

ผลของการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซตต่อคุณสมบัติของเจลลาตินฟิล์ม
และความสามารถในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของผลไม้

Influence of adding Protein Hydrolysate on Gelatin Film Characteristics
and Its Anti-Browning Efficacy on Fruit Surfaces

ครองศักดิ์ ภัคธนกนก^{1*} รพีพรรณ กองตุม² และ รินรำไพ พุทธิพันธ์³

Kongsakda Phakthanakanok^{1*} Rapeepan Kongtoom¹ and Rinrampai Puttipan²

Received 24 ตุลาคม 2566 Revised 21 มกราคม 2567 Accepted 7 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโปรตีนไฮโดรไลเซตต่อคุณสมบัติของฟิล์มเจลลาติน ซึ่งโปรตีนไฮโดรไลเซตผลิตโดยการย่อยกากถั่วเหลืองด้วยเอนไซม์โบรมิเลน ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตความเข้มข้นร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 3 ทางด้านกายภาพและด้านการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของฟิล์มทุกด้านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซตที่เติมลงไป ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 3 มีคุณสมบัติด้านการต้านทานการดึง และการซึมผ่านไอน้ำที่ดีที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.50 MPa และ 1.15 g mm/kPa h⁻¹ m⁻² ตามลำดับ ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตมีความหนาเพิ่มขึ้น และมีเฉดสีเหลืองเข้มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซต ผลการศึกษาความสามารถในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ลที่หั่นพบว่าฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซต โดยมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซต ในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ดังนั้นฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตจึงมีความสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้

คำสำคัญ : โบรมิเลน, ปฏิกิริยาสีน้ำตาล, ฟิล์มเจลลาติน, โปรตีนไฮโดรไลเซต

¹ อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

¹ Lecturer, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

² Assistant Professor, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University

³ อาจารย์, วิทยาลัยมวยไทยศึกษาและการแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

³ Lecturer, College of Muaythai Study and Thai Traditional Medicine, Muban Chombueng Rajabhat University

* ผู้ประสานงานนิพนธ์ e-mail: kongsakdapha@mcru.ac.th

Abstract

The objective of this study was to investigate the impact of protein hydrolysate on the characteristics of gelatin films. The enzymatically hydrolyzing soybean meal with bromelain was used to produce the protein hydrolysate. A comparative investigation was carried out to assess both the physical properties and anti-browning reactions of gelatin films depending on the different concentrations of protein hydrolysate at 0.1%, 0.5%, 1%, and 3%. The results demonstrated that all aspects of the film quality tended to increase depending on the amount of protein hydrolysate added. Films mixed with 3% protein hydrolysate have tensile strength and water vapor permeability with values of 39.50 MPa and 1.15 g mm/kPa h⁻¹ m⁻², respectively. The film containing protein hydrolysate became thicker and darker yellow with an increasing amount of protein hydrolysate. The experiment into the anti-browning reaction on sliced apple skin revealed that films containing protein hydrolysate were able to delay the browning reaction more than those lacking this component. The inhibition's efficacy increased proportionally with increasing protein hydrolysate concentrations. These findings were obtained under regulated storage settings of 4 °C. As a result, the gelatin film combined with protein hydrolysate has the ability to delay the browning reaction.

Keywords: Bromelain, Browning reaction, Gelatin film, Protein hydrolysate

1. บทนำ

ฟิล์มชนิดบริโภคได้ (edible film) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น ผลิตภัณฑ์อาหารที่พบเห็นการใช้ฟิล์มบริโภคห่อหุ้มและบริโภคได้โดยตรง อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป และทอปปิง (Singh & Singh, 2019) ด้วยคุณสมบัติของฟิล์มบริโภคทำจากชีวโมเลกุลจึงมีความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต และช่วยเพิ่มคุณค่าแก่ผลิตภัณฑ์ในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน จึงมีการนำฟิล์มบริโภคมาพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อประโยชน์อย่างอื่นที่ไม่ใช่การบริโภคแต่ใช้เพื่อการป้องกันอากาศ อุณหภูมิ การปนเปื้อนข้าม และป้องกันมลภาวะ เช่น ซองบรรจุชา ฟิล์มห่อเบเกอรี่ และฟิล์มปิดกล่องบรรจุผลไม้ (Knoll & Steinbüchel, 2010) ฟิล์มบริโภคสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ฟิล์มโพลีแซคคาไรด์ (Khan et al., 2019) ฟิล์มลิพิด (Aydin et al., 2017) และฟิล์มโปรตีน (Sarbon & Howell, 2013) โดยฟิล์มแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอาหารได้หลากหลาย ฟิล์มโพลีแซคคาไรด์ที่ทำจากแอลจินที่มีคุณสมบัติด้านจุลินทรีย์ได้ดี และเป็นฟิล์มชนิดที่ผู้นับถือศาสนาอิสลามเลือกใช้ (Lee et al., 2020) ฟิล์มชนิดโปรตีนผลิตจากโปรตีนทั้งจากสัตว์และจากพืช มีคุณสมบัติในการขวางกั้นการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี

สามารถขึ้นรูปและฟอร์มตัวเป็นแผ่นได้เร็ว มีความชื้นสะสมในแผ่นฟิล์มน้อยกว่าฟิล์มโพลีเอทิลีน วัสดุชีวโพรตีนที่นิยมนำมาใช้ผลิตฟิล์ม เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด และถั่วเหลือง เป็นต้น โพรตีนสำเร็จรูปที่นิยมนำมาผลิตฟิล์มชนิดนี้ได้แก่ เจลาติน เวย์โพรตีน และเคซีน (Norziah, 2011)

ฟิล์มเจลาตินเป็นฟิล์มชนิดโพรตีนที่สามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรม มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอาหาร ยา และเวชสำอาง เจลาตินได้มาจากการไฮโดรไลซิสโพรตีนคอลลาเจนจากหนังวัว ปลา กระดูกสุกร หรือกระดูกสัตว์ปีก (Sarbon & Howell, 2013) มีการวิจัยและพัฒนาให้ฟิล์มเจลาตินมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีการผลิตฟิล์มเจลาตินจากปลาเสริมด้วยน้ำมันจากยอ (*Morinda citrifolia*) ร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ฟิล์มเจลาตินมีค่ามอดูลัสของยัง (young's modulus) และค่าความทึบแสง (opacity) เพิ่มขึ้นเมื่อเติมน้ำมันมากขึ้น แต่ส่งผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง และพบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากเพปไทด์จากโพรตีนปลา และน้ำมันจากยอ (Maryam & Nur, 2016) มีการศึกษาฟิล์มเจลาตินผสมนาโนคริสตัลของเซลลูโลส (nanocrystalline cellulose; NCC) พบว่า NCC มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเติม NCC มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีคุณสมบัติการทนความร้อนและคุณสมบัติการยึดตัวมากขึ้น แต่สามารถเติม NCC ได้สูงสุดเพียงร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม (Yang & Sun, 2018) มีการศึกษาการผสมน้ำมันหอมระเหยจากสะระแหน่ (*Mentha pulegium*) ในฟิล์มเจลาติน โดยทำการเติมน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในการผลิตฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่ผลิตได้มีความสามารถต้านทานการดิ่งที่สูงขึ้น เมื่อนำฟิล์มไปทดสอบบอร์รี่เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการถนอมอาหาร พบว่าสโตรเบอร์รี่มีอัตราการสูญเสีย น้ำ ที่ระยะ เก็บรักษา 13 วัน น้อยกว่าฟิล์มเจลาตินที่ไม่ได้เติมน้ำมันหอมระเหย (Aitboulahsen et al., 2018) Cai et al. (2019) ทำการพัฒนาเจลาตินฟิล์มคอมโพสิต (composite film) กับไคโตซาน โดยทำการผสมกรดโดโคซาเฮกซาอิก และขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโดยเทคนิคการเทใส่แม่พิมพ์ (casting) และอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning) ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่ผลิตได้มีคุณสมบัติละลายน้ำยากขึ้น ผิวของฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารในระดับอุตสาหกรรมได้

โพรตีนไฮโดรไลเซทช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพให้แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร มีรายงานว่า การใช้โพรตีนไฮโดรไลเซทจากกากถั่วเหลืองร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในการผลิตอาหารประเภทเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการเกิดโพลีเมอร์ในอาหาร จึงสามารถใช้โพรตีนไฮโดรไลเซทจากกากถั่วเหลืองทดแทนการใช้สารเคมีกลุ่มพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ได้ดี (Ji et al., 2023) มีรายงานการศึกษาความสามารถทางชีวภาพของฟิล์มเจลาตินที่ผสมโพรตีนไฮโดรไลเซทจากหมีกระดอง (cuttlefish) โดยฟิล์มที่ผลิตได้มีคุณสมบัติเป็นเกราะป้องกันแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่นได้ รวมถึงมีความสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ เนื่องจากเพปไทด์และกรดอะมิโนจากโพรตีนไฮโดรไลเซทเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีฟังก์ชันในการต้านอนุมูลอิสระที่ดี (Kchaou et al., 2020)

นอกจากนี้โปรตีนไฮโดรไลเซทยังมีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ได้ดี ซึ่งเอนไซม์ PPO เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ชนิดมีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง (Hamdan et al., 2022) งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทจากกากถั่วเหลือง เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของผลไม้ที่หั่นแล้ว ซึ่งจากการศึกษาบทความปริทัศน์ฉบับล่าสุดยังไม่มียางานถึงการวิจัยและพัฒนาฟิล์มชนิดนี้มาก่อน ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การขยายผลให้มีการนำฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทจากพืชเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่ภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร และสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

2.2 ศึกษาความสามารถของฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในแอปเปิ้ลหั่นชิ้น

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเซท

วิธีการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเซทดัดแปลงจากวิธีการของ Kchaou et al. (2020) โดยทำการซั่งกากถั่วเหลืองชนิดที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกไปแล้ว ปริมาณ 20 กรัม นำไปบดละเอียดและผสมกับสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH 6.5 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำส่วนใสมาเติมเอนไซม์โบรมิเลนปริมาณ 300 ยูนิท นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อยุติกิจกรรมเอนไซม์โบรมิเลน จากนั้นนำสารละลายซึ่งก็คือโปรตีนไฮโดรไลเซทไปทำแห้งเยือกแข็ง โดยใช้เครื่อง Freeze dryer (ยี่ห้อ Labconco รุ่น Freezone 6L ประเทศออสเตรเลีย) ทำการแช่เยือกแข็งโปรตีนไฮโดรไลเซทที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้แห้งในสภาวะความดัน 0.05 มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิ -62 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โปรตีนไฮโดรไลเซทผงที่ได้นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปศึกษาขั้นตอนต่อไป

3.2 การผลิตแผ่นฟิล์มเจลลาติน

วิธีการผลิตฟิล์มเจลลาติน และวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้ด้านความหนา ความต้านทานการดึง และค่าสี ดัดแปลงจากวิธีการของ Amjadi et al. (2019) ทำการผลิตแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโดยการเทใส่แม่พิมพ์ (casting) โดยเตรียมสารละลายเจลลาตินร้อยละ 5 (w/v) ทำการซั่งเจลลาตินผงปริมาณ 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเบื่องตัน 50 มิลลิลิตร นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คนให้ละลายจนหมดและพักไว้ทำการเตรียมกลีเซอรอลร้อยละ 40 (w/w) เทียบกับน้ำหนักของเจลลาตินที่ใช้ โดยซั่งกลีเซอรอล

2 กรัม เติมนลงในสารละลายเจลาตินที่เตรียมไว้ หลังจากคนให้เข้ากันแล้วทำการปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ทำการกวนผสมด้วยเครื่อง homogenizer ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทลงบนพิมพ์ซิลิโคนทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อพิมพ์ นำไปบ่มในตู้อบชนิดมีพัดลมกวนอากาศและดูดอากาศออกจากตู้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาให้ลอกแผ่นฟิล์มออกจากพิมพ์ นำแผ่นฟิล์มบรรจุในถุงพลาสติก จากนั้นเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 45 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แผ่นฟิล์มนี้เป็นตัวอย่างฟิล์มควบคุม (control) สำหรับฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซต (ฟิล์ม PH) ให้ทำการผลิตโดยนำโปรตีนไฮโดรไลเซตลงไปผสมในขั้นตอนการผลิตฟิล์มดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยแปรผันความเข้มข้นของโปรตีนไฮโดรไลเซต 4 ระดับได้แก่ร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 3 โดยน้ำหนักของเจลาติน นำแผ่นฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติดังนี้ ค่าความหนา ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าสี ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ ค่าการละลาย และความสามารถในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ลหั่นแล้ว

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.3.1 ค่าความหนา

วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ ทำการวัดแบบสุ่มตำแหน่งบนฟิล์มจำนวน 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.3.2 ค่าความต้านทานการดึงของฟิล์ม (Tensile Strength; TS)

วิเคราะห์ค่าความต้านทานการดึงของฟิล์มโดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (ยี่ห้อ Brookfield รุ่น CT3 ประเทศสหรัฐอเมริกา) ทำการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-12 ดัดแปลงโดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร ใช้หัวกดแผ่นฟิล์มผ่านช่องวัดความยืด โดยใช้ความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีจนกระทั่งฟิล์มขาด ให้วิเคราะห์แรงสำหรับการกดที่สูงที่สุดในหน่วยเมกะปาสคัล (MPa)

3.3.3 ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสีดิจิตอล (ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS Spectrophotometer ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้ mode การวิเคราะห์ reflectance ด้วยอุปกรณ์หนีบแผ่นฟิล์ม transmission clamp ใช้ฉากรับแสงสีขาวมาตรฐาน white tile เป็นค่าอ้างอิง $L^* = 100$ หน่วย ทำการ scan ความยาวคลื่นในช่วง 360-780 นาโนเมตร ด้วยค่า optical resolution เท่ากับ 10 มิลลิเมตร รายงานผลการวิเคราะห์ค่าสีเป็นหน่วย $L^*a^*b^*$ โดยค่า L เข้าใกล้ 100 หมายถึงมีความใสหรือมีสีขาวมากขึ้น ค่า L เข้าใกล้ 0 หมายถึงมีความทึบหรือมีสีดำมากขึ้น ค่า a+ หมายถึงมีเฉดสีแดง a- หมายถึงมีเฉดสีเขียว โดยตัวเลขมากขึ้นหมายถึงเฉดสีนั้นที่เข้มข้น ค่า b+ หมายถึงมีเฉดสีเหลือง b- หมายถึงมีเฉดสีน้ำเงิน โดยตัวเลขมากขึ้นหมายถึงเฉดสีนั้นที่เข้มข้น

3.3.4 ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability; WVP)

วิเคราะห์ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ โดยวิธีทดสอบ cup method ตามมาตรฐาน ASTM E96/E96M-10 โดยเติมเม็ดซิลิกาปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงในถ้วยอลูมิเนียมทดสอบ

จากนั้นวางแผ่นฟิล์มและเทพาราฟินลงด้านข้างถ้วย นำถ้วยทดสอบวางในเดซิเคเตอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นไว้ด้านล่าง เก็บไว้ที่อุณหภูมิช่วง 30-35 องศาเซลเซียส บันทึกการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 12 ชั่วโมง คำนวณการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม มิลลิเมตร ต่อกิโลปาสคัลต่อชั่วโมง ต่อตารางเมตร; $g\ mm\ kPa\ h^{-1}\ m^{-2}$) จากสูตรที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$WVP = \frac{W \times X}{A \times T (P_2 - P_1)} \quad (1)$$

$$P_2 - P_1 = P_0 (R_1 - R_2) \quad (2)$$

WVP คือ การซึมผ่านได้ของไอน้ำ ($g\ mm\ kPa\ h^{-1}\ m^{-2}$)

W คือ น้ำหนักถ้วยที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาที่ทำการทดลองคำนวณได้จาก slope (กรัม)

X คือ ความหนาของฟิล์ม (มิลลิเมตร)

A คือ พื้นที่ฟิล์มบนปากขอบถ้วย (ตารางเมตร)

T คือ เวลา (ชั่วโมง)

$P_2 - P_1$ คือ ความแตกต่างของความดันไอน้ำทั้งสองด้านของฟิล์มที่อุณหภูมิทดสอบ

P_0 คือ ค่า vapor pressure of pure water ที่ 30 องศาเซลเซียส (4.25 kPa)

R_1 คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในเดซิเคเตอร์เท่ากับ 0

R_2 คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้านในถ้วยทดสอบเท่ากับ 100

3.3.5 การละลาย

วิเคราะห์ค่าการละลายโดยใช้วิธีของ Laohakunjit and Noomhorm (2004) โดยตัดแผ่นฟิล์มเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักรวมให้ได้ประมาณ 1 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำเศษฟิล์มที่ค้างบนกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนแห้งโดยเปิดให้อากาศไหลเวียนออกร้อยละ 60 นำเศษฟิล์มที่แห้งไปชั่งน้ำหนักแล้วนำมาคำนวณร้อยละของการละลายตามสูตรที่ (3) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักแห้งหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (3)$$

3.4 ศึกษาความสามารถของแผ่นฟิล์มในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาล

นำผลแอปเปิ้ลมาหั่นเป็นชิ้นหนาประมาณ 2 เซนติเมตร จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตที่ผลิตจากข้อ 3.2 มาห่อพันรอบโดยให้แผ่นฟิล์มแนบสัมผัสผิวที่ปกเปลือก จากนั้นนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ค่าการเกิดสีน้ำตาลที่ผิวของแอปเปิ้ลทุก ๆ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวัดสี

(ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS Spectrophotometer ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ไม่ได้ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทกำหนดให้เป็น control ใช้ mode การวิเคราะห์ reflectance แบบวัดช่องหน้าเครื่องขนาด 1 นิ้วชนิด Include รายงานผล ในหน่วยวัดเฉพาะค่า L^* ซึ่งหมายถึงค่าความสว่าง (lightness) โดยค่าที่เข้าใกล้ 100 หมายถึงมีความสว่างหรือเป็นสีขาวมากขึ้น และค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึงมีความคล้ำหรือเป็นสีดำมากขึ้น

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติ 3 ซ้ำ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วย One-way ANOVA โดยใช้โปรแกรม PSPPP free ware ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

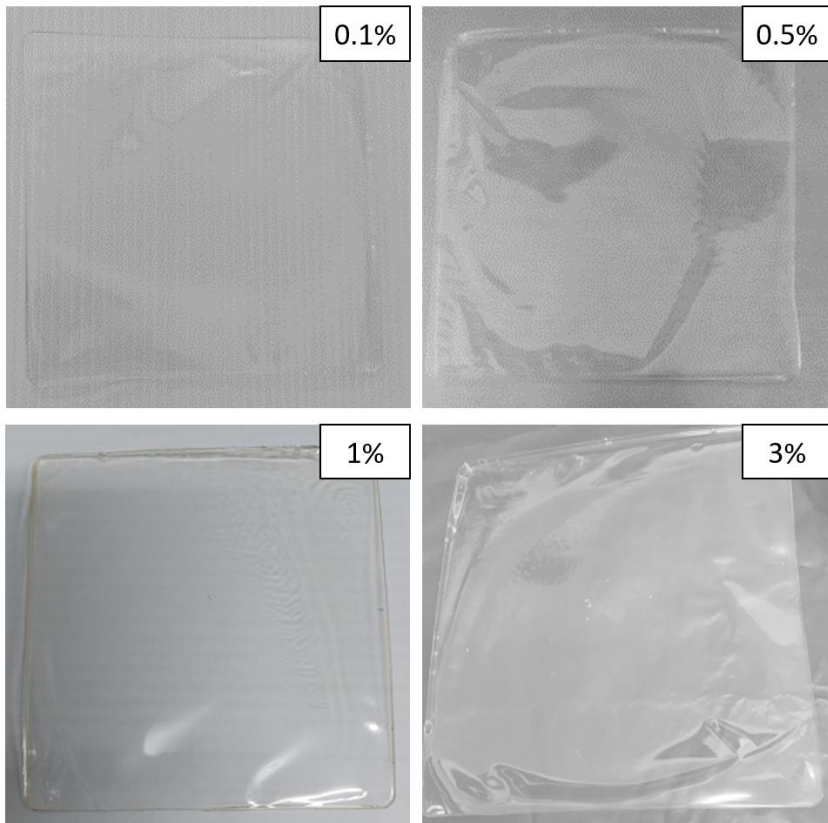
4. ผลการวิจัย

4.1 การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเซทและการผลิตฟิล์มเจลลาติน

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าเอนไซม์โบรมิเลนสามารถย่อยกากถั่วเหลืองและผลิตโปรตีนไฮโดรไลเซทเป็นผลิตภัณฑ์ สารละลายกากถั่วเหลืองที่ละลายอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์เปลี่ยนสีไปเป็นสีเหลืองเข้ม และมีก้อนโปรตีนแขวนลอยอยู่ในสารละลาย โดยเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งก็คือโปรตีนไฮโดรไลเซทไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่าผงโปรตีนไฮโดรไลเซทมีน้ำหนัก 1.15 กรัม (จากน้ำหนักกากถั่วเหลืองเริ่มต้น 20 กรัม) เมื่อนำโปรตีนไฮโดรไลเซทไปผสมฟิล์มเจลลาตินพบว่า โปรตีนไฮโดรไลเซททุกความเข้มข้นไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการก่อตัวเป็นแผ่นฟิล์ม โปรตีนไฮโดรไลเซทสามารถละลายได้หมดโดยไม่พบเศษหรือตะกอนหลงเหลือ ผลของการตรวจพินิจลักษณะปรากฏของฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซท อธิบายได้ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์ม

ตัวอย่าง	ลักษณะตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ
ฟิล์ม control	ฟิล์มควบคุมที่ไม่ได้ผสมโมปรินไฮโดรไลเซท	เป็นแผ่นบางคล้ายพลาสติก โปร่งใส ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีฟองอากาศข้างใน มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น
ฟิล์ม PH0.1	ฟิล์มที่ผสมโมปรินไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.1	เป็นแผ่นบางคล้ายพลาสติก โปร่งใส ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีฟองอากาศข้างใน มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น
ฟิล์ม PH0.5	ฟิล์มที่ผสมโมปรินไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.5	เป็นแผ่นบางคล้ายพลาสติก โปร่งใส ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีฟองอากาศข้างใน มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น
ฟิล์ม PH1	ฟิล์มที่ผสมโมปรินไฮโดรไลเซทร้อยละ 1	เป็นแผ่นบางคล้ายพลาสติก โปร่งใส มีเม็ดเหลือง ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีฟองอากาศข้างในแต่น้อยมากและฟองขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น
ฟิล์ม PH3	ฟิล์มที่ผสมโมปรินไฮโดรไลเซทร้อยละ 3	เป็นแผ่นบางคล้ายพลาสติก โปร่งใส มีเม็ดเหลืองเข้มมากกว่าตัวอย่างอื่น ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีความหนาที่สัมผัสได้ว่าหนามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ไม่พบฟองอากาศข้างในเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น



ภาพที่ 1 ลักษณะของฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตความเข้มข้น
ร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 3

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซต

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความหนา ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และการละลายของฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่า การเติมโปรตีนไฮโดรไลเซตในส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ฟิล์ม control มีความหนาน้อยที่สุดเท่ากับ 0.07 มิลลิเมตร ขณะที่ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 0.1 0.5 และ 1 มีความหนาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีความหนาเท่ากับ 0.08 0.08 และ 0.11 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 3 มีความหนามากที่สุดเท่ากับ 0.12 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซตที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการซึมผ่านของไอน้ำ โดยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 3 มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำมากที่สุดเท่ากับ $1.15 \text{ g mm/kPa h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ถัดมาคือตัวอย่างฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 1 0.5 0.1 และฟิล์ม control ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 0.70 0.29 0.09 และ $0.08 \text{ g mm/kPa h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของโปรตีนไฮโดรไลเซต

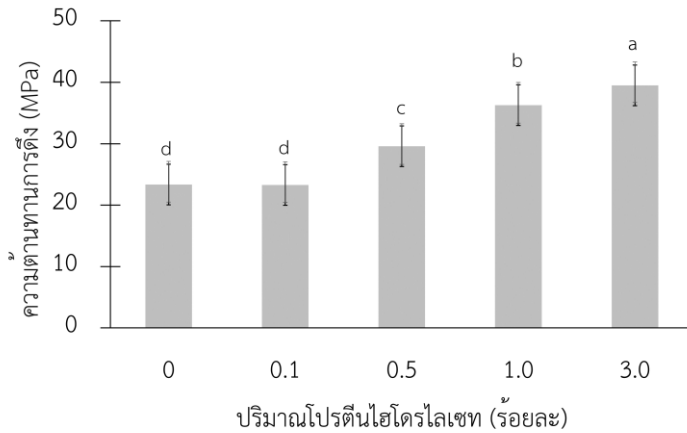
ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยส่งผลให้ฟิล์มมีคุณสมบัติยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้มากขึ้น ส่วนผลการศึกษาการละลายของฟิล์มพบว่า ค่าการละลายของฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซททุกความเข้มข้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยฟิล์ม control ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 3 มีค่าการละลายเท่ากับร้อยละ 89.33 89.59 92.22 92.12 และ 92.37 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซท

ฟิล์ม	คุณสมบัติทางกายภาพ		
	ความหนา (มิลลิเมตร)	การซึมผ่านไอน้ำ (g mm/kPa h ⁻¹ m ⁻²)	การละลายของฟิล์ม ^{ns} (ร้อยละ)
control	0.07 ± 0.01 ^c	0.08 ± 0.005 ^e	89.33 ± 0.33
PH0.1	0.08 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.001 ^d	89.59 ± 0.51
PH0.5	0.08 ± 0.01 ^b	0.29 ± 0.027 ^c	92.22 ± 0.01
PH1	0.11 ± 0.01 ^b	0.70 ± 0.007 ^b	92.12 ± 0.82
PH3	0.12 ± 0.01 ^a	1.15 ± 0.062 ^a	92.37 ± 0.47
C.V. %	20.75	87.02	1.98

หมายเหตุ: อักษรตัวยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
อักษร ns ตัวยกหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการดึงแสดงตามภาพที่ 2 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซท ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการดึง โดยฟิล์ม control มีค่าความต้านทานการดึงเท่ากับ 23.36 MPa โดยมีค่าเท่ากับฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.1 ส่วนฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 3 มีค่าความต้านทานการดึงสูงที่สุดเท่ากับ 39.50 MPa รองลงมาได้แก่ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 1 และ 0.5 โดยมีค่าความต้านทานการดึงเท่ากับ 36.27 และ 29.59 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.5 1 และ 3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ค่าความต้านทานการดึงของฟิล์ม

หมายเหตุ: อักษรตัวยกที่แตกต่างกันบนแผนภูมิ หมายถึง มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ค่า t (ตารางที่ 3) พบว่าปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซตที่มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความใส่น้อยลง โดยฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 มีค่าความใสที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ 96.50 95.57 และ 92.49 ตามลำดับ

ผลของค่า a^* ระบุว่าฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตทุกความเข้มข้นมีค่า a^* เป็น - หมายความว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีเฉดสีเขียวเหมือนกัน โดยปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซตมีผลต่อความเข้มข้นของเฉดสีเขียว ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตความเข้มข้นร้อยละ 3 มีเฉดสีเขียวมากที่สุดโดยมีค่า a^* เท่ากับ -0.62 รองลงมาได้แก่ร้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ -0.38 สำหรับฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 0.1 และ 0.5 มีเฉดสีเขียวน้อยไม่แตกต่างกันโดยมีค่า a^* เท่ากับ -0.17 -0.18 และ -0.17 ตามลำดับ

ผลของค่า b^* ระบุว่าฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตทุกความเข้มข้นมีค่า b^* เป็น + หมายความว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีเฉดสีเหลืองเหมือนกัน โดยปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซตมีผลต่อความเข้มข้นของเฉดสีเหลือง ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตความเข้มข้นร้อยละ 3 มีเฉดสีเหลืองมากที่สุดโดยมีค่า b^* เท่ากับ 4.22 รองลงมาได้แก่ร้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ 2.46 สำหรับฟิล์ม control และฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตร้อยละ 0.1 และ 0.5 มีเฉดสีเหลืองน้อยไม่แตกต่างกันโดยมีค่า b^* เท่ากับ 1.52 1.53 และ 1.52 ตามลำดับ

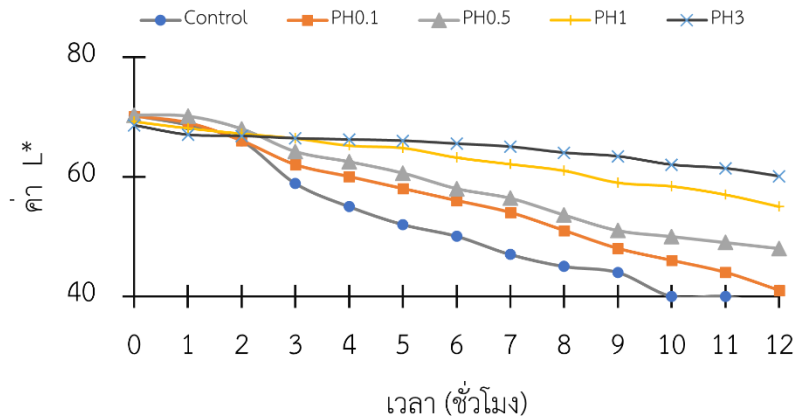
ตารางที่ 3 ค่าสีของฟิล์ม

ฟิล์ม	ค่าสี		
	L*	a*	b*
control	96.50 ± 0.47 ^a	-0.17 ± 0.18 ^c	1.52 ± 0.05 ^c
PH0.1	95.57 ± 0.11 ^a	-0.18 ± 0.20 ^c	1.53 ± 0.10 ^c
PH0.5	92.49 ± 0.22 ^a	-0.17 ± 0.45 ^c	1.52 ± 0.08 ^c
PH1	90.35 ± 0.25 ^b	-0.38 ± 0.66 ^b	2.46 ± 0.08 ^b
PH3	86.30 ± 0.25 ^c	-0.62 ± 0.80 ^a	4.22 ± 0.05 ^a
C.V. %	4.47	65.15	52.16

หมายเหตุ: อักษรตัวยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3 ผลการศึกษาความสามารถของฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ล

ที่เวลาเริ่มต้นหรือ 0 ชั่วโมง ตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์ม control มีค่า L* เท่ากับ 70.22 สำหรับตัวอย่างที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 3 มีค่า L* เริ่มต้นเท่ากับ 70.10 70.30 69.22 และ 68.57 ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงพบว่าค่า L* ของแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์ม control มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการลดลงของค่า L หมายความว่าความสว่างหรือความขาวลดลง ซึ่งให้เห็นว่าที่ผิวของตัวอย่างมีสีคล้ำมากขึ้น ขณะที่แอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซททุกความเข้มข้นมีค่า L* ลดลงเช่นกันเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง แต่ยังคงมีค่า L* อยู่ในช่วง 56-65 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทมีสีคล้ำน้อยกว่า และเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงพบว่าแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์ม control มีค่า L* ต่ำที่สุดเท่ากับ 38.15 ส่วนแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 1 และ 3 มีค่า L* ลดลงเพียงเล็กน้อย ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าฟิล์มเจลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทมีประสิทธิภาพชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดี



ภาพที่ 3 ความสามารถของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตแต่ละความเข้มข้น ในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ล

5. อภิปรายผล

งานวิจัยนี้ใช้เอนไซม์โบรมิเลนมาทำการย่อยโปรตีนจากถั่วเหลืองเพื่อให้ได้โปรตีนไฮโดรไลเซต โดยเมื่อนำโปรตีนไฮโดรไลเซตไปผสมในกระบวนการผลิตฟิล์มเจลาตินพบว่าการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซตที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.1 – 3 ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม แต่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เมื่อศึกษาค่าสีของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตพบว่าฟิล์มมีเฉดสีเหลืองที่เด่นชัด ซึ่งเป็นสีเหลืองที่ได้จากโปรตีนไฮโดรไลเซต เนื่องจากเมื่อเอนไซม์โบรมิเลนย่อยโปรตีนในกากถั่วเหลือง จะได้เปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนซิสเตอีน (Cysteine) และทริปโตเฟน (Tryptophan) อยู่ตรงปลายเทอร์มินอล (Terminal) ซึ่งกรดอะมิโนทั้งสองชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับอะตอมออกซิเจนได้ดี และเมื่อโซ่ข้างของกรดอะมิโนทั้งสองชนิดนี้หันออกมาสู่น้ำและโดนแสงจึงเกิดเป็นสีเหลือง (Asquith & Brooke, 1966) สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้าซึ่งได้รายงานว่าเป็นสีเหลือง (Kchaou et al., 2020) ผลการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตแสดงให้เห็นว่าการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซตจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มได้ดี คุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การต้านทานการดึง ความหนา และการซึมผ่านของไอน้ำ มีงานวิจัยและพัฒนาพลาสติกชีวภาพก่อนหน้านี้ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกเมื่อทำการผสมโปรตีนไฮโดรไลเซตเข้าไปในกระบวนการผลิต โดยมีหลักฐานเชื่อได้ว่าเปปไทด์และกรดอะมิโนจากโปรตีนไฮโดรไลเซตช่วยสร้างพันธะเคมีที่สำคัญที่ยังไม่มีหรือมีแต่ไม่เพียงพอระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์ พันธะเหล่านั้นได้แก่ ไอออนิก ไฮโดรฟิลิก ไฮโดรโฟบิก และที่สำคัญมากก็คือพันธะโควาเลนต์ ซึ่งอาจเกิดจากพันธะไดซัลไฟ (S-S) ระหว่างเปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนซิสเตอีน

การมีจำนวนพันธะเหล่านี้มากขึ้นส่งผลให้พลาสติกชีวภาพที่ผลิตได้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น (Wang et al., 2020)

ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทในงานวิจัยนี้มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซท โดยมีความหนาที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ฟิล์มมีความหนาที่สุดเมื่อผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 3 โดยมีความหนา 0.12 มิลลิเมตร ฟิล์มที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเทใส่แม่พิมพ์ซึ่งในการทดลองพบว่าการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซทมากขึ้นส่งผลให้เกิดการโพลีเมอไรเซชันที่รวดเร็วขึ้น และสังเกตได้ว่าฟิล์มจะแห้งและเป็นแผ่นได้เร็วกว่า การเติมโปรตีนไฮโดรไลเซทลงไประ้อยละ 3 ทำให้ฟิล์มมีความหนามากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมโปรตีนไฮโดรไลเซท 2 เท่า ทั้งนี้ค่าความหนาในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งฟิล์มบริโภคนกทั้งชนิดที่ทำจากแป้งและชนิดที่ทำจากโปรตีนซึ่งใช้วิธีการขึ้นรูปแบบเดียวกัน มีความหนาของฟิล์มอยู่ที่ประมาณ 0.02 – 0.1 มิลลิเมตร และจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารอื่นลงไปมากขึ้น (Freeberg, 2019) อย่างไรก็ตามหากนำค่าความหนาของฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซท ไปเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมของฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหารทั่วไปที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ใช้เทคนิคการอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง (casting roll) ในการขึ้นรูปฟิล์ม จะพบว่าฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหารจะมีความหนามาตรฐานอยู่ที่ 0.025 มิลลิเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทจากงานวิจัยนี้จะมีความหนามากกว่าประมาณ 10 เท่า

ฟิล์มเจลลาตินที่ผสมและไม่ได้ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติการละลายน้ำที่ดี คุณสมบัติการละลายที่ดีนี้ช่วยส่งเสริมศักยภาพให้แก่ฟิล์มให้มีความสามารถทางชีวภาพ โดยเมื่อฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทละลาย จะทำให้เพปไทด์ละลายออกมา เพปไทด์ที่อยู่ในโปรตีนไฮโดรไลเซทมีคุณสมบัติและความสามารถในการเป็นสารยับยั้ง (inhibitor) ต่อเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) (Liu et al., 2018) ในงานวิจัยนี้ได้นำแอปเปิ้ลที่หั่นแล้วไปห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซท โดยในขณะนั้นเอนไซม์ PPO จะถูกปลดปล่อยออกมาจากเซลล์ ฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทที่แนบอยู่บนผิวของแอปเปิ้ลจะเปียก จากนั้นเพปไทด์จะละลายออกมาและเคลื่อนที่เข้าไปสู่บริเวณเร่งของเอนไซม์ PPO และเกิดการจับกันอย่างสมบูรณ์ เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ PPO จึงสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ลได้ ซึ่งได้พิสูจน์จากความคล้ำที่วัดได้จากการวิเคราะห์สีค่า L^* และพบว่าตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* ช้ามากกว่าตัวอย่างที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มที่ไม่ได้เติมโปรตีนไฮโดรไลเซทเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง

6. องค์กรความรู้ใหม่

ฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.1-3 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าฟิล์มเจลลาตินที่ไม่ได้ผสม คุณสมบัติการละลายง่ายของฟิล์มจะช่วยปลดปล่อยเพปไทด์ให้ออกมาทำหน้าที่ทางชีวภาพ โดยเมื่อนำฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทร้อยละ 3 ไปห่อหุ้มผลไม้ที่หั่นแล้ว จะสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของผลไม้ที่หั่นได้ดีกว่าตัวอย่างควบคุม ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

7. สรุป

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซทในเจลลาตินฟิล์มที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ผลการศึกษาพบว่าการเติมโปรตีนไฮโดรไลเซทจากกากถั่วเหลืองในฟิล์มเจลลาตินความเข้มข้นร้อยละ 0.1-3 ทำให้ฟิล์มเจลลาตินมีความหนาเพิ่มขึ้น มีสีเหลืองมากขึ้น ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพด้านการต้านทานการดึง และการซึมผ่านไอน้ำ โดยคุณสมบัติดังกล่าวทุกข้อมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซทมากขึ้น ผลการศึกษาความสามารถในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลพบว่าฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของแอปเปิ้ลได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมโปรตีนไฮโดรไลเซท ที่สภาวะการเก็บรักษาอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโปรตีนไฮโดรไลเซทเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟิล์มเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซทมีความสามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตฟิล์มเจลลาตินสำหรับหีบห่อผลไม้ที่หั่นแล้วเพื่อบรรเทาการเตรียมนำไปแปรรูปหรือนำไปเสิร์ฟ โดยที่ผลไม้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีคล้ำอันเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

8. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านข้อเสนอแนะจากการวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

8.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบความสามารถในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำให้ทราบขีดจำกัดของแผ่นฟิล์มได้

8.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

การพัฒนาสารเคลือบเจลลาตินที่ผสมโปรตีนไฮโดรไลเซท (ฟิล์มชนิดน้ำ) ที่มีคุณสมบัติชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้เหมือนแผ่นฟิล์มเป็นแนวทางของการพัฒนานวัตกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ที่น่าสนใจ และสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายกว่าชนิดแผ่นฟิล์ม

9. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อาคารสถานที่และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์สำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ ซึ่งได้รับจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ 2565 และ 2566

10. เอกสารอ้างอิง

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562, 27 ธันวาคม). *พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511*.

https://www.tisi.go.th/data/law/pdf_files/law1/tip15july19_2.pdf

Aitboulahsen, M., Zantar, S., Laglaoui, A., Chairi, H., Arakrak, A., Bakkali, M., & Hassani Zerrouk, M. (2018). Gelatin-based edible coating combined with *Mentha pulegium* essential oil as bioactive packaging for strawberries. *Journal of food quality*, 2018, Article ID 8408915, 1-7.

<https://doi.org/10.1155/2018/8408915>

Amjadi, S., Emaminia, S., Heyat Davudian, S., Pourmohammad, S., Hamishehkar, H., & Roufegarinejad, L. (2019). Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, 216, 376-384.

Asquith, R. S., & Brooke, K. E. (1966). The formation of dihydroxyphenylalanine on exposure of tyrosine to ultraviolet radiation. *Journal of the society of dyers and colourists*, 82, 226.

Aydin, S., Gunduz, A., & Sahin, F. (2017). Lipid-based edible films. *The journal of scientific and engineering research*, 4, 86-92.

Cai, L., Shi, H., Cao, A., & Jia, J. (2019). Characterization of gelatin/chitosan polymer films integrated with docosahexaenoic acids fabricated by different methods. *Scientific reports*, 9(1), 8375.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44807-x>

Freeberg, S. (2019). Edible films: A review of recent research. *Food science & nutrition*, 7(12), 4397-4412.

Hamdan, N., Lee, C. H., Wong, S. L., Fauzi, C. E. N. C. A., Zamri, N. M. A., & Lee, T. H. (2022). Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: A review on recent progress. *Molecules*, 27(3), 1101.

<https://doi.org/10.3390/molecules27031101>

- Ji, Y., Wang, Z., Deng, Q., Chen, J., He, Z., Zeng, M., Qin, F., & Pan, H. (2023). Soy protein hydrolysates affect the structural and mechanical properties of soy protein-wheat gluten extrudates using high moisture extrusion. *Foods*, 12(5), 912. <https://doi.org/10.3390/foods12050912>
- Kchaou, H., Jridi, M., Benbettaieb, N., Debeaufort, F., & Nasri, M. (2020). Bioactive films based on cuttlefish (*Sepia officinalis*) skin gelatin incorporated with cuttlefish protein hydrolysates: Physicochemical characterization and antioxidant properties. *Food packaging and shelf life*, 24, 100477. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100477>
- Khan, S., Khan, A., & Khan, R. (2019). Edible films and coatings: A review. *Food science & technology*, 97, 253-266.
- Knoll, J., & Steinbüchel, A. (2010). Edible films and coatings: Materials, applications, and perspectives. *Trends in food science & technology*, 21(1), 40-52.
- Laohakunjit, N. & Noomhorm, A. (2004). Effect of plasticizer on mechanical and barrier properties of rice starch film. *Starch-Starke*, 56, 348-356.
- Lee, J. H., Park, D. Y., & Kim, H. S. (2020). Alginate-based edible films for food packaging: A comprehensive review. *Journal of food hydrocolloids*, 45, 122-130.
- Liu, X., Lu, Y., Yang, Q., Yang, H., Li, Y., Zhou, B., Li, T., Gao, Y., & Qiao, L. (2018). Cod peptides inhibit browning in fresh-cut potato slices: A potential anti-browning agent of random peptides for regulating food properties. *Postharvest biology and technology*, 146, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.001>
- Maryam Adilah, Z. A., & Nur Hanani, Z. A. (2016). Active packaging of fish gelatin films with *Morinda citrifolia* oil. *Food bioscience*, 16, 66-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.10.002>
- Norizah Mhd Sarbon. (2011). *Nutritional and physicochemical properties of chicken proteins and peptides*. [Doctoral dissertation, University of Surrey]. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.589971>
- Sarbon, Badii, F., & Howell, N. (2013). Preparation and characterization of chicken skin gelatin as an alternative to mammalian gelatin. *Food hydrocolloids*, 30(1), 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.009>

- Singh, R., & Singh, N. (2019). Edible films and coatings: A review of recent developments. *Trends in food science & technology*, 89, 39-53.
- Wang, L., Ding, J., Fang, Y., Pan, X., Fan, F., Li, P., & Hu, Q. (2020). Effect of ultrasonic power on properties of edible composite films based on rice protein hydrolysates and chitosan. *Ultrasonics sonochemistry*, 65, 105049. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105049>
- Yang, S., Li, H., & Sun, H. (2018). Preparation of gelatin-based films modified with nanocrystalline cellulose. *Iranian polymer journal*, 27(9), 645-652. <https://doi.org/10.1007/s13726-018-0641-6>