

ฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่มีนาโนซิงค์ออกไซด์และแอนโทไซยานิน จากดอกถั่วชั้วเป็นตัวบ่งชี้ค่าพีเอช

Bilayer Intelligent Gelatin Films Containing Zinc Nano-oxide and Anthocyanin from Butterfly Pea as pH Indicator

ณัฐวิวัฒน์ ศรีขาว (Natwat Srikhao)* ศุภณัฐ สละชีพ (Supanat Salacheep)**

ดร.พรนภา เกษมศิริ (Dr.Pornnapa Kasemsiri)^{1***}

(Received: June 13, 2022; Revised: November 4, 2022; Accepted: November 7, 2022)

บทคัดย่อ

ฟิล์มเจลาตินสองชั้นที่สามารถตอบสนองต่อสีสำหรับการตรวจการเน่าเสียของปลา โดยที่ชั้นบนของแผ่นฟิล์มถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความเสถียรของสีฟิล์มด้วยการเติมอนุภาคซิงค์ระดับนาโน (ZnO) ที่ปริมาณร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ฟิล์มชั้นล่างประกอบด้วยสารแอนโทไซยานินที่ได้จากดอกถั่วชั้ว ซึ่งทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH จากผลการศึกษาพบว่าการเติม ZnO ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความเสถียรของสีมากที่สุด เมื่อสัมผัสกับแสงที่มองเห็นได้เป็นเวลา 14 วัน มากกว่านั้นการเพิ่มปริมาณ ZnO จนถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 64 และฟิล์มเจลาตินสองชั้นที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเปลี่ยนสีได้ในการทดลองกับการเน่าเสียของปลา

ABSTRACT

Bilayer colorimetric films based on gelatin were prepared for monitoring fish spoilage. The upper layer of film was designed to enhance the stability of colorimetric films by adding zinc oxide nanoparticles (ZnO) at 0-1 % whereas the lower layer of film incorporated with butterfly pea anthocyanins acted as a pH sensor. Based on the results, the addition of 1 % ZnO showed the highest color stability after exposure under visible light for 14 days. Furthermore, an increase of ZnO content up to 1 % improved tensile strength up to 64 %. The obtained bilayer films exhibited visual colour changes in fish spoilage trials.

คำสำคัญ: การป้องกันแสง ฟิล์มบ่งชี้ ฟิล์มย่อยสลายได้

Keywords: Light-blocking, Indicator film, Biodegradable film

¹Corresponding author: pornkas@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**บัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ในปัจจุบันแนวคิดและนวัตกรรมด้านบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีสมบัติอัจฉริยะได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อนำมาใช้งานหลากหลายรูปแบบ เช่น เซนเซอร์บ่งชี้คุณภาพอาหารจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอาหารเน่าเสีย [1] สารประกอบที่สามารถตอบสนองต่อ pH โดยการเปลี่ยนแปลงสีได้แก่ โบโรโมเครซอลบลู เมทิลเรด และโพลีอะนิลีน โดยสารประกอบเหล่านี้พบว่ามีความสูงและอาจอันตรายต่อสุขภาพ เมื่อนำมาใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร [2] สารกลุ่มหนึ่งที่พบได้ตามธรรมชาติและมีคุณสมบัติตอบสนองต่อค่า pH คือ แอนโทไซยานินซึ่งสกัดได้จากส่วนประกอบของพืช เช่น กลีบดอก-อัญชัน กะหล่ำปลีแดงหวาน มันฝรั่ง กระเจี๊ยบแดง อัญชันแกลบ เปลือกมังคุด และแก้วมังกรแดง [3] โดยสามารถนำมาใช้บ่งชี้ค่า pH ได้เนื่องจากมีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปตาม pH [4] เช่น ที่ pH 1-3 Flavylium cations จะเป็นโครงสร้างหลักที่แสดงถึงสีแดง ในขณะที่ pH 4-5 Carbinol pseudobase จะแสดงเป็นสีแดงอ่อน เนื่องจากการเกิด Deprotonation และ Hydration และที่ pH 7-8 จะเป็นโครงสร้าง Quinoidal ให้สีฟ้าม่วง [5] ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้สารแอนโทไซยานินร่วมกับฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถวัดการเน่าเสียของปลาทู [6] นมพาสเจอร์ไรส์ [5] กุ้งทะเล [4] และหมู [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำแอนโทไซยานินมาใช้งานยังพบข้อจำกัด เนื่องจากแอนโทไซยานินย่อยสลายได้ภายใต้แสงซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของฟิล์มอัจฉริยะ Yang และคณะ [8] พบว่าสีของแอนโทไซยานินในฟิล์มเจลแลนกัน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีสัมพัทธ์ ตั้งแต่วันที่ 3 ภายใต้การสัมผัสแสงที่มองเห็นได้ และค่อยๆ ซีดจนเป็นสีเหลืองเมื่อสัมผัสแสงที่มองเห็นได้เป็นเวลา 24 วัน ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของแอนโทไซยานินภายใต้แสงที่มองเห็นได้ Attoe และ Elbe [9] ศึกษาปัจจัยของแสงที่มองเห็นได้ต่ออัตราการสลายตัวของแอนโทไซยานินที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แสงเป็นปัจจัยหลักในการสลายแอนโทไซยานิน ดังนั้นการชะลอการสลายตัวของแอนโทไซยานินในฟิล์มอัจฉริยะถือเป็นการยืดอายุการใช้งานของฟิล์มอัจฉริยะ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สามารถช่วยลดการส่งผ่านของแสงที่ตามองเห็นได้ และดูดซับแสงในช่วง UV จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายร่วมกับวัสดุหลายชนิดเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงที่ตามองเห็นและแสง UV [8, 10-11] นอกจากนี้ ZnO ยังผ่านการรับรองโดยองค์การอาหารและยา (American Food and Drug Administration : FDA) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์อาหาร [12] Shankar และคณะ [13] ได้เตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่มีปริมาณของ ZnO ร้อยละ 0-1.5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการส่งผ่านของแสงที่มองเห็นได้ลดลงร้อยละ 33 ที่ปริมาณ ZnO ร้อยละ 1.5. Kanmani และคณะ [14] ศึกษาผลของการสังเคราะห์ ZnO ในฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อะการ์ และคาราจีแนน พบว่าค่าการส่งผ่านของแสงที่มองเห็นได้ลดลงร้อยละ 75 20 และ 5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ZnO มีค่าความเป็นด่างสูง โดยมีค่า pH อยู่ช่วง 8-11 [15] ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแอนโทไซยานินและเกิดการเปลี่ยนสีได้ การสร้างฟิล์มแบบสองชั้นจึงเป็นแนวทางเพื่อการแก้ปัญหา ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำ ZnO ร่วมกับอะการ์เมทริกซ์ [7] และนำ ZnO ร่วมกับเจลาติน [8] เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันแสงให้กับชั้นเซนเซอร์ที่มีแอนโทไซยานินเป็นสารบ่งชี้ค่า pH พบว่าการเติม ZnO ในฟิล์มสองชั้นส่งผลไม่เพียงแต่ทำให้สมบัติในการป้องกันแสงดีขึ้น แต่สมบัติทางกลยังมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย [7] อย่างไรก็ตาม ในงานดังกล่าวยังขาดการทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มสองชั้น ที่มีส่วนประกอบของ ZnO เพื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปริมาณการเติมของ ZnO ร้อยละ 0 - 1 โดยน้ำหนัก ในฟิล์มเจลาตินชั้นแรก เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันแสงให้กับฟิล์มเจลาตินชั้นที่สองที่มีส่วนประกอบของแอนโทไซยานิน โดยศึกษาผลของฟิล์มสองชั้นต่อการตอบสนอง

ค่า pH ในอาหาร ความเสถียรต่อแสงที่มองเห็นได้ รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มอัจฉริยะสองชั้น และระยะเวลาในการย่อยสลาย

วิธีการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

แผ่นเจลาติน (100%, Gelita Gelatin Sheet, Bloom 125, Germany) กิลีเซอร์รอล (99.5%, QReC, New Zeland) น้ำกลั่น (Diluted water) ดอกอัญชัน (Khon Kaen, Thailand) โฟแทสเซียมคลอไรด์และโซเดียมอะซิเตท (Ajax Finechem, Australia) 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, RCI Labscan limited Thailand) Folin-Ciocalteu reagent (Fluka, United Kingdom) Sodium carbonate (Fluka, United Kingdom) กรดแกลลิก (Sigma-Aldrich, Singapore) ZnO (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20–40 นาโนเมตร ความหนาแน่นรวม 0.14 กรัมต่อลูกบาศก์-เซนติเมตร พื้นที่ผิว 26.22 ตารางเมตรต่อกรัม Materials Technology Company Limited, Thailand)

2. การเตรียมวัสดุฟิล์มและชิ้นงาน

2.1 การเตรียมสารสกัดแอนโทไซยานินจากกลีบดอกอัญชัน

นำกลีบดอกอัญชันไปอบที่อุณหภูมิ 40 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปบดให้มีขนาดช่วง 0.17-0.25 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปสกัดแอนโทไซยานินด้วยน้ำกลั่น ตามวิธีของ Salacheep และคณะ [6] กล่าวคือ ใช้เครื่องอัลตราโซนิค (DT 255 H Bandelin, Germany) ที่สภาวะการสกัด 40 องศาเซลเซียส 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างกลีบดอกอัญชันแห้งและน้ำ 1:10 กรัม/มิลลิลิตร และแยกสารสกัดที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

2.2 การขึ้นรูปฟิล์มเจลาติน

นำแผ่นเจลาติน 3.5 กรัม ละลายในน้ำ 20 มิลลิลิตร และปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำ ZnO ร้อยละ 0-1 ของน้ำหนักเจลาติน ผสมในกิลีเซอร์รอล (ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของเจลาติน) และกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทลง Petri dish และนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้เป็นฟิล์มชั้นที่ 1 ในการเตรียมฟิล์มชั้นที่ 2 นำแผ่นเจลาติน 3.5 กรัม ละลายในน้ำ 20 มิลลิลิตร และปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมสารสกัดแอนโทไซยานินในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเจลาตินและผสมให้เข้ากัน จากนั้นเทสารผสมลงบนแผ่นฟิล์มชั้นที่ 1 ที่เตรียมได้จากก่อนหน้าและนำไปอบที่ 40 องศาเซลเซียส จนได้เป็นแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น (Bilayers) แสดงดังภาพที่ 1

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารสกัดจากกลีบดอกอัญชัน

3.1 ปริมาณแอนโทไซยานิน

การหาปริมาณของแอนโทไซยานินในงานนี้ได้อ้างอิงจาก Cheok และคณะ [16] กล่าวคือนำสารสกัดของกลีบดอกอัญชันที่สกัดได้มาเจือจาง 1 ส่วนใน 9 ส่วน โดยปริมาตรของสารละลายบัฟเฟอร์ 2 ชนิด ที่ผสมกัน คือโฟแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ pH 1.0 และอะซิเตตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ pH 4.5 จากนั้นนำสารผสมไปตรวจค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Agilent 8453, United States)

ที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร และคำนวณหาปริมาณของแอนโทไซยานินได้ดังสมการที่ 1 พบว่าปริมาณสารแอนโทไซยานิน มีค่าเท่ากับ 2.12 ± 0.28 mg cy-3-glu/g DW

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานิน} = \frac{A \times M_w \times D_F \times 1000}{\epsilon \times L} \quad (1)$$

โดยที่ A = $(A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}$
Mw = 449.2 กรัมต่อโมล เมื่อเทียบกับ cyanidin-120 3-glucoside
DF = การทำให้เจือจาง (Dilution factor)
L = ความยาวที่แสงผ่านสารละลายที่ทำการวัด (เซนติเมตร)
 ϵ = molar extinction coefficient มีค่า 26,900 ลิตร/โมล/เซนติเมตร

4. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเจลลาตินคอมโพสิต

4.1 ตรวจสอบสีของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

ตรวจสอบสีด้วยเครื่องวัดสี [17] ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 ตารางนิ้ว โดยนำมาวางลงบนแผ่นกระดาษสีขาว จากนั้นวัดค่าสีโดยใช้ระบบสี CIE-L*a*b* (CIELAB) ในระบบนี้แกน L* = 0 (สีดำ) ถึง L* = 100 (สีขาว) -a* (สีเขียว) ถึง +a* (สีแดง) และ -b* (สีน้ำเงิน) ถึง +b* (สีเหลือง) โดยใช้ค่ามาตรฐานของแสงสีขาว L* = 99.96 a* = 0.00 และ b* = 0.04 เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65 มาตรฐาน observer 10° และ L* a* b* สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสีตามเวลา สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของสีได้จาก (ΔE) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

โดยที่ $\Delta L^* = L^* - L^*_0$
 $\Delta a^* = a^* - a^*_0$
 $\Delta b^* = b^* - b^*_0$

4.2 ความเสถียรภาพต่อแสง

ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 ตารางเซนติเมตร โดยนำมาทดสอบภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (250 w, EVE) ในห้องจำลองที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยระยะห่างระหว่างชิ้นงานและหลอดไฟอยู่ที่ 14 เซนติเมตร เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นนำมาขึ้นงานมาตรวจการสลายของสีด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter; Color Quest XE, United State)

4.3 สมบัติทางสมบัติทางเคมี

สมบัติทางเคมีของแผ่นฟิล์มเจลลาตินอัจฉริยะสองชั้น สามารถตรวจสอบได้จากเครื่อง Fourier transform-infrared spectroscopy (FTIR; a Bruker TENSOR27, Germany) โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR) ที่การสแกน 64 ครั้ง ความละเอียดของสเปกตรัม 4 ครั้ง ต่อเซนติเมตรและช่วงสเปกตรัม 4000- 650 ต่อเซนติเมตร

4.4 สมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 882-10 ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาด 1.2 x 10 ตารางเซนติเมตรและมีความหนา 0.15 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron, Model 5567, United States) โดยมีระยะจับ 50 มิลลิเมตร และความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที และโหลดเซลล์ 5 กิโลนิวตัน

4.5 สมบัติทางกายภาพ

1) ปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำ

การทดสอบหาปริมาณความชื้น (Moisture Content; MC) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ (Total soluble matter; TSM) ของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น โดยอ้างอิงการทดลองมาจาก Srikhao และคณะ [18] โดยเริ่มจากการนำแผ่นฟิล์มไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น (Mi) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (Md) โดยที่ปริมาณความชื้นหาได้จากสมการที่ 3 สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำหาได้จากการนำฟิล์มแห้ง (Md) ไปแช่น้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำฟิล์มเจลาตินออกไปอบ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (Mt) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ คำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{ร้อยละปริมาณความชื้น (MC)} = \frac{M_i - M_d}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{ร้อยละปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ (TSM)} = \frac{M_d - M_t}{M_d} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ M_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน

M_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการอบ

M_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้งที่ผ่านการแช่น้ำมาแล้ว 24 ชั่วโมง

2) การย่อยสลายทางธรรมชาติโดยการฝังกลบ

ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 ตารางเซนติเมตร ฝังลงในดินให้มีความลึก 8 เซนติเมตร โดยที่อัตราส่วนของดินและทรายอยู่ที่ 1:1 โดยน้ำหนัก และเติมน้ำ 400 มิลลิตร ต่อดินผสม 1.25 กิโลกรัม ในทุกๆวันเพื่อควบคุมความชื้น โดยที่ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มเจลาตินหาได้จากสมการที่ 5

$$\text{ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ} = \frac{M_b - M_f}{M_b} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ M_b คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนการฝังกลบ

M_f คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังจากการฝังกลบ

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลการทดลองดำเนินการโดยใช้การวิเคราะห์แบบการทดสอบที (T-Test) ที่ระย่นัยสำคัญ 0.05 ด้วยซอฟต์แวร์ SPSS (เวอร์ชัน 28.0.1.0.(142), SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

ผลการวิจัย

1. เสถียรภาพต่อแสง

ผลการทดสอบสีของแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นก่อนและหลังการสัมผัสแสง แสดงในตารางที่ 1 การเพิ่มขึ้นของปริมาณ ZnO ในชั้นงานแปรผกผันกับค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเข้มของสีน้ำเงิน ($-b^*$) และค่าความเข้มสีแดง ($+a^*$) แต่แปรผันตรงกับค่าความเข้มสีเขียว ($-a^*$) ซึ่งเป็นสีองค์ประกอบของสารสกัดแอนโทไซยานิน หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยแสงของชั้นงานเป็นเวลา 14 วัน เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ก่อนและหลังการสัมผัสแสง ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติแบบที (T-test) พบว่าชั้นงานทุกสูตรมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของ ΔE ระหว่างก่อนและหลังสัมผัสแสงที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.46 ± 2.01 11.34 ± 0.95 11.47 ± 0.07 9.85 ± 1.92 และ 9.48 ± 0.96 สำหรับชั้นงานที่เติม ZnO ร้อยละ 0 0.25 0.5 0.75 และ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยพบว่าการเติม ZnO ร้อยละ 1 มีค่าความแตกต่าง ΔE ก่อนและหลังสัมผัสแสงน้อยที่สุด นอกจากนี้พบว่าทุกสูตรที่มี ZnO จะมีค่าความแตกต่างของ ΔE ระหว่างก่อนและหลังสัมผัสแสงน้อยกว่าสูตรที่ไม่มี ZnO แสดงให้เห็นว่า ZnO สามารถลดการส่องผ่านของแสง [8, 13] และลดการถูกทำลายของแอนโทไซยานิน [19] ดังนั้นการเติม ZnO ร้อยละ 1 จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นฟิล์มบังสีค่า pH

2. สมบัติทางเคมี (FTIR)

จากผลการวิเคราะห์ FTIR ของแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่มี ZnO ก่อนการสัมผัสแสงแสดงในภาพที่ 2(ก) พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2800 ถึง 3000 อธิบายถึงตำแหน่งของ C-H พีคในตำแหน่ง 1629 เซนติเมตร⁻¹ อธิบายถึงตำแหน่งของกลุ่ม amide-I ซึ่งเป็นตัวแทนของ C=O การยึดพันธะไฮโดรเจนควบคู่ไปกับกลุ่ม COO [20] ที่ตำแหน่ง 1544 เซนติเมตร⁻¹ อธิบายถึงตำแหน่งของกลุ่ม amide-II ซึ่งเกิดจากการยึดและสั่นสะเทือนของสายโซ่กลุ่ม N-H และ C-N ที่ตำแหน่ง 1232 เซนติเมตร⁻¹ อธิบายถึงตำแหน่งของกลุ่ม amide-III ซึ่งเกิดจากการยึดและสั่นสะเทือนจากกลุ่ม N-H และ C-N ของพันธะ amide หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนจากกลุ่ม CH₂ ของ glycine [21] พีคในตำแหน่ง 1034 เซนติเมตร⁻¹ อธิบายถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกไซเซอร์ (กลุ่ม OH ของกลีเซอรอล) และเจลาติน [22] Azlim และคณะ [23] พบว่าการเติมแอนโทไซยานินลงในฟิล์มเจลาติน ส่งผลให้เกิดการเลื่อนของพีคที่ตำแหน่งของ O-H stretching โดยเลื่อนไปที่เลขคลื่นที่มากขึ้นเนื่องจากเกิดแรงกระทำระหว่างวงอะโรมาติกของแอนโทไซยานินและเจลาติน นอกจากนี้ Choi และคณะ [24] ได้รายงานว่ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มผสมแป้งมันฝรั่งและอะการ์ที่ 1645 เซนติเมตร⁻¹ เลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำกว่า (1617 เซนติเมตร⁻¹) ซึ่งเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างเมทริกซ์ฟิล์มกับสารสกัดแอนโทไซยานิน [25] นอกจากนี้การเติม ZnO ร้อยละ 0-1 ลงในฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นพบว่ามี การเลื่อนเล็กน้อยที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2931-2916 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างเจลาตินและ ZnO [26] ภาพที่ 2(ข) แสดงการเปรียบเทียบของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ก่อนและหลังสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงพีคที่ช่วงตำแหน่ง 2931 ถึง 2916 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่เมทิล (CH₃) และเมทิลีน (CH₂) ของฟิล์มจากการสัมผัสด้วยแสง เนื่องการเชื่อมขวางในฟิล์มเจลาติน [27]

นอกจากนี้พบว่า การเติม ZnO ร้อยละ 1 ในฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นมีความเสถียรต่อแสงมากกว่าสูตรอื่น เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งของพีคที่น้อยกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเสถียรภาพที่มีต่อแสงดังแสดงในตารางที่ 1

3. การทดสอบการเน่าเสียของอาหาร

การทดสอบการตอบสนองของแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นกับปลาทูสด พบว่าหลังจากเก็บปลาทูสดไว้ในภาชนะเก็บรักษาอาหารแบบปิด ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-เบสของปลา เพิ่มขึ้นจาก pH 7 เป็น pH 8 เนื่องจากการเน่าเสียด้วยจุลินทรีย์ และเกิดสารกลุ่มเอมีน [28] เช่น ไตรเมทิลลามีน (Trimethylamine) ไดเมทิลลามีน (Dimethylamine) และแอมโมเนีย (Ammonia) [29] ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย ในขณะที่สีของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ในภาพที่ 3 เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวอมฟ้า อย่างเห็นได้ชัดทั้งก่อนและหลังการสัมผัสด้วยแสงเป็นเวลา 14 วัน ซึ่งการเปลี่ยนสีนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bondre และคณะ [30] ที่ศึกษาผลการตอบสนองของสารสกัดแอนโทไซยานินต่อค่าความเป็นกรด-เบส โดยสารประกอบควินอยด์ (Quinonoid) ประจุบวกของฟลาวิลเลียม (Flavylium cation) และคาร์บินอล (Carbinol) ที่อยู่ในสารสกัดแอนโทไซยานินมีความไม่เสถียรและไวต่อค่า pH โดยที่ pH 7-9 สารประกอบคาร์บินอลจะถูกกระตุ้นทำให้แผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะแสดงสีเขียวอมฟ้า เมื่อพิจารณาแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะก่อนและหลังการสัมผัสด้วยแสงเป็นเวลา 14 วัน จากค่าการวัดสี Red Green Blue (RGB) โดยพิจารณาเฉพาะสีเขียวและสีน้ำเงินเนื่องจากการทดสอบการเน่าเสียของปลา ค่า pH จะเพิ่มมากขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มอัจฉริยะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียว จะเห็นได้ว่าฟิล์มที่ประกอบด้วย ZnO ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำเงินและสีเขียวน้อยที่สุดเมื่อเทียบระหว่างฟิล์มก่อนและหลังการสัมผัสด้วยแสง บ่งบอกถึงเสถียรภาพของการเติม ZnO ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถคงประสิทธิภาพการบ่งชี้ pH ได้ดีที่สุดในระหว่างการตรวจวัดการเน่าเสียจาก ค่า pH เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจากปัจจัยอื่นอาจส่งผลกระทบต่อภาพถ่าย ในการทดสอบนี้ควรที่จะใช้ร่วมกับเครื่องวัดแสงและพิจารณาค่าการเปลี่ยนสีจากระบบสี CIELAB

4. สมบัติทางกล

ภาพที่ 4(ก) แสดงผลการทดสอบแรงต้านทานการดึงของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานก่อนการสัมผัสแสงอยู่ในช่วง 3.22-5.28 เมกะปาสคาล โดยค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ZnO ตั้งแต่ร้อยละ 0.25 -1 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก ZnO ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcing filler) ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยก่อให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุลกับสายโซ่พอลิเมอร์ [31] สำหรับชิ้นงานที่สัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วงร้อยละ 18.68-24.93 เมกะปาสคาล ซึ่งเพิ่มขึ้นจากก่อนการสัมผัสแสงกว่าร้อยละ 78.05-82.75 เนื่องจาก ZnO สามารถผลิตอนุมูลอิสระ (Reactive oxygen species; ROS) ได้ทั้งในภาวะแสงที่มองเห็น [32] ได้และแสง UV [27] ซึ่งอนุมูลอิสระ ROS มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมขวางทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น [27] การเพิ่มขึ้นของค่าการต้านทานแรงดึงในฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่เติม ZnO ร้อยละ 0 เมื่อสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน อาจเป็นผลมาจากการสูญเสียกลีเซอรอลของฟิล์ม (Migration of glycerol) และการสูญเสียความชื้น โดยที่ทั้งกลีเซอรอลและความชื้นทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับฟิล์ม [33] ซึ่งสอดคล้องกับผลของความชื้นในตารางที่ 2 Neira และคณะ [34] พบว่าเกิดโครงสร้างเกลียวสามชั้นเหมือนคอลลาเจน (Collagen-like triple helix structure) เมื่อเก็บฟิล์มเจลาตินเป็นระยะเวลา 15 วัน ที่ความชื้นร้อยละ 65 ± 2 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าโซ่เจลาตินสามารถเชื่อมเข้ากับโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้น ภาพที่ 4(ข) แสดงผลการทดสอบของร้อยละการยืดก่อนและหลังสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วันของชิ้นงานที่มีปริมาณ ZnO

ร้อยละ 0 ถึง 1 โดยน้ำหนัก สำหรับชิ้นงานก่อนการสัมผัสแสงพบว่ามีการยึดเกาะในช่วงร้อยละ 70.00-92.25 ซึ่งลดลงกว่าร้อยละ 43.33-91.89 เมื่อเทียบกับหลังการสัมผัสแสง เนื่องจากแรงกระทำระหว่าง ZnO และพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้ฟิล์มมีความยึดหยุ่นลดลง [35] ในขณะที่ชิ้นที่สัมผัสแสงมีค่าร้อยละการยึดเกาะลดลงมากเนื่องจากการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตมีความลำบาก [27]

5. ปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำ

จากการหาปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ที่มีการเติมปริมาณ ZnO ในช่วงร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการสัมผัสแสง แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาชิ้นงานก่อนสัมผัสแสง การเพิ่ม ZnO จนถึงร้อยละ 0.5 พบว่าผลของปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 18.72 เป็นร้อยละ 23.53 และร้อยละ 42.73 เป็นร้อยละ 47.08 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม ZnO ซึ่งสอดคล้องกับรายงานผลการทดลองของ Shankar และคณะ [20] ว่าการเพิ่มปริมาณของ ZnO ในฟิล์มเจลาตินทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัฏภาคระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งก่อให้เกิดเป็นฟิล์มคอมโพสิตที่มีรูพรุนมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม ZnO มากกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำของฟิล์มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติม ZnO มากทำให้เกิดทางคดเคี้ยว (Tortuous path) เพิ่มขึ้นบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ และขัดขวางการเดินทางของโมเลกุลน้ำ [14] เมื่อพิจารณาชิ้นงานหลังจากการสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน พบว่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 15.86 ถึงร้อยละ 18.83 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการสัมผัสด้วยแสงร้อยละ 18.72-23.53 และดัชนีการละลายน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 33.84-36.82 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการสัมผัสแสงร้อยละ 42.73-47.08 เนื่องจากการสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของวัฏภาคพลาสติกไฮเซออร์ ซึ่งมีความชอบน้ำ และเกิดการจัดเรียงโมเลกุลโครงสร้างใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้น้อยลง [36]

6. การย่อยสลายทางธรรมชาติโดยการฝังกลบ

ฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่มี ZnO ร้อยละ 0 0.25 0.5 0.75 และ 1 ในวันที่ 0 แสดงดังภาพที่ 5(ก) สามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 100 ในเวลา 7 วัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5(ข) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่มีส่วนประกอบของแอนโทไซยานินและ ZnO มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

สรุปผลการวิจัย

สารสกัดแอนโทไซยานินที่ได้จากกลีบดอกอัญชันมีค่าอยู่ที่ 2.12 ± 0.34 mg cy-3-glu/g DW ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบ่งชี้ค่า pH ได้ การประยุกต์ใช้ฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นด้วยการเติม ZnO สามารถช่วยลดการถูกทำลายของแอนโทไซยานิน และเพิ่มความเสถียรทางแสงของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น โดย ZnO ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักให้ผลดีที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ ZnO ในช่วงร้อยละ 0.25-1 ในฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ยังส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยึดเกาะของฟิล์มอัจฉริยะทั้งก่อนและหลังการสัมผัสแสง โดยหลังการสัมผัสแสงค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 78.05-82.75 ในขณะที่ร้อยละการยึดเกาะลดลงร้อยละ 43.33-91.89 เมื่อเติมปริมาณของ ZnO ร้อยละ 0-0.5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความชื้นและดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ZnO ทำให้ความต่อเนื่องของวัฏภาคเมทริกซ์ลดลงและเพิ่มรูพรุน ในขณะที่ร้อยละการเติมมากกว่า 0.5 จนถึง 1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความชื้นและ

ดัชนีการละลายน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความคงตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อนำฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นไปทดสอบการเน่าเสียของพลาสติก ที่เก็บไว้ 24 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มอัจฉริยะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวแสดงถึงคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้งานเป็นฟิล์มบ่งชี้ pH ที่สามารถย่อยสลายได้เองภายใต้วิธีการฝังกลบในเวลา 7 วัน

กิตติกรรมประกาศ

This research project is supported by National Research Council of Thailand (NRCT) : NRCT5-RGJ63003-049.

เอกสารอ้างอิง

1. Luchese CL, Sperotto N, Spada JC, Tessaro IC. Effect of blueberry agro-industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film. *Int J Biol Macromol.* 2017; 104:11–18.
2. Sun Y, Zhang M, Adhikari B, Devahastin S, Wang H. Double-layer indicator films aided by BP-ANN-enabled freshness detection on packaged meat products. *Food Packag Shelf Life.* 2022; 31:100808.
3. Rawdkuen S, Faseha A, Benjakul S, Kaewprachu P. Application of anthocyanin as a color indicator in gelatin films. *Food Biosci.* 2020; 36:100603.
4. Mary SK, Koshy RR, Daniel J, Koshy JT, Pothen LA, Thomas S. Development of starch based intelligent films by incorporating anthocyanins of butterfly pea flower and TiO₂ and their applicability as freshness sensors for prawns during storage. *RSC Adv.* 2020; 10(65):39822–39830.
5. Liu B, Xu H, Zhao H, Liu W, Zhao L, Li Y. Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial activity for food packaging applications. *Carbohydr Polym.* 2017; 157:842–849.
6. Salacheep S, Kasemsiri P, Pongsa U, Okhawilai M, Chindapasirt P, Hiziroglu S. Optimization of ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and bioactive compounds from butterfly pea petals using Taguchi method and Grey relational analysis. *J Food Sci Technol.* 2020; 57(10):3720–3730.
7. Liu L, Zhang J, Shi J, Huang X, Zou X, Zhang D, et al. Preparation and comparison of two functional nanoparticle-based bilayers reinforced with a K-carrageenan–anthocyanin complex. *Int J Biol Macromol.* 2020; 165:758–766.
8. Yang Z, Zhai X, Zou X, Shi J, Huang X, Li Z, et al. Bilayer pH-sensitive colorimetric films with light-blocking ability and electrochemical writing property: Application in monitoring crucian spoilage in smart packaging. *Food Chem.* 2021; 336:127634.
9. ATTOE EL, VON ELBE JH. Photochemical Degradation of Betanine and Selected Anthocyanins. *J Food Sci.* 1981; 46(6):1934–1937.

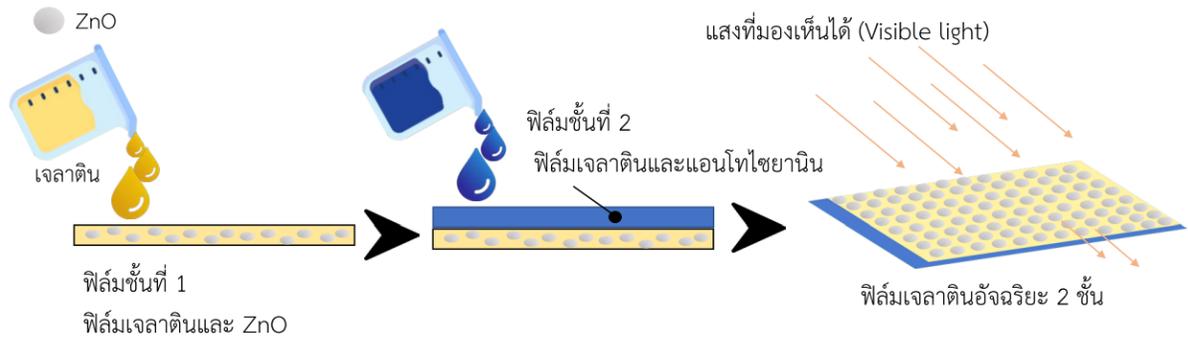


10. Lahtinen K, Kääriäinen T, Johansson P, Kotkamo S, Maydannik P, Seppänen T, et al. UV protective zinc oxide coating for biaxially oriented polypropylene packaging film by atomic layer deposition. *Thin Solid Films*. 2014; 570:33–37.
11. Nafchi AM, Moradpour M, Saeidi M, Alias AK. Effects of nanorod-rich ZnO on rheological, sorption isotherm, and physicochemical properties of bovine gelatin films. *LWT - Food Sci Technol*. 2014; 58(1):142–149.
12. Lizundia E, Penayo MC, Guinault A, Vilas JL, Domenech S. Impact of ZnO nanoparticle morphology on relaxation and transport properties of PLA nanocomposites. *Polym Test*. 2019; 75:175–184.
13. Shankar S, Wang LF, Rhim JW. Incorporation of zinc oxide nanoparticles improved the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of PLA-based nanocomposite films. *Mater Sci Eng C*. 2018; 93:289–298.
14. Kanmani P, Rhim J-W. Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and ZnO nanoparticles. *Carbohydr Polym*. 2014; 106:190–199.
15. Alias SS, Ismail AB, Mohamad AA. Effect of pH on ZnO nanoparticle properties synthesized by sol–gel centrifugation. *J Alloys Compd*. 2010; 499(2):231–237.
16. Cheok CY, Chin NL, Yusof YA, Talib RA, Law CL. Optimization of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) extractions from mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.) hull using ultrasonic treatments. *Ind Crops Prod*. 2013; 50:1–7.
17. Prietto L, Mirapalhete TC, Pinto VZ, Hoffmann JF, Vanier NL, Lim LT, et al. pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from black bean seed coat and red cabbage. *LWT - Food Sci Technol*. 2017; 80:492–500.
18. Srikhao N, Kasemsiri P, Ounkaew A, Lorwanishpaisarn N, Okhawilai M, Pongsa U, et al. Bioactive Nanocomposite Film Based on Cassava Starch/Polyvinyl Alcohol Containing Green Synthesized Silver Nanoparticles. *J Polym Environ*. 2021; 29(2):672–684.
19. Akhtar MJ, Jacquot M, Jasniewski J, Jacquot C, Imran M, Jamshidian M, et al. Antioxidant capacity and light-aging study of HPMC films functionalized with natural plant extract. *Carbohydr Polym*. 2012; 89(4):1150–1158.
20. Shankar S, Teng X, Li G, Rhim JW. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. *Food Hydrocoll*. 2015; 45:264–271.
21. Arfat YA, Benjakul S, Prodpran T, Sumpavapol P, Songtipya P. Properties and antimicrobial activity of fish protein isolate/fish skin gelatin film containing basil leaf essential oil and zinc oxide nanoparticles. *Food Hydrocoll*. 2014; 41:265–273.
22. Hoque MS, Benjakul S, Prodpran T, Songtipya P. Properties of blend film based on cuttlefish (*Sepia pharaonis*) skin gelatin and mungbean protein isolate. *Int J Biol Macromol*. 2011; 49(4):663–673.

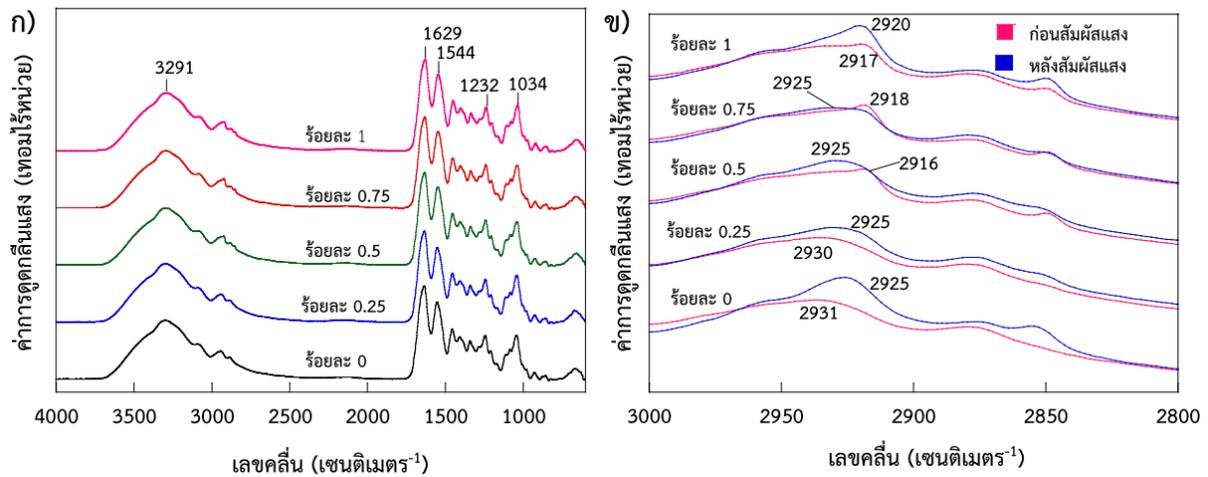


23. Azlim NA, Mohammadi Nafchi A, Oladzadabbasabadi N, Ariffin F, Ghalambor P, Jafarzadeh S, et al. Fabrication and characterization of a pH-sensitive intelligent film incorporating dragon fruit skin extract. *Food Sci Nutr.* 2022; 10(2):597–608.
24. Choi I, Young J, Lacroix M, Han J. Intelligent pH indicator film composed of agar / potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chem.* 2017; 218:122–128.
25. Yun D, Cai H, Liu Y, Xiao L, Song J, Liu J. Development of active and intelligent films based on cassava starch and Chinese bayberry (: *Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) anthocyanins. *RSC Adv.* 2019; 9:30905–30916.
26. Amjadi S, Emaminia S, Heyat Davudian S, Pourmohammad S, Hamishehkar H, Roufegarinejad L. Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles. *Carbohydr Polym.* 2019; 216:376–384.
27. Shahabi-Ghahfarrokhi I, Babaei-Ghazvini A. Using photo-modification to compatibilize nano-ZnO in development of starch-kefir-ZnO green nanocomposite as food packaging material. *Int J Biol Macromol.* 2019; 124:922–930.
28. Morsy MK, Zór K, Kostesha N, Alstrøm TS, Heiskanen A, El-Tanahi H, et al. Development and validation of a colorimetric sensor array for fish spoilage monitoring. *Food Control.* 2016; 60:346–352.
29. Ólafsdóttir G, Kristbergsson K. Electronic-nose technology: Application for quality evaluation in the fish industry. *Odors in the Food Industry.* 2006 57–74.
30. Bondre S, Patil P, Kulkarni A, Pillai MM. Study on isolation and purification of anthocyanins and its applications as pH indicator. *Int J Adv Biotechnol Res.* 2012; 3(3):698–702.
31. Lee SW, Said NS, Sarbon NM. The effects of zinc oxide nanoparticles on the physical, mechanical and antimicrobial properties of chicken skin gelatin/tapioca starch composite films in food packaging. *J Food Sci Technol [Internet].* 2021; 58(11):4294–4302.
32. Lipovsky A, Tzitrinovich Z, Friedmann H, Applerot G, Gedanken A, Lubart R. EPR Study of Visible Light-Induced ROS Generation by Nanoparticles of ZnO. *J Phys Chem C.* 2009; 113(36):15997–16001.
33. Theerawitayaart W, Prodpran T, Benjakul S, Niluwan K, de la Caba K. Storage stability of fish gelatin films by molecular modification or direct incorporation of oxidized linoleic acid: Comparative studies. *Food Hydrocoll.* 2021; 113:106481.
34. Andreuccetti C, Carvalho RA, Galicia-García T, Martínez-Bustos F, González-Nuñez R, Grosso CRF. Functional properties of gelatin-based films containing *Yucca schidigera* extract produced via casting, extrusion and blown extrusion processes: A preliminary study. *J Food Eng.* 2012; 113(1):33–40.
35. Meshram J V., Koli VB, Phadatare MR, Pawar SH. Anti-microbial surfaces: An approach for deposition of ZnO nanoparticles on PVA-Gelatin composite film by screen printing technique. *Mater Sci Eng C.* 2017; 73:257–266.

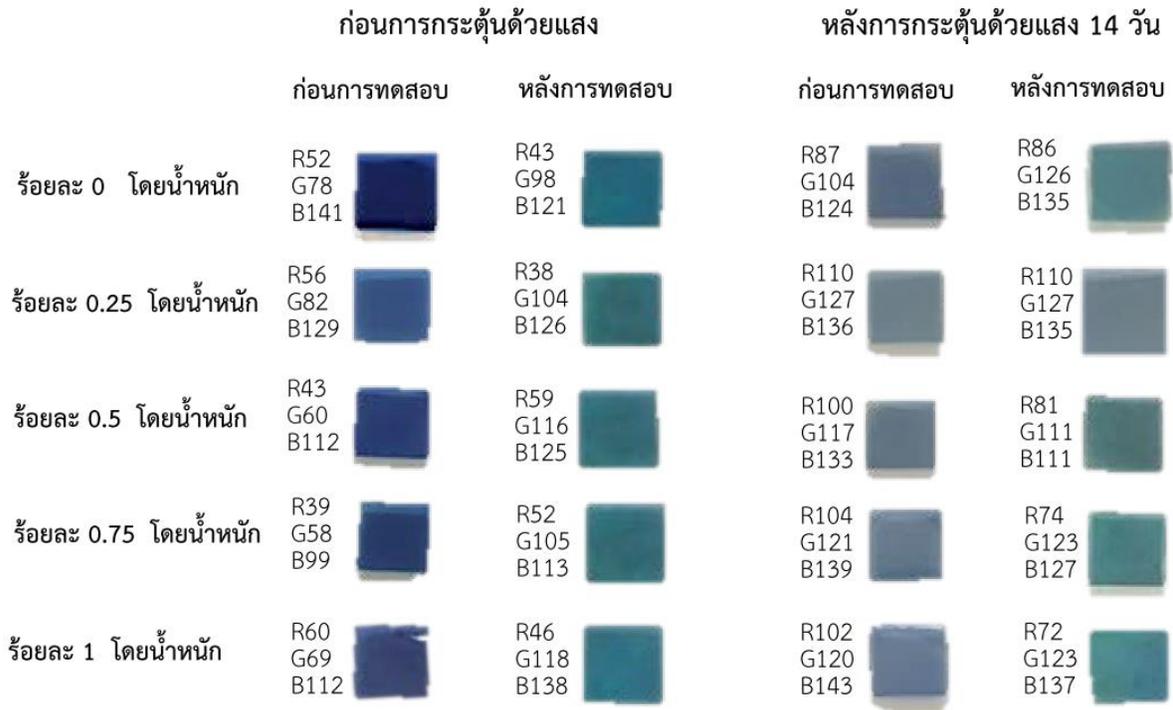
36. Neira LM, Martucci JF, Stejskal N, Ruseckaite RA. Time-dependent evolution of properties of fish gelatin edible films enriched with carvacrol during storage. Food Hydrocoll. 2019; 94: 304-310.



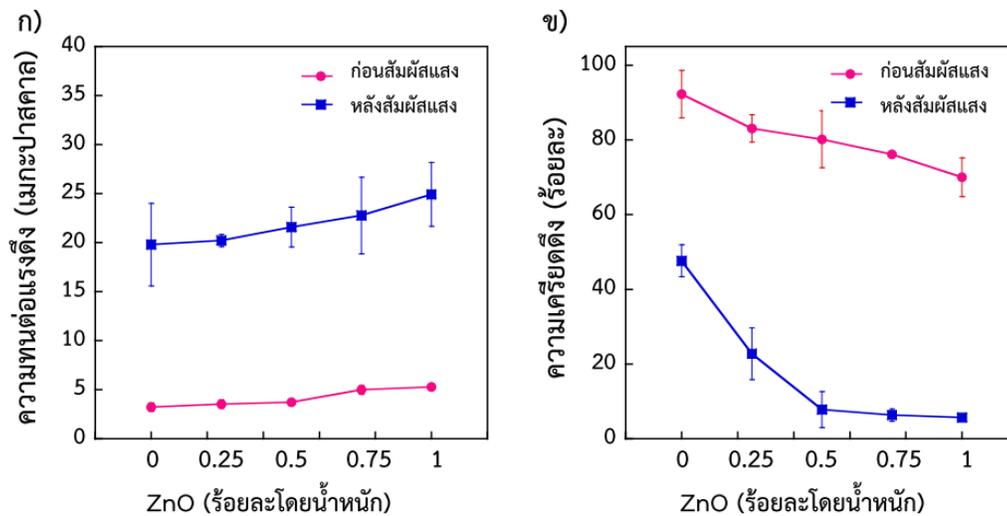
ภาพที่ 1 แบบจำลองแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น



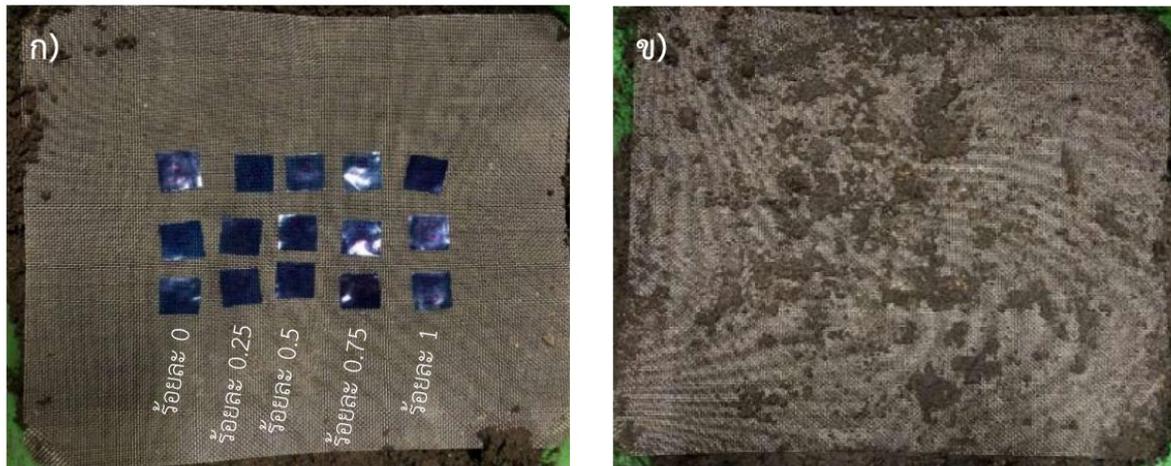
ภาพที่ 2 ผลการทดสอบ FTIR ของแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะที่มี ZnO ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ก) ก่อนการสัมผัสแสง ข) เปรียบเทียบก่อนและหลังสัมผัสแสง 14 วัน



ภาพที่ 3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีฟิล์มอัจฉริยะที่มีปริมาณ ZnO ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการสัมผัสด้วยแสงกับการนำเสียของปลาที่เก็บไว้ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้นที่มีปริมาณ ZnO ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ต่อ ก) การต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน ข) ร้อยละการยืดก่อนและหลังการสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน



ภาพที่ 5 การทดสอบการย่อยสลายทางธรรมชาติโดยวิธีการฝังกลบของฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ที่มีร้อยละการเติม ZnO ร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก) ก่อนการฝังกลบ และ ข) การฝังกลบเป็นเวลา 7 วัน

ตารางที่ 1 ปริมาตรสี (L^* a^* b^* และ ΔE) ของแผ่นฟิล์มเจลาตินอัจฉริยะสองชั้น ที่มี ZnO ร้อยละ 0 0.25 0.5 0.75 และ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังการสัมผัสแสงเป็นเวลา 14 วัน

ปริมาณ ZnO (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลา (วัน)	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	0	71.45 ± 0.77	8.03 ± 1.46	-47.33 ± 1.13	62.08 ± 7.15
	14	75.91 ± 0.18	-6.54 ± 0.06	-35.01 ± 0.13	49.62 ± 9.16
0.25	0	60.43 ± 1.46	1.61 ± 0.88	-38.78 ± 0.98	55.07 ± 1.50
	14	65.95 ± 1.68	-8.10 ± 0.16	-27.30 ± 0.75	43.73 ± 0.55
0.50	0	59.66 ± 0.18	1.12 ± 0.48	-37.63 ± 0.32	55.02 ± 0.10
	14	65.14 ± 1.18	-8.61 ± 0.20	-26.71 ± 0.11	43.55 ± 0.03
0.75	0	58.06 ± 1.08	0.42 ± 1.09	-34.36 ± 0.32	56.09 ± 1.99
	14	63.43 ± 1.22	-9.18 ± 0.36	-26.65 ± 0.14	46.24 ± 0.07
1	0	54.77 ± 0.73	0.32 ± 1.03	-33.94 ± 0.40	56.21 ± 1.61
	14	61.22 ± 1.99	-9.42 ± 0.19	-23.21 ± 0.34	46.73 ± 0.65

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบปริมาณความชื้นและดัชนีการละลายน้ำ

ปริมาณ ZnO (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ก่อนการสัมผัสด้วยแสง		หลังการสัมผัสด้วยแสง 14 วัน	
	ความชื้น (ร้อยละ)	ดัชนีการละลายน้ำ (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)	ดัชนีการละลายน้ำ (ร้อยละ)
0	18.72 ± 1.61	42.73 ± 0.60	15.86 ± 0.03	33.84 ± 0.44
0.25	21.64 ± 0.91	44.47 ± 1.56	18.27 ± 0.62	34.39 ± 0.28
0.50	23.53 ± 1.85	47.08 ± 1.20	18.83 ± 0.06	36.82 ± 0.13
0.75	22.00 ± 0.53	46.21 ± 1.15	17.26 ± 0.58	35.09 ± 0.37
1	21.53 ± 0.81	43.80 ± 1.17	16.56 ± 0.63	34.07 ± 0.08