

รายละเอียดโครงการวิจัยย่อยที่ 3

ชื่อโครงการวิจัยย่อยที่ 3 ศึกษาการเตรียม สมบัติ การปรับปรุงสมบัติ และความคงตัวของฟิล์มเจลาตินจากหนังปลา

(Study on preparation, properties, property improvement and stability of fish skin gelatin-based film)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปี 2555 จำนวนเงิน 623,920 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี 3 เดือน ตั้งแต่ กรกฎาคม 2555 ถึง ตุลาคม 2556

ชื่อผู้วิจัย - หัวหน้าโครงการวิจัย

ผศ.ดร. ธรรมบุญ โปรดปราน

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-286357

- ผู้ร่วมวิจัย

ศ.ดร. สุทธิวัฒน์ เบญจกุล

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-286334

ผศ.ดร. มณี วิทยานนท์

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-286339

ดร. พรอุษา จิตพุทธิ

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-286364

ดร. สิทธิพงศ์ นลินานนท์

คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 02-3298000 ต่อ 7258

บทคัดย่อ

เจลาตินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเตรียมฟิล์มได้ดี สมบัติของฟิล์มเจลาตินที่ได้ขึ้นอยู่กับแหล่งของเจลาติน โดยทั่วไปฟิล์มเจลาตินจากสัตว์บก เช่น เจลาตินจากวัว เจลาตินจากหมู มีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์มเจลาตินจากปลา ($p < 0.05$) และจากการศึกษาผลของชนิดสารไฮโดรคอลลอยด์ (ไคโตแซน แป้งข้าวเจ้า โปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง และเคิร์ดแลน) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (เจลาติน/ไฮโดรคอลลอยด์ เท่ากับ 10/0, 8/2, 6/4 และ 5/5 โดยน้ำหนัก) ต่อสมบัติบางประการของฟิล์มเจลาตินจากปลา พบว่า การใช้ไคโตแซนในอัตราส่วน 8/2 ให้ฟิล์มผสมที่มีความต้านทานแรงดึง (TS) และการยืดตัว ณ จุดขาด (EAB) สูงกว่าฟิล์มเจลาตินชุดควบคุม ($p < 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไคโตแซนที่อัตราส่วนอื่นๆ รวมทั้งการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ ในทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษามีผลให้ค่า TS ของฟิล์มเจลาตินลดลงตามปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มผสม การใช้ไคโตแซนให้ฟิล์มผสมที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ ที่ระดับเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ทุกชนิดในทุกอัตราส่วนผสมที่ทำการศึกษามีค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ต่ำกว่าฟิล์มเจลาตินที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ดีการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและปริมาณที่ทำการศึกษามีผลให้ฟิล์มเจลาตินมีสีเหลือง (ค่า b^*) เพิ่มขึ้น และมีความใสลดลง โดยเฉพาะการใช้โปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง

ดังนั้นการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและปริมาณที่เหมาะสม (ได้แก่ การใช้ไคโตแซนในอัตราส่วน 8/2) สามารถปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเจลาตินได้

Abstract

Gelatin from different sources could be used as material for film preparation. Properties of obtained gelatin films were dependent on source of gelatin. In general, films from land animal gelatins exhibited higher tensile strength as compared to those from fish gelatin ($p < 0.05$). Effect of incorporation of different hydrocolloids (chitosan,

rice flour, soy protein isolate and curdlan) at different ratios (gelatin/hydrocolloid = 10/0, 8/2, 6/4, and 5/5 (w/w)) on some properties of fish skin gelatin film was investigated. Incorporation of chitosan at the ratio of 8/2 yielded the blend film with higher tensile strength (TS) and elongation at break (EAB), compared to control gelatin film ($p < 0.05$). However, incorporation of chitosan at other ratios as well as addition of other hydrocolloids at all ratios studied resulted in decreased TS of the resulting blend film as the amount of hydrocolloids increased ($p < 0.05$). Among blend films tested, incorporation of chitosan rendered the blend films with better mechanical properties, compared to those added with other hydrocolloids of the same ratio. Moreover, all gelatin-based blend films, added with all types of hydrocolloids of all ratios, exhibited lower water vapor permeability (WVP) than the control gelatin film without hydrocolloid addition ($p < 0.05$). Nevertheless, blend films added with all types and ratios of hydrocolloids studied were more yellowish (higher b^* -value) and less transparent than the control gelatin film, especially for those incorporated with soy protein isolate.

Therefore, incorporation of appropriate type and amount of hydrocolloid (i.e. chitosan at 8/2 in this study) could improve water vapor barrier and mechanical properties of gelatin-based film.

บทที่ 1

บทนำและการตรวจเอกสาร

บทนำ

เจลาตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นอนุพันธ์ของคอลลาเจนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของกล้ามเนื้อรวมทั้งโครงสร้างของสัตว์ เช่น กระดูก เอ็น เป็นต้น ประเทศไทยมีการนำเข้าเจลาตินจากต่างประเทศในปี 2546 ปริมาณ 1,536,306 กิโลกรัม เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร มูลค่ารวมทั้งสิ้น 315,644,674 บาท (กรมศุลกากร, 2547) โดยแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเจลาตินปัจจุบันคือกระดูกและหนังจากโค หรือสุกร ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากเกิดโรคระบาดวัวบ้า (Bovine spongiform Encephalopathy: ESE) และโรคปากเท้าเปื่อย (Foot-and-Mouth Disease: FMD) (Helcke, 2000) ส่วนเจลาตินจากสุกรมีข้อจำกัดทางศาสนา (Sadowska *et al.*, 2003) ดังนั้นวัสดุเศษเหลือในอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ เช่น หนังปลา ซึ่งมีประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักทั้งหมด (Shahidi, 1994) สามารถเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับการสกัดเจลาตินที่มีศักยภาพ ซึ่งโดยทั่วไปเจลาติน

จากสัตว์น้ำมีอุณหภูมิในการหลอมละลายและความแข็งแรงของเจลต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์บก (Norland, 1990; Leuenberger, 1991) ทั้งนี้เนื่องจากเจลาตินจากสัตว์น้ำมีปริมาณกรดอิมิโน (imino acids) ต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์บก

เจลาตินเป็นวัสดุทางชีวภาพที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มย่อยสลายได้/บริโภคได้ (Jongjareonrak *et al.*, 2006a; 2006b) และกำลังได้รับความสนใจเพื่อพัฒนาใช้แทนการใช้ฟิล์มสังเคราะห์ แผ่นฟิล์มจากเจลาตินมีความยืดหยุ่นสูง และมีความใส รวมทั้งสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี อย่างไรก็ตามฟิล์มจากเจลาตินยังมีความแข็งแรงต่ำกว่าฟิล์มสังเคราะห์ รวมทั้งมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ไม่ดี และละลายได้ง่ายในน้ำ

ในการปรับปรุงการต้านทานการดูดซับน้ำและการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเจลาติน อาจทำได้โดยการเติมพอลิเมอร์หรือสารชีวภาพชนิดอื่นที่มีสมบัติการชอบน้ำน้อยกว่าผสมรวมในการเตรียมฟิล์มเจลาติน ซึ่งสารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดที่ได้จากพืชและจุลินทรีย์ เช่น สตาร์ช โปรตีนไฮโดรไลต์ถั่วเหลือง ไคโตแซน และเคิร์ดแลน ให้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงและมีสมบัติการละลายน้ำและการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าเจลาติน ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับเจลาตินจึงน่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของฟิล์มเจลาตินให้ดีขึ้นได้ นอกจากนี้เจลาตินเป็นสารโปรตีน ทำให้ฟิล์มเจลาตินที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ง่ายในระหว่างการเก็บรักษาที่สภาวะแวดล้อมปกติ ดังนั้นการเติมสารเติมแต่ง ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระ และสารยับยั้งจุลินทรีย์อาจช่วยเพิ่มความคงตัวของฟิล์มเจลาตินในระหว่างการเก็บรักษาและการใช้งานได้

ดังนั้นการนำเจลาตินจากสัตว์น้ำ เช่น จากหนังปลา ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปสัตว์น้ำ เพื่อมาใช้ผลิตเป็นแผ่นฟิล์ม จึงเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและการพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้/บริโภคได้ ที่สามารถนำไปใช้สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งอาจนำไปใช้พัฒนาวัสดุชีวภาพสำหรับระบบการนำส่งยา (drug release system) ที่ลดข้อจำกัดทางศาสนาได้อีกทางหนึ่ง

การตรวจเอกสาร

1. เจลาตินและการสกัดเจลาติน

เจลาตินได้จากการเปลี่ยนรูปของคอลลาเจนด้วยความร้อน สามารถจำแนกเป็น 2 ชนิดหลัก คือ Type A และ Type B ซึ่งมีจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point: pI) อยู่ในช่วง 7 – 9 และ 4.8 – 5.2 ตามลำดับ (Bailey *et al.*, 1998) เมื่อคอลลาเจนได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการหดตัว (shrink temperature: Ts) สายพอลิเปปไทด์สามสายของคอลลาเจนจะเกิดการคลายตัวได้เป็น random coil ที่อยู่ในสถานะอสัณฐาน (amorphous form) ที่สามารถละลายน้ำได้ เรียกว่า เจลาติน (gelatin) (ภาพที่ 1) (Okuzaki, 2001) คอลลาเจนที่ได้จากปลาที่มีอุณหภูมิที่เกิดการหดตัวประมาณ 45 องศาเซลเซียส และในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 60 – 65 องศาเซลเซียส (Foegeding and Lanier, 1996)

เจลาตินที่เป็นอนุพันธ์ของคอลลาเจนมีกรดอะมิโนในสายเปปไทด์ประมาณ 1050 หน่วย เรียงต่อกันเป็นสาย α -chain และบิดเกลียวไปทางซ้ายแบบ left-handed helix (Bailey and Light, 1989) ลำดับกรดอะมิโนของเจลาตินเป็นแบบ Gly-X-Y โดยตำแหน่ง X และ Y มักเป็นกรดอิมิโนไฮดรอกซีโพรลีน และกรดอิมิโนโพรลีน ตามลำดับ (Bailey and Light, 1989)

การสกัดเจลาตินประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมตัวอย่าง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คอลลาเจน การสกัดเริ่มจากการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงคอลลาเจนไปเป็น

เจลาตินในสภาพที่มีน้ำ (Foegeding and Lanier, 1996) สำหรับการกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่คอลลาเจนเช่นไขมันเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพราะไขมันบางส่วนจะถูกออกซิไลต์ระหว่างกระบวนการสกัด ส่งผลให้สารละลายเจลาตินข้นและกรองยาก นอกจากนี้เจลาตินที่มีปริมาณไขมันหรือกรดไขมันสูงอาจทำให้เกิดลักษณะตาปลา (fish eyes) ในแผ่นฟิล์ม (Jones, 1987)

2. ฟิล์มบรีโภาคได้/ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ชีวภาพ

ฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพคือ แผ่นวัสดุบางๆ ที่ได้จากพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถขึ้นรูปมาใช้เป็นฟิล์มย่อยสลายได้และเพื่อประโยชน์ได้ อาจนำมาใช้ในลักษณะการเคลือบ หรือ ทำเป็นแผ่นฟิล์มกั้นระหว่างองค์ประกอบอาหาร ใช้ห่อหุ้มอาหาร หรือเป็นถุงเพื่อบรรจุอาหาร มีจุดประสงค์ในการต่อต้านการไมเกรชั่น (migration) ของความชื้น ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ อะโรมา และ ลิพิด ใช้ผสมเป็นส่วนประกอบในอาหาร เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) สารต้านจุลินทรีย์ (antimicrobials) และ สารให้กลิ่นรส (flavoring agents) (Krochta and De Mulder-Johnston, 1997)

วัสดุชีวภาพที่นำมาใช้ในการผลิตฟิล์ม แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

(1) พอลิเมอร์ชีวภาพพวกไฮโดรคอลลอยด์ (Biopolymer hydrocolloids) ประกอบด้วย (Perez-Gago and Krochta, 2005)

(1.1) โปรตีน เช่น เจลาติน เคอราติน คอลลาเจน เคซีน ซอยด์โปรตีน เวย์โปรตีนไมโอไฟบิลลลา วิทกลูเตน และ คอร์นซีน

(1.2) พอลิแซ็กคาไรด์ เช่น สตาร์ช อนุพันธ์ของสตาร์ช อนุพันธ์ของเซลลูโลส และกัมจากพืช

(2) ลิพิด ประกอบด้วย แวกซ์ ออกลิกลีเซอรอล และกรดไขมัน

(3) เรซิน ประกอบด้วย เซลแลกซ์ และ วูทโรซิน

(4) คอมพอร์สิท โดยทั่วไป ผสมด้วยลิพิดและส่วนประกอบของไฮโดรคอลลอยด์ ในรูปไบเลเยอร์ หรือ อิมัลชัน

ฟิล์มบรีโภาคได้ที่ผลิตจากโปรตีนมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง จึงได้รับความนิยมนำมาผลิตและพัฒนาเป็นฟิล์มบรีโภาคได้ (Shiku *et al.*, 2004) ฟิล์มโปรตีนจากสัตว์ และฟิล์มโปรตีนจากพืช ซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันขึ้นกับสมบัติเชิงหน้าที่โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของโปรตีน รวมทั้งการจัดเรียงตัวกันของโปรตีนในการเกิดฟิล์ม นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น พีเอช ชนิดของพลาสติไซเซอร์ ชนิดของตัวประสานโปรตีน และ สารเติมแต่งอื่นๆ เช่น ไขมัน (Gennadios *et al.*, 1996) ฟิล์มโปรตีนมีความแข็งแรง ฟิล์มโปรตีนทั่วไปมีค่าการต้านทานแรงดึง (tensile strength) สูงและการยืดตัว (elongation) ปานกลาง มีสมบัติการขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซได้ดี และมีคุณค่าทางอาหารสูง (Ou *et al.*, 2004) การขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนจำเป็นต้องเติมพลาสติไซเซอร์ซึ่งทั่วไปใช้สารพวก polyols เพื่อช่วยลดความเปราะ ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน ทำให้สายโซ่เคลื่อนไหวเพิ่มขึ้น (Gennadios *et al.*, 1994; Torres, 1994) ทำให้ความต้านทานเชิงกลของฟิล์มลดลงและเพิ่มความยืดหยุ่น (elasticity) และการซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability: WVP) ของฟิล์มโปรตีน

3. ฟิล์มเจลาติน

เจลาตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพจำพวกโปรตีนที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มย่อยสลายได้/บริโภคได้ ฟิล์มที่ได้มีความใสและแข็งแรงดี รวมทั้งมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านก๊าซได้ดี เช่นเดียวกับฟิล์มโปรตีนอื่นๆ (Simon-Lukasik and Ludescher, 2003) เจลาตินจากหนังปลาสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี โดยทั่วไปฟิล์มเจลาตินจากหนังปลาน้ำอุ่น (warm-water fish) หลายชนิด เช่น Nile perch มีค่าการต้านทานแรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาด (elongation at break: EAB) ใกล้เคียงกับฟิล์มเจลาตินจากกระดูกโค (Muyonga *et al.*, 2004) ฟิล์มเจลาตินจากปลา มีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มเจลาตินจากโค เช่น ฟิล์มเจลาตินที่ได้จากหนังปลาทูน่าที่เติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มเจลาตินจากหนังสุกร (Gomez-Guillen *et al.*, 2007) เนื่องจากองค์ประกอบของกรดอะมิโนในหนังปลามีลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) สูง เนื่องจากจำนวนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนมีจำนวนน้อยกว่าซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลในไฮดรอกซีโพรลีนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี (Avena-Bustillos *et al.*, 2006) ฟิล์มเจลาตินจากปลาน้ำอุ่นและปลาน้ำเย็นมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่างกัน โดยฟิล์มเจลาตินจากปลาน้ำเย็นมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มเจลาตินจากปลาน้ำอุ่น เนื่องจากปลาน้ำเย็นมีปริมาณสัดส่วนของกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนต่ำกว่าในปลาน้ำอุ่น (Avena-Bustillos *et al.*, 2006) การที่ฟิล์มเจลาตินจากหนังปลามีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับการเคลือบยา (encapsulated drugs) และอาหารที่อยู่ภายใต้ความเย็นเพื่อลดการสูญเสีย

Cao และคณะ (2007) ศึกษาการผสมเจลาติน (type B, จากกระดูกโค) ในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง พบว่าการผสมเจลาตินช่วยขจัดกลิ่นที่ไม่ปรารถนาและความเปรี้ยว ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง และราคาต้นทุนของฟิล์มผสมที่ได้ต่ำกว่าฟิล์มจากเจลาติน ฟิล์มผสมระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและเจลาตินในอัตราส่วนโปรตีนถั่วเหลืองต่อเจลาตินเท่ากับ 4:6 – 2:8 (ที่เติม 0.1 g glycerol/g protein) มีสมบัติที่ดีกว่า ฟิล์มที่ได้จากโปรตีนถั่วเหลือง ค่าการต้านทานแรงดึง (tensile strength: TS) การยืดตัวเมื่อขาด (elongation at break: EAB) และมอดุลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus: EM) ของฟิล์มมีค่าเท่ากับ 33.65 MPa, 3.19% และ 1540.61 MPa ตามลำดับ หากเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลและโซเดียมคลอไรด์ ค่า EB และปริมาณน้ำในฟิล์มผสมจะเพิ่มขึ้น แต่ค่า TS และ EM ลดลง การใช้ 0.1–0.2 g glycerol/g protein จะช่วยลดความเปรี้ยวของฟิล์ม ปรับปรุงการยืดหยุ่นและความเหนียว นอกจากนี้พบว่า เมื่อพีเอช ของสารละลายโปรตีนถั่วเหลือง มีค่า 8–9 สมบัติฟิล์มผสมจะดีขึ้นและหากผ่านการให้ความร้อน (50 - 90 °C) จะทำให้สมบัติทางกลดีขึ้นและฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

โดยทั่วไปการผลิตฟิล์มจากโปรตีนรวมทั้งเจลาตินจำเป็นต้องมีการใส่สารพลาสติกไซเซอร์ที่มีสมบัติในการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ในการผลิตฟิล์ม เพื่อมิให้เกิดการแยกตัวของ พลาสติกไซเซอร์ในระหว่างการทำฟิล์มให้แห้ง โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์มีจุดประสงค์เพื่อลดความกรอบของแผ่นฟิล์มซึ่งเกิดจากแรงยึดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่น (Krochta, 1997) Cuq และคณะ (1997) ศึกษาปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการเตรียมฟิล์มพบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงต้านการทะลุของฟิล์มโปรตีนลดลง ในขณะที่ Jongjareonrak และคณะ (2006a) พบว่าแผ่นฟิล์มเจลาตินที่เตรียมจากหนังปลาตาหวานมีความ

ต้านทานแรงดึง และการยืดตัวเมื่อขาดแปรตามปริมาณความเข้มข้นของเจลลาตินที่ใช้ และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นแผ่นฟิล์มมีสมบัติการยืดตัวเมื่อขาดเพิ่มขึ้นแต่มีความต้านทานแรงดึงลดลง

อย่างไรก็ตามแผ่นฟิล์มเจลลาตินมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ต่ำ แม้ว่าจะมีการเชื่อมขวางหรือทำให้เกิดการจัดเรียงตัว (Gomez-Guillen *et al.*, 2007)

ฟิล์มเจลลาตินสามารถใช้ห่อหุ้มส่วนผสมอาหารที่มีความชื้นต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านเภสัชกรรม เนื่องจากการห่อหุ้มช่วยป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและแสง ส่วนการเคลือบผิวผักผลไม้แห้งด้วยเจลลาติน สามารถป้องกันการดูดความชื้นและป้องกันออกซิเดชันได้ (Cole, 1969) นอกจากนี้เจลลาตินยังสามารถใช้ในการเคลือบผิวเนื้อสัตว์เพื่อลดการซึมผ่านของออกซิเจน ความชื้นและน้ำมัน (Baker *et al.*, 1994)

4. สารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด

ไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่เป็นสารธรรมชาติที่ผลิตจากพืชและเชื้อจุลินทรีย์ ไฮโดรคอลลอยด์ละลายน้ำได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์หรือเจล ในอุตสาหกรรมอาหารไฮโดรคอลลอยด์ใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร, สารเพิ่มความข้นหนืด, สารดูดซับน้ำ เพื่อลดการสูญเสียจากอาหาร, สารเพิ่มความเสถียรให้กับผลิตภัณฑ์ประเภทสารแขวนลอยและอิมัลชัน จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นจะทำให้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารยาวนาน

4.1 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

คาร์ราจีแนนเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ซึ่งชนิดที่ใช้ผลิตเป็นทางการค้า ได้แก่ *Euchema cottonii* และ *E. spinosum* มีโครงสร้างหลักเป็น galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glycosidic linkage และเป็น sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่ม ester sulphate และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่ง carrageenan ทั้ง 3 ชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างของโพลีแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย (Ribeiro *et al.*, 2004)

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของอิกอนชนิดอื่นๆ เช่นโปแตสเซียมหรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของอิกอน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและอิกอนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า 70 °C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายที่ละลายน้ำได้ (water miscible solvent) เช่น อัลกอฮอล์และโพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol)

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลเหล่านี้จะเป็น thermo-reversible aqueous gel คือ สามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง เมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจลเนื่องจากเกิดการฟอร์มเป็นเกลียวคู่ (double helix) ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของเจล อุณหภูมิและการปั่นกวจะสามารถทำให้เกลียวคลายตัวเป็น random coil เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการสร้าง

ร่างแห 3 มิติ แต่ละสายของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันเข้าเกิดจุดเชื่อมโยง (junction point) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของจุดเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจล การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น Kappa carrageenan เมื่อเติม K^+ จะเกิดเจลยืดหยุ่น (elastic gel) ถ้าเติม Ca^{2+} จะเกิดเจลแข็ง (rigid gel) ส่วน Iota carrageenan เมื่อเติม Ca^{2+} จะเกิดเจลยืดหยุ่น ถ้าผสมคารราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มีความยืดหยุ่น (elastic) เพิ่มขึ้นและเกิด syneresis น้อยลง และนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น dessert gels, whipped topping และ fluid milk products (Ribeiro *et al.*, 2004)

4.2 เพคติน (Pectin)

เพคตินได้จากการย่อยสลายของโปรโตเพคติน (protopectin) ที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อพืช จะประกอบไปด้วยน้ำตาลหลายชนิด เช่น rhamnose, galactose, arabinose และน้ำตาลอื่นๆ จำนวนเล็กน้อย เพคตินเป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (hetero-polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ D-galacturonic acid (ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักหรือที่เรียกว่า smooth regions และมีกิ่งแขนง (hair regions) อาจเป็น arabinose, galactose, rhamnose และบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่ D-galacturonic acid จะถูก เอสเทอร์ไฟต์ ด้วยหมู่เมทิล ($-CH_3$) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมีระดับของการเมทิลเลชัน (degree of methylation: DM) แตกต่างกัน จึงทำให้เพคตินจากวัตถุดิบแต่ละแหล่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก (Guillotin *et al.*, 2007)

4.3 ไคโตแซน (Chitosan)

ไคโตแซนเป็นพอลิอะมิโนแซคคาไรด์ (polyaminosaccharide) ซึ่งได้จากไคตินที่ผ่านการกำจัดอะซิติลออก โดยประกอบด้วยหน่วยย่อยของ D-glucosamine ไคโตแซนเป็นชีวโมเลกุลที่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Singh and Ray, 1994; Qurashi *et al.*, 1992) ไคโตแซนมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่มาก จึงไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป แต่สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อน ในช่วงระดับความเข้มข้นที่กว้าง ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการฟอร์มตัวของเกลียว การที่ไคโตแซนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (ประมาณ 1×10^7) จึงสามารถเกิดสารละลายที่ข้นหนืดได้ เมื่อละลายในกรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อน (Qurashi *et al.*, 1992)

Cervera และคณะ (2004) ศึกษาสมบัติทางกลของฟิล์ม ได้แก่ ความทนแรงดึง และร้อยละการยืดตัวของฟิล์มไคโตแซนที่ใส่พลาสติกไซเซอร์ คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และอิริททอล โดยฟิล์มไคโตซาน-กลีเซอรอล และฟิล์มไคโตซาน-บริสุทรี ต่างจากฟิล์มไคโตซาน-ซอร์บิทอลนั้นมีความเปราะมากขึ้น อีกทั้งยังมีรายงานว่า ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น รา และแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคกับพืชเองและก่อให้เกิดอันตรายกับผู้บริโภค อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสภาพบรรยากาศภายใน ช่วยลดการสูญเสียน้ำ ชะลอการสุกของผลไม้ และสามารถควบคุมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอาการสีน้ำตาล (browning) ในผลไม้ได้ (Muzzarelli, 2011)

Hosokawa และคณะ (1991) ศึกษาการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากไคโตแซนและเซลลูโลส พบว่าฟิล์มจากไคโตแซนและเซลลูโลสเป็นฟิล์มพวกที่ไม่ใช่เทอร์โมพลาสติก (non-thermoplastic) ยอมให้ก๊าซผ่าน ไม่ละลายน้ำ มีค่าทนแรงดึงสูงสุดขณะเปียกที่ปริมาณ

โคโตนร้อยละ 10-20 และความสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะเกิดฟิล์ม จำนวนหมู่คาร์บอนิลหรือคาร์บอกซิลของเซลลูโลส

4.4 พอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์

พอลิแซคคาไรด์เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วย โมโนแซคคาไรด์หลายๆโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก นับตั้งแต่ปี 1960 เป็นต้นมา การผลิตพอลิแซคคาไรด์เป็นการผลิตโดยอาศัยกระบวนการหมักจากจุลินทรีย์ ซึ่งมีศักยภาพที่ดีกว่า พอลิแซคคาไรด์จากพืช หรือสาหร่าย เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลายและเฉพาะตัวมากกว่า จึงสามารถใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ตรงตามความต้องการ ไม่เป็นพิษ ไม่มีความแปรปรวน ด้านปริมาณและราคา อย่างไรก็ตามการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์ก็มีข้อด้อย คือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในขั้นตอนการหมักและการเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ พอลิแซคคาไรด์ที่ได้รับความสนใจมีหลากหลายชนิด เช่น แชนแทน เจลแลน เด็กเตรน พูลูลูแลน และเคิร์ดแลน เป็นต้น (วีรพันธุ์ เดิมหลิม, 2540)

4.4.1 เจลแลน (Gellan)

เป็นคาร์โบไฮเดรต เชิงซ้อนที่ละลายได้ในน้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก กระบวนการหมักของเชื้อ *Pseudomonas elodea* หรือ *Sphingomonas elodea* เป็นไฮโดร คอลลอยด์ที่ทำหน้าที่หลายอย่าง ใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดเจล เนื้อสัมผัส ความคงตัว การเกิดสารแขวนลอย การเกิดฟิล์ม และโครงสร้างที่ต้องการ สามารถทำให้เกิดลักษณะของเนื้อสัมผัสที่ หลากหลายตั้งแต่เป็นเจลเหลว เจลนุ่มและยืดหยุ่น จนถึงเจลแบบเปราะบาง ผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้ เช่น ขนมหวานจากน้ำตาล เจลลี่ ผลิตภัณฑ์จากนม ผลิตภัณฑ์จากผลไม้ ฯลฯ การผสมเจลแลนกับกับเพคติน โดยบริษัท CP Kelco เมื่อใช้ในอาหารสามารถทำให้เกิดความคงตัวของน้ำผลไม้ในระหว่างการเก็บรักษา ที่ยาวนาน (Yang and Paulson, 2000)

4.4.2 เคิร์ดแลน

เคิร์ดแลนเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่สังเคราะห์ได้จากแบคทีเรีย *Alcaligenes faecalis* var. *Myxogenes* (Funami et al., 1999) มีโครงสร้างแบบเส้นตรงประกอบด้วยโมเลกุลของ กลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,3-D- glucosidic linkage (Funami et al., 1998) เคิร์ดแลนไม่ ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส หรือสารละลาย ต่าง (Zhang et al., 2002) เคิร์ดแลนเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีความเป็นผลึกสูง (Nakata et al., 1998)

Tada และคณะ (1997; 1998) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (25 และ 60 องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.01 N, 0.02 N, 0.05N และ 0.1N) ต่อการเกิด เจลและโครงสร้างโมเลกุลเคิร์ดแลนในช่วงความเข้มข้นของเคิร์ดแลนต่ำๆ (ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) พบว่า โมเลกุลของเคิร์ดแลนสามารถเกิดการรวมกลุ่ม (association) ได้ในสารละลายต่างๆที่มีความ เข้มข้นในช่วง 0.01 N-0.1 N) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การรวมกลุ่มกันของโมเลกุลจะเกิดมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่างลดลง ทำให้เคิร์ดแลนละลายได้ลดลงที่อุณหภูมิห้องโดยโครงสร้าง โมเลกุลจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารละลายต่าง ถ้าความเข้มข้นของสารละลายต่างต่ำๆ (0.01N, 0.02N) โมเลกุลจะขดตัวเกาะกันเป็นก้อน (Gaussian coli conformation) ส่วนที่สารละลายต่างสูงขึ้น (0.05N, 0.1N) การรวมกลุ่มของโมเลกุลจะมีโครงสร้างเป็นแบบแท่งที่เกิดจากหลายๆโมเลกุลมาจับกัน

แบบขดเป็นเกลียว (multi-helical conformation) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส พบว่า โมเลกุลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแยกตัวและคลายตัวออกจากกัน (dissociation) เป็นอิสระได้มากขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายต่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างโมเลกุล โดยที่ถ้าความเข้มข้นของ สารละลายต่างสูงๆ (ที่ 0.05N, 0.1N) จะเกิดการแยกตัวได้เป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ อิสระที่มีโครงสร้างแบบ เกลียวได้ (single helical conformation) และโมเลกุลที่เกิดการแยกตัว(คลายตัว)นี้ จะสามารถเกิดการ จัดตัวใหม่จนมีลักษณะเป็นเจลที่มีโครงสร้างตาข่ายอย่างสม่ำเสมอ (homogeneous network structure) ขึ้นได้ ดังนั้น การdissociation ของโมเลกุลของเคิร์ดแลนมีส่วนสำคัญในการเกิดเจล

Funami และคณะ (1999) ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดเจลของเคิร์ดแลนโดยการ วิเคราะห์สมบัติเชิงรีโอโลยีและสมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิสำหรับการเตรียมเจลและความ เข้มข้นของเคิร์ดแลนมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติการของเจล ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลที่โครงข่ายร่างแหของเจลจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และจำนวนของ elastically active chains เพิ่มขึ้น ทำให้เจลมีสมบัติที่ยืดหยุ่นเหมือนของแข็งมากขึ้น และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจาก thermo-reversible gel เป็น thermo-irreversible gel มีค่าลดลงต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส เมื่อ ความเข้มข้นของเคิร์ดแลนเพิ่มขึ้น และมีผลให้สัดส่วนองค์ประกอบที่เป็น thermo-reversible ใน เจลลดลงด้วย โดยการเพิ่มความเข้มข้นของเคิร์ดแลน เพื่อช่วยส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิ กระหว่างโมเลกุลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 การใช้สารไฮโดรคอลลอยด์เพื่อปรับปรุงสมบัติฟิล์มย่อยสลายได้

ฟิล์มโปรตีนสามารถผลิตได้จากโปรตีนหลายชนิด เช่น คอลลาเจน เจลาติน เคซีน โปรตีน เวย์ โปรตีนในข้าวโพด โปรตีนในข้าวสาลี และโปรตีนถั่วเหลือง ฟิล์มโปรตีนมีสมบัติการขวางกั้นการ ซึมผ่านของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีมาก (Gennadios *et al.*, 1998) แต่ฟิล์มโปรตีนให้ สมบัติในการเป็นตัวกั้นการซึมผ่านของไอน้ำที่ไม่ดี โดยเฉพาะฟิล์มเจลาตินที่สามารถละลายน้ำได้ดี เนื่องจากสมบัติในการชอบน้ำของโปรตีน Cao และคณะ (2007) ศึกษาสมบัติของฟิล์มผสมระหว่าง โปรตีนจากถั่วเหลืองและเจลาตินในอัตราส่วนต่างๆ (4:6 - 2:8) พบว่า ฟิล์มผสมที่ได้มีสมบัติการพองตัว ในน้ำลดลงเมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองที่ใช้เพิ่มขึ้น แต่ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณเจลาตินในแผ่นฟิล์ม

นอกจากนี้ Lee และคณะ (2004) ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมระหว่างเจลแลนกับเจลาติน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเจลาติน จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง (TS) ลดลง ส่วนความสามารถ ในการยืดตัวนั้นเพิ่มขึ้น อีกทั้งการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในฟิล์มเจลาติน ทำให้ค่าความ ต้านทานแรงดึง (TS) ลดลง ขณะที่ฟิล์มผสมอื่นๆนั้นจะให้ค่าความต้านทานแรงดึง(TS) สูงสุดเมื่อใช้ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 50 mM เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเจลาตินขึ้นเป็น 40% ส่งผลทำให้การ ละลายน้ำและการบวมตัวลดลง จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเจลาตินกับเจ ลแลน จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมระหว่างเจลแลนกับเจลาติน ซึ่งฟิล์มผสมนี้ สามารถนำไปเป็นบรรจุภัณฑ์ และวัสดุเคลือบผิวแทนฟิล์มจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้

5.2 การใช้สารต้านอนุมูลอิสระและสารยับยั้งจุลินทรีย์ในฟิล์มย่อยสลายได้

Kristo และคณะ (2008) ศึกษาฟิล์มยับยั้งจุลินทรีย์ที่ปรับปรุงโดยการใส่สารโซเดียมแล็กเตต (Na lactate) โพแทสเซียมซอร์เบท (K sorbate) และนิซิน (nisin) ในระดับของความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ในฟิล์มโซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate: SC) สารยับยั้งจุลินทรีย์จะส่งผลในด้านการดูดซับน้ำ การซึมผ่านของไอน้ำ และพฤติกรรมความร้อนเชิงกล และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *Listeria monocytogenes* โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Na lactate เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำและความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่า K sorbate ที่เติมลงไปอยู่ในฟิล์ม SC การเติม nisin จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับน้ำและการซึมผ่านไอน้ำ อีกทั้ง Na lactate และ K sorbate จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: Tg) โดย Na lactate จะส่งผลให้ค่า Tg เพิ่มขึ้น แต่ K sorbate จะส่งผลให้ค่า Tg ลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของ Na lactate และ K sorbate ส่งผลต่อลดลงของค่ามอดูลัสและค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด และการเพิ่มขึ้นของค่าการยืดตัวก่อนขาด และ nisin มีผลต่อการยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Listeria monocytogenes* เช่นเดียวกับ K sorbate แต่ Na lactate มีประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และต้องใช้ที่ความเข้มข้นถึง 40% โดยน้ำหนัก

ผลจากการศึกษาผลการยับยั้งจุลินทรีย์ของฟิล์มโคโตซานย่อยสลายได้ที่ผสมกับสาร น้ำมันจากกระเทียม (garlic oil) โดยเปรียบเทียบกับสารโพแทสเซียมซอร์เบท (potassium sorbate) และนิซิน (nisin) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ทดสอบกับเชื้อ *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes*, และ *Bacillus cereus*. การผสม garlic oil ในฟิล์มโคโตซานนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ และส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของฟิล์มโคโตซาน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ฟิล์มผสมน้ำมันจากกระเทียมต้องคำนึงถึงรสชาติและกลิ่นของอาหารด้วย (Pranoto et al., 2005)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์มเจลลาตินจากปลาเปรียบเทียบกับสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเจลลาตินแหล่งต่างๆ
- เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดต่อสมบัติของฟิล์มเจลลาตินจากปลา
- เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเจลลาตินโดยใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ในลักษณะการเตรียมเป็นฟิล์มหลายชั้น (multi-layered film)
- เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มเจลลาตินที่เติมและไม่เติมสารไฮโดรคอลลอยด์ในระหว่างการเก็บรักษา
- เพื่อศึกษาผลของการเติมสารต้านอนุมูลอิสระและสารยับยั้งจุลินทรีย์ต่อความคงตัวของฟิล์มที่ได้

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วัตถุดิบ

- 1.1 เจลาตินจากหนังปลาทางการค้า
- 1.2 เจลาตินจากหมูทางการค้า
- 1.3 เจลาตินจากหนังวัวทางการค้า
- 1.4 เจลาตินจากไก่

สกัดเจลาตินจากเท้าไก่ตามวิธีการของ Vittayanont และ Benjakul (2005) ดังนี้

- การเตรียมวัตถุดิบและการกำจัดไขมัน:

นำเท้าไก่เนื้อ (อายุประมาณ 45 วัน) มาทำละลายและล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเย็น แล้วบดด้วยเครื่องบดเนื้อผ่านรูขนาด 4 มิลลิเมตร จากนั้นล้างด้วยน้ำเย็นหลายๆครั้ง สลับกับการเหวี่ยงแยกน้ำล้างออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบตะกร้า หลังจากนั้นนำตัวอย่างเท้าไก่บดที่เตรียมไว้มาควนในสารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมคลอไรด์กับโซเดียมไทรโพลีฟอสเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.6 M KCl+0.3% STP+0.05 M NaOH) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง กรองแยกแล้วล้างด้วยน้ำหลายๆครั้งสลับกับการเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบตะกร้า จนน้ำล้างมีพีเอชเป็นกลาง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกร้อยละ 2.14 อัตราส่วน 1:10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

- การสกัดเจลาตินและการทำแห้ง

เติมน้ำ 2.5 เท่าของน้ำหนักตัวอย่างสำหรับการแช่กรด หรือต่าง จากนั้นให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกส่วนกากออกก่อนนำส่วนของเหลวไปเหวี่ยงแยกตะกอนละเอียดและไขมันด้วยเครื่อง

หมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ RC-5B plus ที่ 10000 rpm เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายเจลาตินที่ได้ไปประเหยให้เข้มข้นในสภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส เพื่อให้เจลาตินแข็งตัวแล้วบดเป็นชิ้นเล็กๆก่อนนำไปอบในตู้อบลมร้อนชนิดถาดหมุนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดเป็นผง

1.5 สารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ได้แก่

- แป้งข้าวเจ้า (Rice flour) (บริษัทโรงเส้นหมี่ช่อเฮง จำกัด, ประเทศไทย)
- ไคโตแซน (ชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง, degree of deacetylation ~ 85.90 %) (SIGMA-ALDRICH.INC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- โพรตีนไฮโซเลตถั่วเหลือง (Shandong Sinoglory Health Food Co. Ltd., ประเทศจีน)
- เคอร์ดีแลน (Wako Pure Chemical Industries, Ltd., ประเทศญี่ปุ่น)

1.6 สารเคมี

- กรดอะซิติก (บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด, ประเทศไทย)
- กลีเซอรอล (บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด, ประเทศไทย)
- สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โปรตีน

2. วิธีการทดลอง

2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

นำเจลาตินผงจากแหล่งต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

2.1.1) โปรตีน (AOAC, 1999)

2.1.2) ไขมัน (AOAC, 1999)

2.1.3) เกล็ด (AOAC, 1999)

2.1.4) ความชื้น (AOAC, 1999)

2.1.5) ปริมาณ hydroxyproline ตามวิธีของ Bergman และ Loxley (1963)

2.1.6) ความแข็งแรงของเจล (bloom strength) ของสารละลายเจลาตินเข้มข้นร้อยละ 6.67 (นน./ปริมาตร) ซึ่งผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 7 °C นาน 16 – 18 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง Texture analyzer ตามวิธีของ Fernández-Díaz และคณะ (2001)

2.1.7) สี ตรวจสอบค่าสีของเจลาติน วัดโดยใช้เครื่องวัดสี ระบบ CIE L*a*b*

2.2 การศึกษาเปรียบเทียบการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

นำเจลาตินผงจากแหล่งต่างๆ มาเตรียมสารละลายฟิล์ม และทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยวิธีการเทหล่อ แล้ววิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์ม ดังนี้

2.2.1 การเตรียมสารละลายฟิล์มและการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

นำเจลาตินผงชนิดต่างๆมาละลายในน้ำกลั่นเพื่อให้ได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (นน./ปริมาตร) เติมน้ำพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) ร้อยละ 25 ของปริมาณโปรตีน กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำสารละลายฟิล์มไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที พร้อมกับกวนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ กำจัดฟองอากาศโดยการ sonication ตามวิธีของ Jongjareonrak และคณะ (2006a) นำสารละลายฟิล์มที่ได้มาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์ม โดยใช้สารละลายฟิล์มปริมาณ 4 กรัม ใส่ในพิมพ์ซิลิโคน ขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ทำแห้งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ในข้อ 2.2.2

2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม ดังนี้

(1) ความหนาของฟิล์ม โดยการวัดด้วยไมโครมิเตอร์

(2) สมบัติเชิงกล โดยการตรวจสอบค่า tensile strength (TS) และ elongation at break (EAB) โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ตามวิธีของ Iwata และคณะ (2000) โดยทำการปรับสภาพของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนการตรวจสอบ

(3) การซึมผ่านไอน้ำ โดยใช้วิธี ASTM (1989) ซึ่งดัดแปลงโดย Shiku และคณะ (2004)

(4) สีและความโปร่งใสของฟิล์ม ตรวจสอบสีโดยใช้ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยใช้เครื่องวัดสี และตรวจสอบความโปร่งใสของฟิล์มตามวิธี ของ Han และ Floros (1997) โดยความโปร่งใสของฟิล์ม คำนวณจากสมการ ดังนี้ คือ

$$\text{Transparency value} = -\log T_{600}/X$$

$\%T_{600}$ คือ ค่าสัดส่วนการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm และ X คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม (มิลลิเมตร)

(5) การละลายของฟิล์มและการละลายของโปรตีนในฟิล์ม

ตรวจสอบการละลายของฟิล์มโดยวิธีของ Gennadios และคณะ (1998) ทำการละลายฟิล์ม (ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$) ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักที่แน่นอน แล้วทำการเติมน้ำกลั่นที่เติม Na-azide ร้อยละ 0.1 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 $\times g$ เป็นเวลา 20 นาที ก่อนที่จะทำแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และคำนวณหาน้ำหนักฟิล์มที่ละลาย

ตรวจสอบปริมาณโปรตีนในส่วนใสโดยวิธี Biuret (Robinson and Hodgen, 1940) เปรียบเทียบกับปริมาณโปรตีนทั้งหมดในฟิล์ม โดยละลายฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เพื่อละลายโปรตีนทั้งหมด รายงานโปรตีนที่ละลายเป็นร้อยละเทียบกับโปรตีนในฟิล์มทั้งหมด

2.3 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเจลลาตินจากปลาโดยใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆในลักษณะเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม

ทำการศึกษาผลของการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ (HC) ชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า โปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง โคโตแซน และเคิร์ดแลน ต่อสมบัติของฟิล์มเจลลาติน โดยศึกษาในลักษณะการเตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ผสม แล้วจึงทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มผสมระหว่างเจลลาตินและสารไฮโดรคอลลอยด์ (G/HC) ต่างๆ ดังนี้

2.3.1 การเตรียมสารละลายฟิล์มจากพอลิเมอร์ต่างๆ

(A) สารละลายฟิล์มเจลลาติน

เตรียมสารละลายฟิล์มเจลลาติน ตามวิธีของ Jongjareonrak และคณะ (2006a) นำเจลลาตินผงมาละลายด้วยน้ำกลั่นได้เป็นสารละลายความเข้มข้นโปรตีนร้อยละ 2 (W/V) เติมกลีเซอรอลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของโปรตีน กวนผสมให้เข้ากัน 10 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายฟิล์มมาให้ความร้อนพร้อมกวนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที

(B) สารละลายฟิล์มแป้งข้าวเจ้า

เตรียมสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเจ้า โดยดัดแปลงวิธีของ Dias และคณะ (2010) ผสมแป้งข้าวเจ้าในน้ำกลั่น ให้ได้เป็นสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 2 (w/v) ปรับพีเอชของส่วนผสมให้ได้พีเอช 11 แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้เกิดการเจลลาติไนซ์ แล้วเติมกลีเซอรอลร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของแป้ง กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

(C) สารละลายฟิล์มโคโตแซน

เตรียมสารละลายฟิล์มโคโตแซน โดยดัดแปลงวิธีของ Pranoto และคณะ (2005) นำโคโตแซนผงมาละลายในสารละลายกรดอะซิติกติกเข้มข้นร้อยละ 1(w/v) ให้ได้เป็นสารละลายความเข้มข้นโคโตแซนร้อยละ 2 (w/v) กวนผสมจนโคโตแซนละลาย เติมกลีเซอรอลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของโคโตแซน แล้วกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

(D) สารละลายฟิล์มโปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง (Soy protein isolate: SPI)

เตรียมสารละลายฟิล์ม SPI โดยดัดแปลงวิธีของ Cao และคณะ (2007) ผสมผง SPI ในน้ำกลั่นให้ได้เป็นสารละลายความเข้มข้น SPI ร้อยละ 2 (w/v) ปรับพีเอชสารละลายเป็นพีเอช 11 แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ SPI ละลาย แล้วเติมกลีเซอรอลร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ SPI กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

(E) สารละลายฟิล์มเคิร์ดแลน

เตรียมสารละลายฟิล์มเคิร์ดแลน โดยทำการผสมผงเคิร์ดแลนในน้ำกลั่นให้ได้สารละลายความเข้มข้นเคิร์ดแลนร้อยละ 2 (w/v) แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผงเคิร์ดแลนละลาย แล้วเติมกลีเซอรอลร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของเคิร์ดแลน กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

2.3.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง G และ HC ชนิดต่างๆ และการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มผสม

ผสมสารละลายฟิล์มเจลาตินกับสารละลายไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างเจลาตินต่อไฮโดรคอลลอยด์ เท่ากับ 10/0, 8/2, 6/4, 5/5, และ 0/10 (โดยน้ำหนักแห้ง) กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กำจัดฟองอากาศโดยวิธี sonication เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยการเทสารละลายฟิล์มผสมต่างๆ ในปริมาณ 4 กรัมลงในเบ้าซิลิโคนขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ระเหยน้ำบางส่วนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง และนำไปทำให้แห้งในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำฟิล์มไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| - ความหนาของฟิล์ม | เช่นเดียวกับข้อ 2.2.2 (1) |
| - สมบัติเชิงกล | เช่นเดียวกับข้อ 2.2.2 (2) |
| - การซึมผ่านไอน้ำ | เช่นเดียวกับข้อ 2.2.2 (3) |
| - สีและความโปร่งใส | เช่นเดียวกับข้อ 2.2.2 (4) |

2.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete randomized design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test การวิเคราะห์ข้อมูลใช้โปรแกรมสถิติ SPSS for windows, SPSS Inc. (Chicago, IL)

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบทางเคมีของเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเจลาตินจากแหล่งต่างๆ ที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการทำฟิล์ม ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีปริมาณ ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า อยู่ในช่วงร้อยละ 7.57 – 18.07, 79.14 – 89.35, 0.14 – 0.55 และ 0.29 – 1.11 ตามลำดับ องค์ประกอบที่แตกต่างกันในเจลาตินชนิดต่างๆ ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น แหล่งของเจลาติน และกรรมวิธีการสกัดเจลาติน จะเห็นว่าโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักของเจลาตินมีส่วนสำคัญในการเกิดโครงสร้างฟิล์มเจลาติน

ตารางที่ 1: องค์ประกอบทางเคมีของเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

Gelatin types	Composition (% by weight)			
	Moisture	Protein	Ash	Lipid

Fish gelatin	10.55 ± 0.60 ^b	89.35 ± 1.90 ^a	0.14 ± 0.03 ^b	0.41 ± 0.05 ^c
Porcine gelatin	7.57 ± 0.25 ^c	91.78 ± 2.73 ^a	0.14 ± 0.01 ^b	0.29 ± 0.07 ^c
Bovine gelatin	10.52 ± 0.13 ^b	83.96 ± 1.60 ^b	0.54 ± 0.08 ^a	3.88 ± 0.13 ^a
Chicken gelatin	18.07 ± 0.02 ^a	79.14 ± 2.60 ^{ab}	0.55 ± 0.05 ^a	1.11 ± 0.19 ^b

ตารางที่ 2 แสดงค่าความแข็งแรงของเจลของเจลาตินชนิดต่างๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 219.33 – 250.86 g โดยที่เจลาตินจากหมูและวัวมีค่าความแข็งแรงเจลสูงที่สุด รองลงมาคือเจลาตินจากไก่ ส่วนเจลาตินจากปลาให้ค่าความแข็งแรงเจลต่ำที่สุด โดยทั่วไปความแข็งแรงเจลของเจลาตินทางการค้าอยู่ในช่วง 100 – 300 g ค่าความแข็งแรงเจลมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างร่างแหและสมบัติทางกายภาพของเจลาตินเจล (Benjakul *et al.*, 2004) และมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนในเจลาติน จากการทดลองพบว่าปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนของเจลาตินต่างๆ อยู่ในช่วง 168.16 – 208.67 mg/g gelatin ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับความแข็งแรงของเจลเจลาติน โดยที่เจลาตินจากหมูและวัวมีปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนไม่แตกต่างกัน ($p < 0.05$) และมีค่ามากกว่าปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนที่พบในเจลาตินจากไก่ ส่วนเจลาตินจากปลามีปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนต่ำที่สุด ($p > 0.05$) โดยทั่วไปปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนในเจลาตินจากสัตว์บกมีค่าสูงกว่าเจลาตินจากสัตว์น้ำ มีผลให้ความแข็งแรงของเจลที่ได้มีค่าสูงกว่า (Benjakul *et al.*, 2004; 2007) อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงเจลยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเจลาติน ตลอดจนความเป็นระเบียบของโครงสร้างร่างแหของเจลในระหว่างการเกิดเจล ความแข็งแรงของเจลและปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนของเจลาตินอาจส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้แตกต่างกัน (Benjakul *et al.*, 2007)

ค่าสีของผงเจลาตินจากแหล่งต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 พบว่า เจลาตินผงมีค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE^* อยู่ในช่วง 76.53-93.45, 0.04-4.12, 12.23-22.93 และ 11.92-28.65 ตามลำดับ โดยที่เจลาตินจากไก่มีค่าสีโดยรวมสูงที่สุดโดยเฉพาะค่าสีเหลือง รองลงมาเป็นเจลาตินจากวัว ส่วนสีของเจลาตินจากปลาและเจลาตินจากหมูมีค่าสีใกล้เคียงกัน ความแตกต่างของสีอาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบ รงควัสดุในเจลาตินที่แตกต่างกัน ตลอดจนกรรมวิธีการสกัดและสภาวะที่ใช้ในการสกัดเจลาตินมีผลต่อสีของเจลาตินเช่นกัน

ตารางที่ 2: ค่าสี ความแข็งแรงของเจล และปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนของเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

Gelatin types	Color parameters of gelatin powder				Gel strength (g)	Hydroxyproline content (mg/g dried sample)
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*		
Fish gelatin	92.07±0.01 ^b	0.30±0.04 ^c	12.72±0.05 ^c	12.51±0.06 ^c	219.33±2.25 ^c	168.16±5.19 ^d
Porcine gelatin	93.45±0.02 ^a	0.04±0.02 ^d	12.23±0.05 ^d	11.92±0.05 ^d	249.71±1.71 ^a	208.67±6.02 ^a
Bovine gelatin	83.23±0.01 ^c	2.07±0.02 ^b	19.25±0.06 ^b	21.69±0.05 ^b	250.86±1.72 ^a	197.94±8.85 ^{ab}
Chicken	76.53±0.14 ^b	4.12±0.05 ^a	22.93±0.12 ^a	28.65±0.12 ^a	230.41±1.12 ^b	181.16±6.65 ^c

2. การเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มจากเจลาตินแหล่งต่างๆ คือ เจลาตินจากปลา เจลาตินจากวัว และเจลาตินจากไก่ โดยการเทหล่อสารละลายฟิล์มที่ความเข้มข้นโปรตีนร้อยละ 2 และเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ร้อยละ 25 ของปริมาณโปรตีน พบว่า เจลาตินทั้งสามชนิดสามารถเกิดเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี โดยฟิล์มที่ได้มีความใส และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถลอกออกจากเบ้าพิมพ์ได้ดี

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานบางประการของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 โดยพบว่า ฟิล์มเจลาตินที่ได้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.028 – 0.031 mm ฟิล์มเจลาตินจากหมูและวัวมีค่าการต้านทานแรงดึง (tensile strength: TS) ไม่แตกต่างกันและมีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือฟิล์มเจลาตินจากไก่ ส่วนฟิล์มเจลาตินจากปลาที่มีค่า TS ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ฟิล์มเจลาตินจากหมู วัว และไก่มีค่าการยืดตัวเมื่อขาด (elongation at break: EAB) ต่ำกว่าฟิล์มเจลาตินจากปลาตามลำดับ ($p < 0.05$) โดยที่ฟิล์มเจลาตินจากหมู วัว และไก่มีค่า EAB ที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แสดงว่าฟิล์มเจลาตินจากหมูและวัวมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อยกว่าฟิล์มเจลาตินจากแหล่งอื่นๆ ที่ทำการศึกษา ความแข็งแรงของฟิล์มขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีน ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างขององค์ประกอบ ขนาดโมเลกุลโปรตีน องค์ประกอบของกรดอะมิโนของโปรตีน ซึ่งมีผลต่อชนิดและปริมาณการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีน โดยเจลาตินจากหมูและวัวมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนชนิดไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) สูงกว่าเจลาตินจากสัตว์ไก่ และจากปลา (ตารางที่ 2) ทำให้เจลาตินจากวัวและหมูมีความแข็งแรงมากกว่าเจลาตินจากไก่และจากปลาตามลำดับ หมู่ไฮดรอกซิลของไฮดรอกซีโพรลีนในเจลาตินทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเจลาติน ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มสูงขึ้น

สำหรับค่าการซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability: WVP) ของฟิล์มเจลาติน (ตารางที่ 2) พบว่า ฟิล์มเจลาตินจากหมู จากวัว และจากไก่มีค่า WVP ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $1.55\text{--}1.68 \times 10^{-12}$ g.m/m².s.Pa ในขณะที่ฟิล์มเจลาตินจากปลามีค่า WVP ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเจลาตินจากสัตว์น้ำมีปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์บก (ตารางที่ 2) ทำให้ฟิล์มมีความขบข่นน้อยกว่าเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ขบข่นน้อยกว่า ไอน้ำจึงซึมผ่านฟิล์มเจลาตินจากปลาได้ต่ำกว่า

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีและความโปร่งใสของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ พบว่า ฟิล์มเจลาตินมีค่า L^* และค่า a^* ไม่แตกต่างกันมากนัก ฟิล์มเจลาตินจากหมูและจากวัวมีค่า b^* (สีเหลือง) สูงกว่าฟิล์มเจลาตินจากไก่และจากปลาตามลำดับ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามฟิล์มเจลาตินจากหมู จากวัว และจากไก่มีค่าสีโดยรวม (total color difference: ΔE^*) ที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเจลาตินจากหมูและจากวัวมีสีเข้มและเหลืองมากกว่าฟิล์มเจลาตินจากแหล่งอื่นๆ ที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะเจลาตินจากปลาซึ่งมีสีอ่อนที่สุด สีของฟิล์มที่แตกต่างกันอาจเกิดจากรงควัตถุให้สีในธรรมชาติที่ต่างกันไปในแหล่งวัตถุดิบของเจลาตินต่างๆ รวมทั้งวิธีการเตรียมเจลาตินที่ต่างกัน อาจส่งผลต่อสีของเจลาตินที่ได้แตกต่างกัน นอกจากนี้พบว่าฟิล์มเจลาตินจากหมูและจากวัวมีค่า transparency value สูงกว่าฟิล์มเจลาตินจากไก่และจากปลา ($p < 0.05$) ค่า transparency value สูง

แสดงว่าฟิล์มมีความใส่น้อยกว่า ดังนั้นฟิล์มเจลาตินจากหมูและจากวัวมีความใส่น้อยที่สุด ในขณะที่ฟิล์มเจลาตินจากปลามีความใส่มากที่สุดซึ่งไม่แตกต่างจากฟิล์มเจลาตินจากไก่ ทั้งนี้อาจเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลเจลาตินที่สูงกว่าตลอดจนสารให้สีที่มีมากกว่าในฟิล์มเจลาตินจากหมูและจากวัว ทำให้แสงสามารถส่องผ่านฟิล์มดังกล่าวได้น้อยกว่า

ตารางที่ 3: ความหนา สมบัติเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

Film samples	Thickness (mm)	Mechanical properties		WVP ($\times 10^{-12}$ g.m/m ² .s.Pa)
		Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	
Fish gelatin	0.029 $\pm$ 0.002 ^a	17.10 $\pm$ 3.85 ^c	19.50 $\pm$ 3.01 ^a	1.09 $\pm$ 0.08 ^b
Porcine gelatin	0.030 $\pm$ 0.003 ^a	36.39 $\pm$ 1.90 ^a	8.60 $\pm$ 1.53 ^b	1.58 $\pm$ 0.08 ^a
Bovine gelatin	0.031 $\pm$ 0.004 ^a	34.00 $\pm$ 3.08 ^a	8.53 $\pm$ 1.05 ^b	1.68 $\pm$ 0.11 ^a
Chicken gelatin	0.029 $\pm$ 0.005 ^a	24.05 $\pm$ 2.46 ^b	8.26 $\pm$ 1.29 ^b	1.53 $\pm$ 0.10 ^a

ตารางที่ 4: ค่าสีและความใสของฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

Film samples	Color parameter				Transparency value [#]
	L*	a*	b*	ΔE^*	
Fish gelatin	91.21 $\pm$ 0.05 ^a	-0.98 $\pm$ 0.03 ^a	2.13 $\pm$ 0.04 ^c	3.49 $\pm$ 0.20 ^b	2.29 $\pm$ 0.70 ^b
Porcine gelatin	90.25 $\pm$ 0.05 ^c	-0.99 $\pm$ 0.03 ^a	2.86 $\pm$ 0.06 ^a	4.55 $\pm$ 0.16 ^a	3.79 $\pm$ 0.70 ^a
Bovine gelatin	90.71 $\pm$ 0.02 ^b	-1.04 $\pm$ 0.07 ^b	3.02 $\pm$ 0.03 ^a	4.33 $\pm$ 0.32 ^a	4.21 $\pm$ 0.83 ^a
Chicken gelatin	90.21 $\pm$ 0.04 ^c	-1.04 $\pm$ 0.02 ^b	2.59 $\pm$ 0.04 ^b	4.47 $\pm$ 0.24 ^a	2.97 $\pm$ 0.26 ^b

[#] Transparency value ที่มีค่าน้อยแสดงว่าฟิล์มมีความใสมาก

ตารางที่ 5 แสดงค่าการละลายน้ำของฟิล์มและการละลายของโปรตีนในฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ พบว่า ฟิล์มเจลาตินจากหมู จากวัวและจากปลาสามารถละลายได้หมด (100%) โดยปกติฟิล์มเจลาตินสามารถละลายน้ำได้ดีเนื่องจากสมบัติความชอบน้ำสูงของโมเลกุลเจลาติน อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าฟิล์มเจลาตินจากไก่ละลายได้ร้อยละ 90.66 โดยมีตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหลงเหลืออยู่หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเนื่องจากในเจลาตินจากไก่อาจเกิดพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้นได้บางส่วน ทำให้โมเลกุลเจลาตินในโครงสร้างฟิล์มบางส่วนไม่ละลายน้ำ จากการตรวจสอบการละลายของโปรตีนในฟิล์ม พบว่าฟิล์มเจลาตินจากหมู จากวัว และจาก

ปลาที่มีปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาในน้ำที่ไม่แตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณร้อยละ 85.07 – 87.22 ส่วนฟิล์มเจลาตินจากไก่มีการละลายของโปรตีนต่ำที่สุดร้อยละ 79.45 ($p < 0.05$) ซึ่งผลเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการละลายน้ำของฟิล์ม อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าค่าการละลายของโปรตีนในฟิล์มเจลาตินทุกชนิดมีค่าต่ำกว่าการละลายของฟิล์ม ความแตกต่างดังกล่าวแสดงถึงองค์ประกอบของกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มที่ละลายออกมาในระหว่างการละลายฟิล์ม

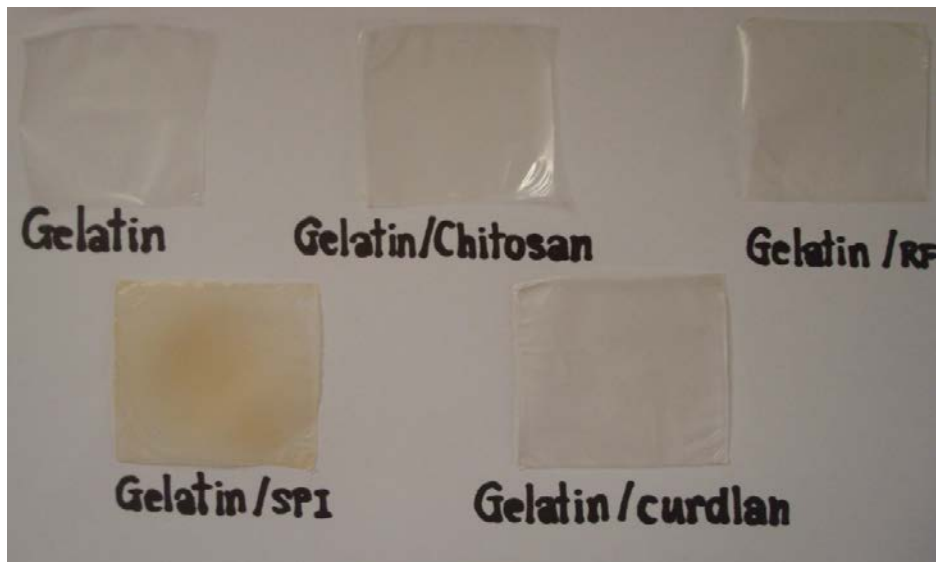
ตารางที่ 5: การละลายของฟิล์มและการละลายของโปรตีนในฟิล์มเจลาตินจากแหล่งต่างๆ

Film samples	Film solubility (%)	Protein solubility (%)
Fish gelatin	100.00±0.00 ^a	87.22±0.88 ^a
Porcine gelatin	100.00±0.00 ^a	86.17±1.46 ^a
Bovine gelatin	100.00±0.00 ^a	85.07±1.31 ^a
Chicken gelatin	90.66±1.08 ^b	79.45±2.14 ^b

3. ผลของชนิดและปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากปลา

3.1 ลักษณะปรากฏและความหนา

จากการเตรียมฟิล์มผสมซึ่งเตรียมได้จากการเทหล่อสารละลายฟิล์มเจลาตินจากปลากับสารละลายไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ (ไคโตแซน โปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง แป้งข้าวเจ้า และเคอร์ดีแลน) โดยเตรียมในอัตราส่วนระหว่างเจลาตินต่อไฮโดรคอลลอยด์ เท่ากับ 10/0, 8/2, 6/4, 5/5 และ 0/10 (โดยน้ำหนัก) ฟิล์มที่ได้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.033-0.057 ฟิล์มที่ได้ยังมีลักษณะปรากฏแตกต่างกันไปตามชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 1 ฟิล์มเจลาติน, ฟิล์มเจลาติน/ไคโตแซน และฟิล์มเคอร์ดีแลนมีลักษณะฟิล์มที่เรียบใส และ โปร่งแสง ฟิล์มเจลาตินผสมแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ สีขาวขุ่น ผิวทั้งสองด้านต่างกัน ด้านหนึ่งเรียบและมันวาว อีกด้านหนึ่งขรุขระและไม่มันวาว ส่วนฟิล์มเจลาติน/ไอโซเลตจากถั่วเหลือง มีลักษณะผิวที่ไม่เรียบ และมีสีเหลืองขุ่น ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาคบางส่วนของไอโซเลตถั่วเหลืองอาจละลายได้ไม่ดีและเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกัน จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความใสลดลง



รูปที่ 1 ตัวอย่างฟิล์มเจลาตินจากปลาและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ (เจลาติน/ไฮโดรคอลลอยด์ = 8/2)

3.2 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินจากปลา ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 2 พบว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลต่อค่าการต้านทานแรงดึง (TS) และค่าการยืดตัวเมื่อขาด (EAB) ของฟิล์มแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารไฮโดรคอลลอยด์ (ไคโตแซน แป้งข้าวเจ้า ซอยโปรตีนไอโซเลต และเคอร์ดแลน) และอัตราส่วนผสมระหว่างเจลาตินต่อไฮโดรคอลลอยด์ (8/2, 6/4, 5/5 และ 0/10) ฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไคโตซาน ในอัตราส่วน 8/2 มีค่า TS สูงที่สุดและมีค่าที่สูงกว่าฟิล์มเจลาตินชุดควบคุม ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ติดต่อกัน อย่างไรก็ตามการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนอื่นๆ มีผลให้ค่า TS ของสารละลายฟิล์มเจลาตินลดลง ตามปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มไฮโดรคอลลอยด์มี TS ที่ต่ำกว่าฟิล์มเจลาติน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากฟิล์มไคโตแซนมีความนิ่มและอ่อนตัวมากกว่าฟิล์มเจลาติน ส่วนฟิล์มไฮโดรคอลลอยด์อื่นๆ มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นน้อยกว่าฟิล์มเจลาติน (ตารางที่ 6) ความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ต่างชนิดแตกต่างกันย่อมเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อชนิดของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ ตลอดจนความสามารถในการรวมตัวเข้ากันได้ (miscibility) ของโมเลกุลพอลิเมอร์

ตารางที่ 6: ค่าความต้านทานแรงดึง (TS) และค่าการยืดตัวเมื่อขาด (EAB) ของฟิล์มเจลาติน และฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

Film	Blend ratio	TS (MPa)	EAB (%)
Gelatin	-	9.09±2.72 ^b	21.56±4.24 ^{cde}
Gelatin (pH11)	-	11.13±0.04 ^g	20.01±0.69 ^{hi}
Gelatin /chitosan	8/2	12.54±2.24 ^a	27.86±7.28 ^b
	6/4	3.16±0.50 ^{ef}	26.19±4.51 ^{bc}
	5/5	3.58±0.09 ^{ef}	22.32±1.48 ^{cd}
	0/10	3.00±0.12 ^{efg}	44.13±3.59 ^a
Gelatin /RF	8/2	5.79±0.88 ^{cd}	5.39±0.62 ^{ijk}
	6/4	4.40±0.5 ^{de}	3.91±0.40 ^k
	5/5	2.92±0.36 ^{efg}	3.70±0.86 ^k
	0/10	1.96±0.57 ^{fg}	2.07±0.60 ^k
Gelatin /SPI	8/2	3.66±0.30 ^{ef}	17.26±3.80 ^{def}
	6/4	2.76±0.23 ^{efg}	12.51±1.55 ^{fgh}
	5/5	2.23±0.23 ^{fg}	11.68±1.66 ^{gh}
	0/10	1.27±0.11 ^g	8.06±1.27 ^{hij}
Gelatin /Curdlan	8/2	1.87±0.56 ^{fg}	19.57±3.17 ^{de}
	6/4	1.38±0.30 ^g	16.44±1.76 ^{efg}
	5/5	1.11±0.04 ^g	10.01±0.69 ^{hi}
	0/10	N/D	N/D

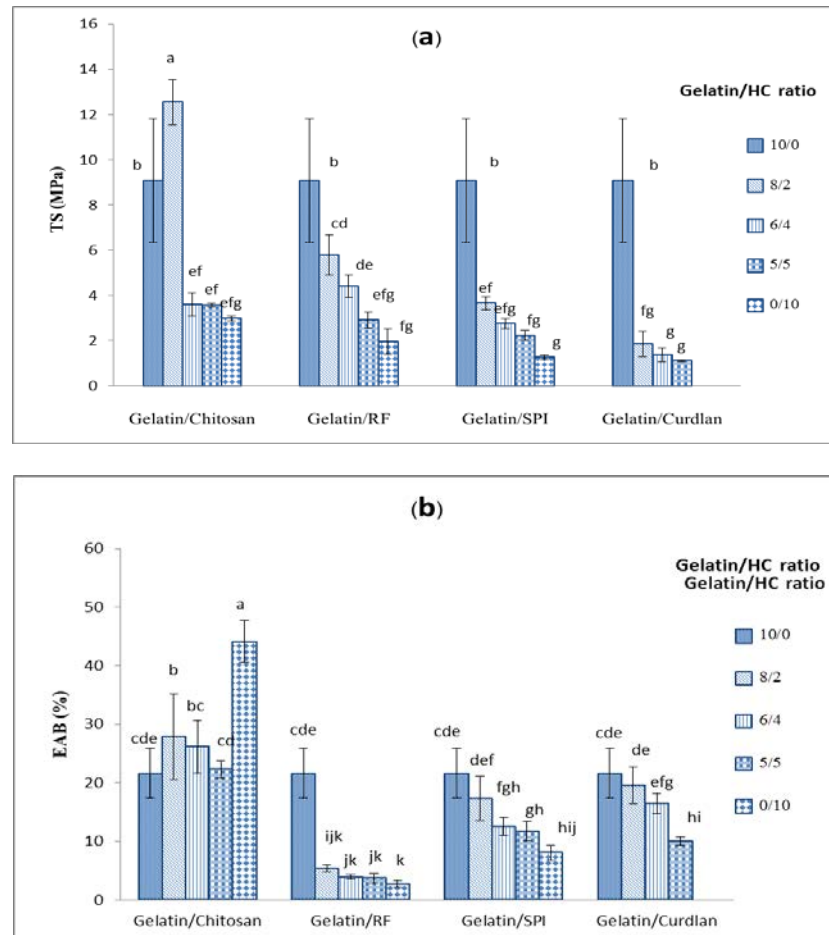
*ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

*N/D = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากฟิล์มมีความเปราะไม่สามารถลอกออกมาเป็นแผ่นได้

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ต่อค่า EAB พบว่า ฟิล์มไคโตแซน มีค่า EAB สูงที่สุด ($P<0.05$) และสูงกว่าฟิล์มเจลาติน ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มไฮโดรคอลลอยด์ ชนิดอื่นที่จะมีค่า EAB ต่ำกว่าฟิล์มเจลาติน ($P<0.05$) ฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไคโตแซนมีค่า EAB สูงกว่าฟิล์มเจลาติน ในขณะที่ฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นมีค่าต่ำกว่าฟิล์มเจลาติน ($P<0.05$) โดยที่ฟิล์มผสมมีค่า EAB ลดลงเมื่อปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้เพิ่มขึ้น ($P<0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแยกเฟสที่มีโอกาสเกิดสูงขึ้น ทำให้ความแข็งแรงและการยึดตัวของฟิล์มผสมลดลง

Gómez-Estaca และคณะ (2011) รายงานว่าสมบัติเชิงกลของเจลาตินจะลดลง เมื่อมีการเติมไคโตแซน ซึ่งไม่เพียงแต่ผลของสัดส่วนเจลาตินในการขึ้นรูปสารละลายฟิล์มเท่านั้น อันตรกิริยาก็มีผลด้วยเช่นกัน ผลจะเด่นชัดมากยิ่งขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของไคโตแซนที่เติมลงไปสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไคโตแซนไปขัดขวางการก่อตัวของนิวเคลียส และส่งผลต่อการเติบโตของโครงสร้าง Triple helix ในสายโซ่โมเลกุล ไคโตแซนเกิดอันตรกิริยากับคอลลาเจนด้วยพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมโยงใหม่ขึ้นมา และโครงสร้าง Triple helical ของคอลลาเจนนั้นถูกแทนที่ด้วยไคโตแซนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามการก่อตัวของเจลาติน-ไคโตแซนจะทำให้เกิดผลึกของระบบลดลง (Sionkowska *et al.*, 2004) ปัจจัยหลักที่กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพและมีผลต่อคุณภาพของเจลาติน คือ องค์ประกอบ

ของกรดอะมิโน และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Gómez- Guilén *et al.*, 2007) ซึ่งปัจจัยทั้งสองดังกล่าวจะส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างเจลาตินระหว่างเจลาตินและไคโตแซน



รูปที่ 2 ค่าการต้านทานแรงดึง (TS) และค่าการยืดตัวเมื่อขาด (EAB) ของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

3.3 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability)

จากการวิเคราะห์ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 10/0, 8/2, 6/4, 5/5, และ 0/10 (โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีฟิล์มเจลาตินเป็นชุดควบคุม ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 3 พบว่าฟิล์มเจลาตินมีค่า WVP สูงกว่าฟิล์มไฮโดรคอลลอยด์และฟิล์มผสมที่ทำการศึกษา ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสมบัติที่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ที่สูงของเจลาตินนั่นเอง ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้ามีค่า WVP ต่ำสุด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดผลึกของโมเลกุลของแป้งข้าวเจ้า ค่า WVP ของฟิล์ม SPI มีค่าต่ำเนื่องจากสามารถเกิดพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลได้ ทำให้ช่วยขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำภายในตัวฟิล์มได้ ฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ทุกชนิดในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ต่ำกว่าฟิล์มเจลาตินชุดควบคุมที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผล

มาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของเจลาตินและโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ในฟิล์มลดลง เจลาตินมีจุดด้อยในด้านคุณสมบัติเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำ ที่อาจส่งผลกระทบต่อข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ซึ่งมีวิธีการหลายวิธีด้วยกันที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเจลาติน โดยการทรีตทางเคมีหรือเอนไซม์ (Cao *et al.*, 2007) และอาจมีการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ขึ้นรูปเป็นฟิล์มคอมพอสิต เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้น การผสมกับวัสดุที่ไม่มีข้อเช่น ไขมัน หรือน้ำมัน จะช่วยลดอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Jongjareonrak *et al.*, 2006b) อย่างไรก็ตามค่า WVP ของฟิล์มผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ที่ลดลงหรือการเกิดการแยกเฟสที่สูงขึ้น ดังนั้นการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนที่ทำการศึกษามีการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเจลาตินได้

3.4 ค่าสีและความโปร่งใสของฟิล์ม

ตารางที่ 8 แสดงค่าสีของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ ค่าสีแสดงด้วยค่า L^* (ความสว่าง), a^* (สีแดง/เขียว) และ b^* (สีน้ำเงิน/เหลือง) ฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมที่เติมไคโตแซนและแป้งข้าวเจ้า มีค่า L^* แตกต่างกันเล็กน้อยอยู่ในช่วง 90.12 - 91.34 ในขณะที่ฟิล์มผสมที่เติม SPI และเคิร์ดแลนมีค่า L^* ที่ต่ำกว่า (87.77 - 89.31) ฟิล์มทุกชนิดที่ทำการวิเคราะห์มีค่า a^* ติดลบ และค่า b^* เป็นบวก แสดงว่า ฟิล์มมีสีไปทางสีเขียว และสีเหลืองเล็กน้อย ฟิล์ม SPI และฟิล์มผสมที่เติม SPI มีค่า b^* สูงกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากรงควัตถุที่มีอยู่ใน SPI รวมทั้งปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) สูงกว่าในฟิล์มดังกล่าว จึงทำให้ฟิล์มผสมที่เติม SPI มีค่าสีเหลืองมากกว่าฟิล์มที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ ปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่า b^* ของฟิล์มผสมแตกต่างกันเล็กน้อย Gabriela และคณะ (2009) ศึกษาสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและโปรตีนไฮโซเลตถั่วเหลือง (SPI) ที่อัตราส่วน SPI:เจลาตินเท่ากับ 0, 25, 50, 75, 100% (w/w) พบว่าฟิล์ม SPI มีสีเหลือง และเมื่อสัดส่วนของ SPI ที่เติมลงไปในฟิล์มผสมเพิ่มขึ้น ฟิล์มผสมจะมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น

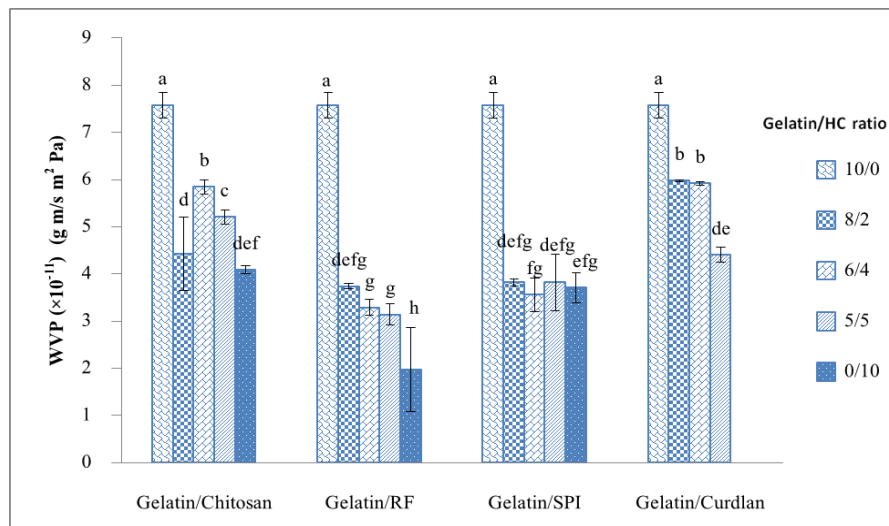
ตารางที่ 7: ค่าการซึมผ่านไอน้ำ(WVP) ของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

Film	Blend ratio	WVP ($\times 10^{-11}$ g.m/m ² .s.Pa)
Gelatin	-	7.58 $\pm$ 0.27 ^a
Gelatin (pH11)	-	7.21 $\pm$ 0.46 ^a
Gelatin /chitosan	8/2	4.43 $\pm$ 0.78 ^d
	6/4	5.85 $\pm$ 0.15 ^b
	5/5	5.21 $\pm$ 0.15 ^c
	0/10	4.09 $\pm$ 0.08 ^{def}
Gelatin /RF	8/2	3.74 $\pm$ 0.06 ^{defg}
	6/4	3.29 $\pm$ 0.17 ^g
	5/5	3.14 $\pm$ 0.23 ^g

Gelatin /SPI	0/10	1.98±0.89 ^h
	8/2	3.82±0.07 ^{defg}
	6/4	3.56±0.36 ^{fg}
	5/5	3.82±0.60 ^{defg}
Gelatin /Curdlan	0/10	3.71±0.32 ^{efg}
	8/2	5.98±0.02 ^b
	6/4	5.92±0.04 ^b
	5/5	4.40±0.16 ^{de}
	0/10	N/D

*ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

*N/D = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากฟิล์มมีความเปราะไม่สามารถลอกออกมาเป็นแผ่นได้



รูปที่ 3 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 8: ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

Film	Blend ratio	L^*	a^*	b^*
Gelatin	-	90.12±0.13 ^b	-1.29±0.03 ^{abc}	2.64±0.13 ^e
Gelatin(pH11)	-	90.97±0.11 ^{ab}	-1.39±0.92 ^d	2.92±0.27 ^e
Gelatin/Chitosan	8/2	90.55±0.21 ^{abc}	-1.39±0.03 ^d	3.22±0.18 ^{de}
	6/4	90.06±0.11 ^{bcd}	-1.33±0.21 ^{cd}	3.06±0.10 ^e
	5/5	90.27±0.05 ^{bc}	-1.31±0.11 ^{bcd}	3.14±0.14 ^{de}
	0/10	90.42±0.61 ^{abc}	-1.36±0.05 ^{cd}	3.45±0.51 ^{de}
Gelatin/RF	8/2	90.88±0.44 ^{ab}	-1.62±0.61 ^f	4.28±0.41 ^d

Gelatin/SPI	6/4	91.34±0.04 ^a	-1.39±0.44 ^d	3.09±0.32 ^e
	5/5	91.23±0.29 ^a	-1.51±0.04 ^e	4.27±0.48 ^d
	0/10	90.79±0.44 ^{ab}	-1.28±0.29 ^{abc}	2.67±0.14 ^e
	8/2	89.84±0.73 ^{cd}	-1.75±0.44 ^g	7.80±0.97 ^c
	6/4	87.77±0.41 ^f	-1.71±0.73 ^f	9.32±0.35 ^b
Gelatin/Curdlan	5/5	88.87±0.91 ^e	-1.63±0.41 ^f	9.33±1.95 ^b
	0/10	87.98±0.82 ^f	-1.76±0.91 ^g	11.40±0.60 ^a
	8/2	88.92±0.30 ^e	-1.22±0.82 ^a	3.00±0.03 ^e
	6/4	89.18±0.27 ^{de}	-1.24±0.30 ^{ab}	3.41±0.15 ^{de}
	5/5	89.31±0.92 ^{de}	-1.21±0.27 ^a	3.62±0.24 ^{de}
	0/10	N/D	N/D	N/D

+ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

*N/D = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากฟิล์มมีความเปราะไม่สามารถลอกออกมาเป็นแผ่นได้

ตารางที่ 9 แสดงค่าการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ (200-800 nm) ของแผ่นฟิล์มเจลาตินและฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ ฟิล์มทุกชนิดมีค่าการส่องผ่านแสงในช่วง UV ที่ต่ำ โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 200 nm ฟิล์มมีค่าการส่องผ่านแสงที่ลดลงเมื่อเติมไฮโดรคอลลอยด์ในปริมาณที่สูงขึ้น อาจเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้แสงส่องผ่านแผ่นฟิล์มได้น้อยลง นอกจากนี้การแยกเฟสภายในโครงสร้างฟิล์มที่อาจเกิดขึ้น อาจส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงภายในฟิล์มมากขึ้นการส่องผ่านแสงจึงลดลง ค่า Transparency value ของฟิล์มดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่ง Transparency value สูง แสดงว่าแผ่นฟิล์มมีความใส่น้อย (ขุ่นมาก) จากการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ได้มีความใสลดลง (ค่า Transparency สูงขึ้น) เมื่อปริมาณสารละลายไฮโดรคอลลอยด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเติม SPI และแป้งข้าวเจ้า (Rice flour) ที่อาจเกิดจากการไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันของเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด รวมทั้งรังควัตถุต่างๆที่อยู่ใน SPI และ RF หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มผสมดังกล่าว จึงส่งผลทำให้เกิดการขัดขวางการส่องผ่านของแสง จึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่น ในขณะที่ฟิล์มเจลาตินนั้นยอมให้แสงผ่านได้มากกว่า

ตารางที่ 9: ค่าการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่นต่างๆและ ค่า Transparency value ของฟิล์มเจลาติน และฟิล์มผสมระหว่างเจลาตินและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและอัตราส่วนต่างๆ

Film	Blend ratio	Wave length (nm)								Transparency value
		200	280	350	400	500	600	700	800	
Gelatin	-	0.015	50.638	78.798	84.355	87.975	89.223	89.925	90.353	1.380±0.093 ^h
Gelatin (pH 11)	-	0.0125	33.0915	54.09	60.865	668.42	72.535	75.225	77.03	4.834±0.043 ^f
Gelatin/Chaitosan	8/2	0.023	55.595	77.605	84.818	88.788	89.885	90.49	90.823	1.748±0.027 ^h
	6/4	0.023	52.19	75.92	83.825	88.25	89.5125	90.167	90.577	1.772±0.108 ^h
	5/5	0.02	46.707	70.712	79.342	85.242	87.392	88.595	89.19	2.086±0.078 ^h
	0/10	0.027	44.757	64.357	75.493	81.572	83.56	84.807	85.705	1.973±0.045 ^e
	8/2	0.003	39.135	40.32	46.575	53.712	57.517	60.063	61.953	6.843±0.092 ^{de}
Gelatin/RF	6/4	0.008	15.0175	34.848	40.748	46.205	48.923	50.69	52.038	7.374±0.857 ^{ade}
	5/5	0.008	7.602	23.87	30.185	35.955	38.933	40.878	42.35	8.959±0.635 ^{bcd}
	0/10	0.0225	20.158	47.465	55.993	62.875	66.073	68.07	69.5	4.574±0.175 ^{fg}
	8/2	0	4.388	31.187	39	46.16	49.59	51.917	3.7425	8.8712±0.245 ^{bc}
Gelatin/SPI	6/4	0.005	0.265	13.643	18.388	21.933	23.498	24.493	25.225	23.054±4.568 ^a
	5/5	0	0.0375	16.6	27.533	35.533	38.39	38.643	41.443	9.561±1.682 ^b
	0/10	0	0.0125	23.463	44.03	58.188	62.378	64.78	66.4	5.456±3.189 ^{cde}

Gelatin/Curdlan	8/2	0.008	28.903	49.955	55.287	61.903	69.992	66.84	68.695	2.233±1.55 ^{gh}
	6/4	0.005	48.733	51.778	54.438	54.4375	55.592	56.263	56.775	6.11±0.352 ^{ef}
	5/5	0.005	23.403	32.685	34.545	36.313	37.155	37.653	38.03	10.001±0.136 ^f
	0/10	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

+ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

*N/D = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากฟิล์มมีความเปราะไม่สามารถลอกออกมาเป็นแผ่นได้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

- ชนิดและปริมาณสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำการศึกษามีผลต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินแตกต่างกัน
- สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้มีผลลดการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเจลาตินได้
- การใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า โปรตีนไอโซเลตถั่วเหลือง และเคิร์ดแลนในปริมาณ 20-50% มีผลให้ฟิล์มเจลาตินมีสมบัติเชิงกลด้อยลง
- อย่างไรก็ตามการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดและปริมาณที่เหมาะสม คือ ไคโตแซนในปริมาณ 20% สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเจลาตินได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมศุลกากร. 2551. สถิติการนำเข้าส่งออก: เยลาติน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.customs.go.th>. [2010 February 25].
- วีรพันธุ์ เต็มหลิม. 2540. สารตกตะกอนชีวภาพจากจุลินทรีย์. วารสารสงขลานครินทร์. 19(2): 239-254.
- Avena-Bustillos, R.J., Olsen, C.W., Chiou, B., Yee, E., Bechtel, P.J. and McHugh, T.H. 2006. Water vapor permeability of mammalian and fish gelatin films. J. Food Sci. 71: 202-207.
- Bailey, A.J. and Light, N.D. 1989. Connective Tissue in Meat and Meat Products. Elsevier Applied Science. New York.
- Baker, R.A., Baldwin, E.A. and Nisperos-Carriedo, M. 1994. Edible Coating and Films for Processed Food. In Edible Coating and Films to Improve Food Quality. (eds. J.M. Kroachta, E.A. Baldwin and M. Nisperos-Carriedo) pp. 89-104. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co., Inc.
- Benjakul, S., Visessanguan, W. and Kwalumtharn, Y. 2004. The effect of whitening agents on the gel-forming ability and whiteness of surimi. Int. J. Food Sci. Technol. 39(7): 773-781.
- Benjakul, S., Visessanguan, W. and Srivilai, C. 2007. Gel properties of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi as affected by setting and porcine plasma proteins. J. Food Qual. 24(5): 453-471.
- Bergman, I. and Loxley, R. 1963. Two improved and simplified for the spectrophotometric determination of hydroxyproline. Anal. Chem. 35: 1961-1965.
- Cao, N., Fu, Y. and He, J. 2007. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. Food Hydrocolloids. 21: 1153-1162.
- Cervera, M.F., Karjalainen, M., Airaksinen, S., Rantanen, J., Krogars, K., Heinämäki, J., Colarte, A.I. and Yliruusi, J. 2004. Physical stability and moisture sorption of aqueous chitosan-amylose starch films plasticized with polyols. Eur. J. Phar. Biophar. 58(1): 69-76.
- Cuq, B., Gontard, N. and Guilbert, S. 1997. Thermal properties of fish myofibrillar proteins-based films as affected by moisture content. Polymer. 38: 2399-2405.
- Dias, A.B., Müller, C.M.O. Larotonda, F.D.S. and Laurindo, J.B. Biodegradable films based on rice starch and rice flour. J. Cereal Sci. 51(2): 213-219.
- Fernandez-diaz, M.D., Montero, P. and Gomez-Guillen, M.C. 2001. Gel properties of collagens from skins of cod (*Gadus morhua*) and hake (*Merluccius merluccius*) and their modification by coenhancers magnesium sulphate, glycerol and transglutaminase. Food Chem. 74: 161-167.

- Foegeding, A.E. and Lanier, T.C. 1996. Characteristics of Edible Muscle Tissues. *In* Food Chemistry. (Ed. O.R. Fennema) pp. 902-906. Marcel Dekker Inc. New York.
- Funami, T., Yada, H. and Nakao, Y. 1998. Thermal and rheological properties of curdlan gel in minced pork gel. *Food Hydrocoll.* 12(10): 55-64.
- Funami, T., Yada, H. and Nakao, Y. 1999. Rheological and thermal studies on gelling characteristics of curdlan. *Food Hydrocoll.* 13(8):317-324.
- Gabriela, A., Miriam, D., rez-Mateos, P., Mari C., Pilar Montero A. 2009. Structural and functional properties of soy protein isolate and cod gelatin blend films. *Food Hydrocolloids* 23 (8): 2094–2101.
- Gennadios, A., Handa, A., Froning, G.W., Weller, C.L. and Hanna, M.A. 1996. Mechanical and barrier properties of egg albumin film. *J. Food Sci.* 61: 585-589.
- Gennadios, A., Handa, A., Froning, G.W., Weller, C.L. and Hanna, M.A. 1998. Physical properties of egg white-dialdehyde starch film. *J. Agric. Food Chem.* 46: 1297-1302.
- Gennadios, A., Mchugh, T.H., Weller, C.L. and Krochta, J.M. 1994. Edible coatings and films based on proteins. *In* Edible Coatings and Films to Improve Food Quality. (Krochta, J.M., Baldwin, E.A. and Nisperos-Carriedo, M. eds.). p. 210–278. Technomic Pub. Co., Inc. Lancaster, PA.
- Gómez-Estaca, J. Gómez-Guillén, M.C., Fernández-Martín, F. and Montero, P. Effects of gelatin origin, bovine-hide and tuna-skin, on the properties of compound gelatin-chitosan films. *Food Hydrocoll.* 25(6): 1461-1469.
- Gomez-Guillen, M.C., Ihl, M., Bifani, V., Silva, A. and Montero, P. 2007. Edible films made from tuna-fish gelatin with antioxidant extracts of two different murta ecotypes leaves (*Ugni molinae Turcz.*). *Food Hydrocolloids.* 21: 1133–1143.
- Guillotin, S.E., Van Loey, A., Boulenguer, P., Schols, H.A. and Voragen A.G.J. 2007. Rapid HPLC method to screen pectins for heterogeneity in methyl-esterification and amidation. *Food Hydrocoll.* 21(1): 85-91.
- Han, J.H. and Floros, J.D. 1997. Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. *J. Plastic ilm Sheet.* 13: 287-298.
- Helcke, T. 2000. Gelatin, the food technologist's friend or foe? *Intern. Food. Ingrid.* 1: 6-8.
- Hosokawa, J., Nishiyama, M., Yoshihara, K. and Kubo, T. 1991. Reaction between chitosan and cellulose on biodegradable composite film formation. *Ind. Eng. Chem. Rec.* 30(4): 788-792.
- Iwata, K., Ishizaki, S., Handa, A. and Tanaka, M. 2000. Preparation and characterization of edible films form fish water – soluble protein. *J. Food Sci.* 66: 372-378.

- Jongjareonrak, A., Benjakul, S., Visessanguan, W. and Tanaka, M. 2006a. Skin gelatin from bigeye snapper and brownstripe red snapper: chemical compositions and effect of microbial transglutaminase on gel properties. *Food Hydrocoll.* 20: 1216-1222.
- Jongjareonrak, A., Benjakul, A., Visessanguan, W., Prodpran, T. and Tanaka, M. 2006b. Characterization of edible films from skin gelatin of brownstripe red snapper and bigeye snapper. *Food Hydrocoll.* 20: 492-501.
- Jone, R.T. 1987. Gelatin: Structure and Manufacture. In *Hard Capsules Development and Technology* (Ed. K. Ridgway) pp. 13-30. The Pharmaceutical Press. London.
- Kristo, E., Koutsoumanis, K.P. and Biliaderis, C.G. 2008. Thermal, mechanical and water vapor barrier properties of sodium caseinate films containing antimicrobials and their inhibitory action on *Listeria monocytogenes*. *Food Hydrocoll.* 22(3): 373-386.
- Krochta, J.M. 1997. Edible protein films and coatings. In *Food Proteins and Their Applications*. (Damodaran, S. and Paraf, eds.). p. 529-550. Marcel Dekker Inc. New York.
- Krochta, J.M. and De Mulder-Johnston, C. 1997. Edible and biodegradable polymer films: Challenges and opportunities. *Food Technol.* 51: 61-74.
- Lee, K.Y., Shim, J. and Lee, H.G. 2004. Mechanical properties of gellan and gelatin composite films. *Carb. Polym.* 56(2): 251-254.
- Leuenberger, B.H. 1991. Investigation of viscosity and gelation properties of different mammalian and fish gelatins. *Food Hydrocoll.* 5: 353-361.
- Muyonga, J.H., Cole, C.G.B. and Duodu, K.G. 2004. Extraction and physico-chemical characterisation of Nile perch (*Latesniloticus*) skin and bone gelatin. *Food Hydrocolloids.* 18: 581-592.
- Muzzarelli, R.A.A. 2011. Potential of chitin/chitosan-bearing materials for uranium recovery: an interdisciplinary review. *Carb. Polym.* 84(1): 54-63.
- Nakata, M., Kawaguchi, T., Kodama, Y. and Konno, K. 1998. Characterization of curdlan in aqueous sodium hydroxide. *Polymer.* 39: 6-7.
- Norland, R.E. 1990. Fish Gelatin. In *Advances in Fisheries Technology and Biotechnology for Increased profitability*. (Eds. M.N. Voight and J.K. Botta) pp. 325-333. Lancaster, PA: Technomic Publishing.
- Okuzaki, H. 2001. General theory of gel preparation. In *Gel Handbook*. Vol. I. (Eds. Y. Osada and K. Kajiwara) pp. 112-116. Academic Press. New York.
- Ou, S.Y., Kwok, K.C., and Kang, Y.J. 2004. Changes in vitro digestibility and available lysine of soy protein isolate after formation of film. *J. Food Eng.* 64: 301-305.

- Perez-Gago, M.B. and Krochta, J.M. 2005. Emulsion and bi-layer edible films. *In* Innovations in Food Packaging. (Han, J.H. ed.). p. 384–402. Elsevier Academic Press. San Diego, Calif.
- Pranoto, Y., Rakshit, S.K. and Salokhe, V.M. 2005. Enhancing antimicrobial activity of chitosan films by incorporating garlic oil, potassium sorbate and nisin. *LMT.P.* 859-865
- Quarashi, M.T., Blari, H.S. and Allen, S.J. 1992. Studies on modified chitosan membranes. II. Dialysis of low molecular weight metabolites. *J. Appl. Polym. Sci.* 263-269.
- Ribeiro, K.O., Rodrigues, M.I., Sabadini, E. and Cunha, R.L. 2004. Mechanical properties of acid sodium caseinate- κ -carrageenan gels: effect of co-solute addition. *Food Hydrocoll.* 18(1): 71-79
- Robinson, H.W. and Hadgen, C.G. 1940. The biuret reaction in the determination of serum protein. I. A study of condition necessary for the production of the stable color which bears a quantitative relationship of the protein concentration. *J. Biol. Chem.* 135: 707-725.
- Sadowska, M., Kolodziejaska, I. and Niecikowska, C. 2003. Isolation of collagen from the skin of Baltic cod (*Gadus morhua*). *Food Chem.* 81: 257-262.
- Shahidi, F. 1994. Seafood processing by-products. *In* Seafoods Chemistry, Processing, Technology and quality. (Eds. F. Shahidi and J.R. Botta) pp. 320-334. London: Blackie Academic and Professional.
- Shiku, Y., Hamaguchi, P.Y., Benjakul, S., Visessanguan, W. and Tanaka, M. 2004. Effect of surimi quality on properties of edible film based on Alaska pollack. *Food Chem.* 86: 493-499.
- Singh, D.K. and Ray, A.R. 1994. Graft copolymerization of 2 hydroxy ethylenethacrylate onto chitosan film and their blood compatibility. *J. Appl. Polym. Sci.* 1115-1121.
- Simon-Lukasik, K.V. and Ludescher, R.D. 2003. Erythrosin b phosphorescence as a probe of oxygen diffusion in amorphous gelatine films. *Food Hydrocolloids.* 15: 114-123.
- Sionkowska, A., Wisniewski, M., Skopinska, J., Kennedy, C.J. and Wess, T.J. 2004. Molecular interactions in collagen and chitosan blends. *Biomaterials.* 25(5): 795-801.
- Tada, T., Matsumoto, T. and Masuda, T. 1997. Influence of alkaline concentration on molecular association structure and viscoelastic properties of curdlan aqueous systems. *Biopolymers.* 42: 479-487.
- Tada, T., Matsumoto, T. and Masuda, T. 1998. Structure of molecular association of curdlan at dilute regime in alkaline aqueous systems. *Chem. Phys.* 228: 157-166.

- Torres, J.A. 1994. Edible films and coatings from proteins. *In* Protein Functionality in Food Systems. (Hettiarachchy, N.S. and Ziegler, G.R. eds.). p. 467–507. Marcel Dekker. New York.
- Vittayanont, M. and Benjakul, S. 2005. Extraction and characterization of collagen from chicken feet. Proceeding IFT annual meeting at New Orleans USA.
- Yang, L. and Paulson, A.T. 2000. Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films. *Food Res. Int.* 33(7): 563-570.
- Zhang, H., Nishinari, K., Williams, M.A.K., Foster, T.J. and Norton, I.T. A molecular description of the gelation mechanism of curdlan. *Int. J. Biol. Macromol.* 30: 7-16.

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์ที่ได้จากแผนงานวิจัย

โครงการวิจัยย่อยที่ 1

1. Kaewruang, P., Benjakul, S. , Prodpran, T. and Nalinanon, S. 2013. Physico chemical and functional properties of gelatin from the skin of unicorn leatherjacket (*Aluterus monoceros*) as affected by extraction conditions. *Food Bioscience.* **2**: 1 – 9.
2. Kaewruang, P., Benjakul, S. and Prodpran, T. 2013. Molecular and functional properties of gelatin from the skin of unicorn leatherjacket as affected by extracting temperatures. *Food Chemistry.* **138**: 1431 – 1437.
3. Kaewruang, P., Benjakul, S. and Prodpran, T. 2014. Characteristics and gelling property of phosphorylated gelatin from the skin of unicorn leatherjacket. *Food Chemistry.* **146**: 591-596.

โครงการวิจัยย่อยที่ 2

4. Kaewudom, P., Benjakul, S. and Kijroongrojana, K. 2013. Properties of surimi gel as influenced by fish gelatin and microbial transglutaminase. *Food Bioscience.* **1**: 39 – 47.

โครงการวิจัยย่อยที่ 3

5. Prodpran, T., Benjakul, S., Vittayanont, M. and Nalinanon, S. 2013. Physico-chemical properties of gelatin films incorporated with different hydrocolloids. *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering (IPCBE): Nutrition and Food Sciences II*. **53**: 82-86.