขุ่น แข็งเปราะ ไม่ยืดหยุ่น มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า แต่สามารถป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและการซึมผ่านออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์ม GG

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณข้าราชการ และเจ้าหน้าที่ของกองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ ที่เป็นกำลังสำคัญ และช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กิตติมา สีละพงศ์วัฒนา, ปิยวรรณ กิติทรัพย์, ผกาพรรณ กันธะมูล, ปัทมาภรณ์ อินมา, เจนจิรา นิเวศน์ และ ชีระพล เสนพันธ์. 2561. การผลิตและปรับปรุงลักษณะของฟิล์มเจลาตินจากหนึ่งปลานิลที่เติมกลีเซอรอล. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2561. วันที่ 11-13 ธันวาคม 2561. ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา, มหาวิทยาลัยแม่โจ้. หน้า 333-342.
- กรมประมง. 2560. กรมประมงโซ้งงานสุดเจ๋ง เปลี่ยนเศษหนึ่งปลานิลเหลือทิ้งเป็นคอลลาเจนคุณภาพสูง. แหล่งที่มา: https://www4.fisheries.go.th/index.php/dof/activity_item/1192. 9 พฤศจิกายน 2565.

- กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ. 2561. การแปรรูปสัตว์น้ำ. ห้างหุ้นส่วนจำกัดวนิดาการพิมพ์, นนทบุรี. 81 หน้า.
- กองวิจัยเศรษฐกิจการค้ามหภาค สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า. 2563. การศึกษาอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ซึ่งการส่งออกสร้างรายได้เข้าประเทศอย่างแท้จริง. แหล่งที่มา: <http://www.tpsoc.moc.go.th/sites/default/files/phlkaarsueksaautsaakhrmaahaaraelaekhruuengduuem.pdf>. 24 มกราคม 2566.
- จิรวรรณ แยมประยูร. 2532. การบริโภคปลานวลจันทร์ทะเล. วารสารการประมง 42 (4): 317-319.
- จิรภา หินขุย และ นวพร วรรณวิศาล. 2556. การสกัดคอลลาเจนและเจลาตินจากเศษเหลือของการแปรรูปปลาแชลมอน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 28 หน้า.
- เจนสิรา บุญญติวงศ์, เพียว พวงพัว และ อัมพร สาธุนิชกุล. 2549. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเจลาตินจากหนังปลานิล. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. 66 หน้า.
- ชาติชาย ศิริพัฒน์. 2559. ปลานวลจันทร์ทะเล หนึ่งเดียวในพระราชกระแสรับสั่ง. แหล่งที่มา: <https://www.thairath.co.th/content/649497>. 18 มกราคม 2566.
- ดำรงพล คำแหงวงศ์, สาโรจน์ รอดคีน และ พันธสิริ สุทธิลักษณ์. 2554. การพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากเจลาตินหนังปลาโดยการเสริมสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์. ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 46 หน้า.
- ตระกูล พรหมจักร. 2552. การสกัดเจลาตินจากหนังปลาเหาะ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 108 หน้า.
- หัตถดาว ภาชีผล, ชลิตดา ชัยวิเศษ, นิตยา กระแสจันทร์ และ สุประภา บุญตา. 2559. สมบัติเชิงหน้าที่ของเจลาตินจากวัสดุเศษเหลือของปลาเขี้ยวมรกต. ใน: การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย. ครั้งที่ 12. วันที่ 8-9 พฤศจิกายน 2559. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม. หน้า 296-304.
- นักสิทธิ์ ปัญญาใหญ่. 2561. การสกัดและคุณลักษณะของเจลาตินสกัดจากหนังกระป๋อง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. 82 หน้า.
- นีสานารถ กระแสชล, วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล และ สิริมา ชินสาร. 2561. การใช้หนังปลาที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอาหารเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์คล้ายกระเพาะปลา. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยบูรพา. 91 หน้า.
- ปกรณ์ อินทรดิษฐ์. 2546. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลานวลจันทร์ทะเล (*Chanos chanos*) บรรจุกระป๋อง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 126 หน้า.

- ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์. 2545. การผลิตและการเก็บรักษาฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีนละลายน้ำจากปลาทรายแดง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 152 หน้า.
- ปวเรศวร์ อินทุเศรษฐ. 2551. การพัฒนาฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีนปลาน้ำจืด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 87 หน้า.
- ปวเรศวร์ อินทุเศรษฐ และ นลินรัตน์ จิระเดชประไพ. 2558. การสกัดคอลลาเจนที่ละลายในกรดจากหนังปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 6/2558. กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 26 หน้า.
- พนัญฐ กิตติพัฒน์บวร. 2559. ผลของระยะเวลาในการทำให้หนังฟองตัวต่อคุณลักษณะ และสมบัติของเจลเจลาตินจากหนังปลากลาย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยทักษิณ. 40 หน้า.
- ภัทรนันท์ ทวดอาจ, ศรัณญา มณีทอง และ ธัญพรรณ ฮ่อบรรทัด. 2563. พลาสติกชีวภาพ: วัสดุทางเลือก. คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, บุรีรัมย์. 13 หน้า.
- ระพีพรรณ สายแวว, ปวเรศวร์ อินทุเศรษฐ และ ชไพรพร ควบพิมาย. 2558. การใช้พลาสติกไซเซอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้จากโปรตีนที่ละลายน้ำของเนื้อปลา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 7/2558. กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 34 หน้า.
- วัชรี้ คงรัตน์ และ อรรพรรณ คงพันธุ์. 2558. การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปลานวลจันทร์ทะเล (*Chanos chanos*, Forskal). กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 61 หน้า.
- วรรณวิมล คล้ายประดิษฐ์. 2540. การผลิตเจลาตินจากหนังปลากระพงแดง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 135 หน้า.
- วราทิพย์ สมบุญญฤทธิ, สมเกียรติ พันธะระ และ เรณู รัตนเอี่ยมพงศา. 2535. กระบวนการฆ่าเชื้อที่เหมาะสมของปลานวลจันทร์ทะเลต้มเค็มบรรจุกระป๋อง. วารสารการประมง 45 (5): 1027-1033.
- สาโรจน์ รอดคีน. 2556. เจลาติน: การสกัดและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์. แหล่งที่มา: <https://agro-industry.mfu.ac.th/events/482>. 2 พฤศจิกายน 2565.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2548. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม: เจลาติน. มอก. 799-2548.
- สินีนารถ สุขไกว. 2555. การผลิตเจลาตินและเจลาตินไฮโดรไลเสทจากหนังปลาสำหรับการพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 188 หน้า.
- AOAC. 2019. Official methods of analysis of AOAC International 21th ed. AOAC International, USA.

- Ahmed, M. A., H. A. Al-Kahtani, I. Jaswir, H. A. Tarboush and E. A. Ismail. 2020. Extraction and Characterization of Gelatin from Camel Skin (Potential Halal Gelatin) and Production of Gelatin Nanoparticles. *Saudi J. Biol. Sci.* 27: 1596–1601.
- Ali, M. M. A., H. Kishimura and S. Benjakul. 2018. Physicochemical and Molecular Properties of Gelatin from Skin of Golden Carp (*Probarbus Jullien*) as Influenced by Acid Pretreatment and Prior-Ultrasonication. *Food Hydrocolloid.* 82: 164-172.
- Ali, A. M. M., K. Caba, T. Prodpran and S. Benjakul. 2020. Quality Characteristics of Fried Fish Crackers Packaged in Gelatin Bags: Effect of Squalene and Storage Time. *Food Hydrocolloid.* 99: 1-12.
- Allahvaisi, S. 2012. Polypropylene in the Industry of Food Packaging. In: Dogan, F. (ed.). Polypropylene. InTech, Croatia. pp. 10-11.
- Alves, A. L., F. J. Fraguas, A. C. Carvalho, J. Valcárcel, R. I. Pérez-Martín, R. L. Reis, J. A. Vázquez and T.H. Silva. 2022. Characterization of Codfish Gelatin: A Comparative Study of Fresh and Salted Skins and Different Extraction Methods. *Food Hydrocolloid.* 124: 1-13.
- Arfat, Y. A., S. Benjakul, T. Prodpran and K. Osako. 2014. Development and Characterisation of Blend Films Based on Fish Protein Isolate and Fish Skin Gelatin. *Food Hydrocolloid.* 39: 58-67.
- ASTM. 2010. Standard test method for water vapor transmission of materials E96/E96M-10. Annual Book of ASTM Standards 04.06 : 1-12.
- ASTM. 2012. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting D882-12. Annual Book of ASTM Standards 08.01 : 1-12.
- ASTM. 2017. Standard test method for oxygen gas transmission rate through plastic film and sheeting using a coulometric sensor D3985-17. Annual Book of ASTM Standards 15.10 : 1-7.
- Benjakul, S., P. Kittiphattanabawon and J. M. Regenstein. 2012. Fish Gelatin. In: Simpson, B. K. (ed.). Food Biochemistry and Food Processing Second Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York. pp. 388-405.
- Boran, G. and J. M. Regenstein. 2010. Fish Gelatin. *Advances in Food and Nutrition Research.* 60: 119–143.
- Creighton, T. E. 1993. Proteins: Structures and Molecular Properties Second Edition. W. H. Freeman, New York. 512 pp.

- Cole, C. G. B. 2000. Gelatin. In: Frederick, J. F. (ed.). Encyclopedia of Food Science and Technology Second Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York. pp. 1183-1188.
- Cuq, B., N. Gontard, J. L. Cuq and S. Guilbert. 1997. Selected Functional Properties of Fish Myofibrillar Protein-Based Films as Affected by Hydrophilic Plasticizers. *J. Agr. Food Chem.* 45: 622-626.
- Debora, K., E. Rochima and C. Panatarani. 2020. Effect the Addition of Oleic Acid on Water Barrier Properties of Edible Films. *Global Scientific Journals.* 8 (2): 3832-3837.
- Di Giorgio, L., P. R. Salgado and A. N. Mauri. 2019. Encapsulation of Fish Oil in Soybean Protein Particles by Emulsification and Spray Drying. *Food Hydrocolloid.* 87: 891-901.
- Gennadios, A., M. A. Hanna and L. B. Kurth. 1997. Application of Edible Coatings on Meats, Poultry and Seafoods: A Review. *LWT - Food Sci. Technol.* 30 (4): 337-350.
- Gilsenan, P. M. and S. B. Ross-Murphy. 2000. Rheological Characterisation of Gelatins from Mammalian and Marine Sources. *Food Hydrocolloid.* 14 (3): 191-195.
- Gómez-Guillén, M. C. and P. Montero. 2001. Extraction of Gelatin from Megrim (*Lepidorhombus boscii*) Skin with Several Organic Acids. *J. Food Sci.* 66 (2): 213-216.
- Gómez-Guillén, M. C., M. Pérez-Mateos, J. Gómez-Estaca, E. López-Caballero, B. Giménez and P. Montero. 2009. Fish Gelatin: A Renewable Material for Developing Active Biodegradable Films. *Trends Food Sci. Tech.* 20 (1): 3-16.
- Gontard, N. and S. Guilbert. 1994. Bio-Packaging: Technology and Properties of Edible and/or Biodegradable Material of Agricultural Origin. In: Mathlouthi, M. (ed.). Food Packaging and Preservation. Blackie Academic & Professional, London. pp. 159-181.
- Hamaguchi, P. Y., W. WuYin and M. Tanaka. 2007. Effect of pH on the Formation of Edible Films Made from the Muscle Proteins of Blue Marlin (*Makaira mazara*). *Food Chem.* 100 (3): 914-920.
- Hao, S., L. Li, X. Yang, J. Cen, H. Shi, Q. Bo and J. He. 2009. The Characteristics of Gelatin Extracted from Sturgeon (*Acipenser baeri*) Skin Using Various Pretreatment. *Food Chem.* 115 (1): 124-128.
- Haug, I. J. and K. I. Draget. 2011. Gelatin. In: Williams, P. A. and G. O. Phillips (eds.). Handbook of Hydrocolloids. Woodhead Publishing, Cambridge. pp. 142-163.
- ISO. 1998. Meat and meat products-Determination of total ash. Switzerland.

- Johnston-Banks, F. A. 1990. Gelatin. In: Harris, P. (ed.). Food Gel. Elsevier Applied Science, London. pp. 233-289.
- Jongjareonrak, A., S. Benjakula, W. Visessanguanb, T. Prodpranc and M. Tanaka. 2005a. Isolation and Characterisation of Acid and Pepsin-Solubilised Collagen from Brownstripe Red Snapper (*Lutjanus vitta*) Skin. *Food Chem.* 93 (3): 475–484.
- Jongjareonrak, A., S. Benjakula, W. Visessanguanb, T. Prodpranc and M. Tanaka. 2005b. Isolation and Characterization of Collagen from Bigeye Snapper (*Priacanthus macracanthus*) Skin. *J. Sci. Food Agr.* 85 (7): 1203–1210.
- Jongjareonrak, A., S. Benjakula, W. Visessanguanb, T. Prodpranc and M. Tanaka. 2006. Characterization of Edible Films from Skin Gelatin of Brown Stripe Red Snapper and Bigeye Snapper. *Food Hydrocolloid.* 20: 492–501.
- Karim, A. A. and R. Bhat. 2009. Fish Gelatin: Properties, Challenges and Prospects as an Alternative to Mammalian Gelatins. *Food Hydrocolloid.* 23 (3): 563-576.
- Kasankala, L. M., Y. Xue, Y. Weilong, S. D. Hong and Q. He. 2007. Optimization of Gelatine Extraction from Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) Fish Skin by Response Surface Methodology. *Bioresource Technol.* 98 (17): 3338–3343.
- Kim, J. Y., C. K. Jung, D. H. Kim and S. B. Kim. 2012. Properties of Edible Biofilm Manufactured from Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) Skin Gelatin. *Korean J. Chem. Eng.* 29 (6): 786-791.
- Kim, S. J. and Z. Ustunol. 2001. Solubility and Moisture Sorption Isotherms of Whey-Protein-Based Edible Films as Influenced by Lipid and Plasticizer Incorporation. *J. Agr. Food Chem.* 49 (9): 4388-4391.
- Kittiphattanabawon, P., S. Benjakul, W. Visessanguan and F. Shahidi. 2010. Comparative Study on Characteristics of Gelatin from the Skins of Brownbanded Bamboo Shark and Blacktip Shark as Affected by Extraction Conditions. *Food Hydrocolloid.* 24: 164-171.
- Krochta, J. M. 1997. Edible and Biodegradable Polymer Films: Challenges and Opportunities. *Food Technology.* 51: 61-74.
- Krochta, J. M. and C. de Mulder-Johnston. 1997. Edible and Biodegradable Polymer Films: Challenges and Opportunities. *Food Technol.* 51 (2): 61-74.
- Laemmli, U. K. 1970. Cleavage of Structural Proteins During the Assembly of the Head of Bacteriophage T4. *Nature.* 227: 680–685.

- Limpisophon, K., M. Tanaka, W. Weng, S. Abe and K. Osako. 2009. Characterization of Gelatin Films Prepared from Under-Utilized Blue Shark (*Prionace glauca*) Skin. *Food Hydrocolloid*. 23 (7): 1993–2000.
- Limpisophon, K., M. Tanaka and K. Osako. 2010. Characterisation of Gelatin–Fatty Acid Emulsion Films Based on Blue Shark (*Prionace glauca*) Skin Gelatin. *Food Chem*. 122: 1095–1101.
- Mahmood, K., L. Muhammad, F. Ariffin, H. Kamilah, Bt. A. Razak and S. Sulaiman. 2016. Review of Fish Gelatin Extraction, Properties and Packaging Applications. *Food Science and Quality Management*. 56: 47-59.
- Mariod, A. A. and H. F. Adam. 2013. Review: Gelatin, Source, Extraction and Industrial Applications. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 12 (2): 135-147.
- Nam, P. V., V. N. Hoa, T. T. L. Anh and T. S. Tuang. 2020. Towards Zero-Waste Recovery of Bioactive Compounds from Catfish (*Pangasius hypophthalmus*) By-Products Using an Enzymatic Method. *Waste Biomass Valori*. 11: 4195-4206.
- Nur Hanani, Z. A., Y. H. Roos and J. P. Kerry. 2014. Use and Application of Gelatin as Potential Biodegradable Packaging Materials for Food Products. *Int. J. Biol. Macromol*. 71: 94–102.
- Nur Hanani, Z. A. 2016. Gelatin. In: Caballero, B., P. Finglas and F. Toldrá (eds.). The Encyclopedia of Food and Health Volume 3. Academic Press, Oxford. pp. 191-195.
- Nurilmala, M., H. Suryamarevita, H. H. Husein, A. M. Jacob and Y. Ochiai. 2022. Fish Skin as a Biomaterial for Halal Collagen and Gelatin. *Saudi J. Biol. Sci*. 29: 1100–1110.
- Ockerman, H. W. and C. L. Hansen. 1988. Animal By-Product Processing. Ellis Horwood International Publishers in Science and Technology, Chichester, England. 133-157 pp.
- Ou, S., K. C. Kwok and Y. Kang. 2004. Changes in In Vitro Digestibility and Available Lysine of Soy Protein Isolate After Formation of Film. *J. Food Eng*. 64 (3): 301-305.
- Peng, J., Y. Zi, J. Xu, Y. Zheng, S. Huang, Y. Hu, B. Liu, X. Wang and J. Zhong. 2022. Effect of Extraction Methods on the Properties of Tilapia Scale Gelatins. *Int. J. Biol. Macromol*. 221: 1150–1160.
- Rather, J. A., N. Akhter, Q. S. Ashraf, S. A. Mir, H. A. Makroo, D. Majid, F. J. Barba, A. M. Khaneghah and B. N. Dar. 2022. A Comprehensive Review on Gelatin: Understanding Impact of the Sources, Extraction Methods, and Modifications on Potential Packaging Applications. *Food Packaging and Shelf Life*. 34: 1-15.

- Rawdkuen, S., S. Sai-Ut and S. Benjakul. 2010. Properties of Gelatin Films from Giant Catfish Skin and Bovine Bone: A Comparative Study. *Eur. Food Res. Technol.* 231: 907–916.
- Salem, A., M. Jridi, O. Abdelhedi, N. Fakhfakh, M. Nasri, F. Debeaufort and N. Zouari. 2021. Development and Characterization of Fish Gelatin-Based Biodegradable Film Enriched with *Lepidium sativum* Extract as Active Packaging for Cheese Preservation. *Heliyon.* 7 (10): e08099.
- Tanaka, M., K. Iwata, R. Sanguandeeikul, A. Handa and S. Ishizaki. 2001. Influence of Plasticizers on the Properties of Edible Films Prepared from Fish Water-Soluble Proteins. *Fisheries Sci.* 67: 346-351.
- Taqi, A., K. A. Askar, K. Nagy, L. Mutihac and I. Stamatin. 2011. Effect of Different Concentrations of Olive Oil and Oleic Acid on the Mechanical Properties of Albumen (Egg White) Edible Films. *Afr. J. Biotechnol.* 10 (60): 12963-12972.
- Tee, Y. B., J. Wong, M. C. Tan and R. A. Talib. 2016. Development of Edible Film from Flaxseed Mucilage. *Bioresources.* 11 (4): 10286-10295.
- Tongnuanchan, P., S. Benjakul, T. Prodpran, S. Pisuchpen and K. Osako. 2016. Mechanical, Thermal and Heat-Sealing Properties of Fish Skin Gelatin Film Containing Palm Oil and Basil Essential Oil with Different Surfactants. *Food Hydrocolloid.* 56: 93-107.
- Villegas, R., T. P. O'Connor, J. P. Kerry and D. J. Buckley. 1999. Effect of Gelatin Dip on the Oxidative and Colour Stability of Cooked Ham and Bacon Pieces During Frozen Storage. *Int. J. Food Sci. Tech.* 34 (4): 385–389.
- Wang, C.-H. and S. Damodaran. 1990. Thermal Gelation of Globular Proteins: Weight-Average Molecular Weight Dependence of Gel Strength. *J. Agr. Food Chem.* 38 (5): 1157-1164.
- Zhang, S., Y. Wang, J. L. Herring and J. H. Oh. 2007. Characterization of Edible Film Fabricated with Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*) Gelatin Extract Using Selected Pretreatment Methods. *J. Food Sci.* 72 (9): C498-503.
- Zhou, P. and J. M. Regenstein. 2005. Effects of Alkaline and Acid Pretreatments on Alaska Pollock Skin Gelatin Extraction. *J. Food Sci.* 70 (6): 392-396.