

ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากวัสดุชีวภาพที่ตอบสนองต่อ pH จากกะหล่ำปลีม่วง สำหรับการประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

เศรษฐณัฐ อิ่มนุกุลกิจ^{1*} และ รุ่งเพชร ศุภมณี¹

¹โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*gfsnetwork@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะสำหรับบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์จากการเกษตรผ่านการเปลี่ยนแปลงสีตามค่า pH โดยแบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การเตรียมและทดสอบฟิล์มจากวัสดุชีวภาพ คือ แป้ง โดยศึกษาผลของชนิดแป้งและปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์ม และ (2) การเตรียมและทดสอบฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง ทั้งในรูปแบบผงและสารสกัดน้ำ ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มแป้งที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุด คือ ฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวที่เติมกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร โดยมีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีความเหนียวที่พื้นผิว มีความหนาเฉลี่ย 0.22 ± 0.01 มิลลิเมตร สามารถขึ้นรูปได้ดี มีอัตราการดูดน้ำและการละลายน้ำต่ำ มีความต้านทานต่อแรงดึงดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตรอื่น เมื่อนำสูตรดังกล่าวมาพัฒนาเป็นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะใส สีขาว ไม่มีความเหนียวที่ผิว และมีความหนาเฉลี่ย 0.23 ± 0.01 และ 0.24 ± 0.01 มิลลิเมตร สำหรับฟิล์มจากผงและสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงตามลำดับ โดยฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงมีอัตราการดูดน้ำและการละลายน้ำต่ำกว่าเล็กน้อย โดยฟิล์มอินดิเคเตอร์ทั้งสองชนิด มีความต้านทานต่อแรงดึง ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียว ในด้านการประยุกต์ใช้ ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงสามารถเปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจนครอบคลุมช่วง pH 1–14 ในขณะที่ฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในช่วง pH 12–14 ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงที่พัฒนาขึ้นมีความน่าสนใจในการนำไปใช้บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะสำหรับบ่งชี้คุณภาพ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ฟิล์มอินดิเคเตอร์ตอบสนองต่อ pH สารสกัดกะหล่ำปลีม่วง ฟิล์มจากวัสดุชีวภาพ บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

A pH-Responsive Biobased Indicator Film from Red Cabbage for Application in Intelligent Packaging

Setthanat Imnukulkit^{1*} and Rungphet Suphamanee¹

¹The Demonstration School of Nakhon Pathom Rajabhat University

*gfsetwork@gmail.com

Abstract

This study investigates the development of a pH-responsive indicator film from red cabbage using biobased materials for application as intelligent packaging to monitor the quality of agricultural products through pH-dependent color changes. The research was divided into two parts: (1) preparation and evaluation of biobased films using starch, focusing on the effects of starch type and glycerol content on film properties, and (2) preparation and evaluation of indicator films from red cabbage in both powder and aqueous extract forms. The results revealed that the film with the best physical properties was obtained from mung bean starch with the addition of 5 mL of glycerol. The film was transparent, colorless, and had a non-sticky surface, with an average thickness of 0.22 ± 0.01 mm. It exhibited good film-forming ability, low water absorption and solubility, as well as higher tensile strength compared to other formulations. When this formulation was further developed into indicator films incorporating red cabbage, the resulting films appeared translucent brown with non-sticky surfaces, and had average thicknesses of 0.23 ± 0.01 mm and 0.24 ± 0.01 mm for the red cabbage powder- and aqueous extract-based films, respectively. The powder-based film showed slightly lower water absorption and solubility than the aqueous extract-based film. Nevertheless, both indicator films exhibited reduced mechanical properties compared to the original mung bean starch film. In terms of application, the indicator film prepared from red cabbage aqueous extract demonstrated a clear and wide color response across the pH range of 1–14, whereas the powder-based film showed distinct color changes primarily in the alkaline range (pH 12–14). In conclusion, the developed red cabbage-based indicator film shows interesting potential for use in intelligent packaging to monitor food quality, enhancing safety while remaining environmentally friendly.

Keywords: pH-Responsive indicator film, Red cabbage aqueous extract, Biobased film, Intelligent packaging

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกจากปิโตรเลียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะตกค้างและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์จากวัสดุชีวภาพ (biobased materials) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยเฉพาะ “บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ” (intelligent packaging) ซึ่งเป็นระบบบรรจุ



ภัณฑ์ที่สามารถตรวจสอบและแสดงสถานะคุณภาพของอาหารผ่านการเปลี่ยนแปลงของตัวบ่งชี้ต่าง ๆ เช่น สี กลิ่น หรือค่า pH เพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัยของผู้บริโภคและลดการสูญเสียอาหารระหว่างการเก็บรักษา [1-2]

หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ ฟิล์มอินดิเคเตอร์ที่ตอบสนองต่อ pH (pH-responsive indicator film) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสีตามสภาวะความเป็นกรด-ด่างของอาหารได้ โดยเฉพาะการใช้สารสีธรรมชาติ เช่น กลุ่มแอนโทไซยานิน (anthocyanin) เคอร์คูมิน (curcumin) ที่พบในพืชหลายชนิด เนื่องจากมีคุณสมบัติเปลี่ยนสีได้ตามค่า pH และมีความปลอดภัยต่อการใช้งานด้านอาหาร กะหล่ำปลีม่วง (red cabbage) เป็นแหล่งของแอนโทไซยานินที่สำคัญ สามารถให้สีที่แตกต่างกันตั้งแต่สีแดง ม่วง น้ำเงิน เขียว และเหลือง เมื่ออยู่ในสภาวะ pH ที่แตกต่างกัน จึงเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นสารอินดิเคเตอร์ในบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ [3-7]

งานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาการพัฒนาฟิล์มอินดิเคเตอร์ร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น แป้ง ไคโตซาน เซลลูโลส และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มให้เหมาะสมต่อการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ ทั้งในด้านความแข็งแรงเชิงกล ความสามารถในการป้องกันความชื้น และความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยฟิล์มสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีได้อย่างชัดเจนเมื่อสภาวะความเป็นกรด-เบสเปลี่ยนไป โดยในงานนี้สนใจศึกษาฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงซึ่งน่าจะสามารถประยุกต์ใช้ในการบ่งบอกคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรได้ เนื่องจากสารแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีม่วงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อผลิตผลเกิดการสุกหรือเน่าเสีย จะเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจากจุลินทรีย์และเอนไซม์ ส่งผลให้เกิดการสลายและการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรด-เบสภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถกระตุ้นให้ฟิล์มอินดิเคเตอร์เปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจน ดังนั้นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงจึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะสำหรับใช้ติดตามคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรได้ เพิ่มความปลอดภัยของผู้บริโภค และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในอนาคต [8-10]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมฟิล์มจากแป้ง

ศึกษาผลของชนิดแป้งและปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโดยใช้แป้งข้าวโพดและแป้งถั่วเขียวเป็นวัสดุหลักในการเตรียมฟิล์ม มีวิธีการทดลองดังนี้ ชั่งแป้งตามสูตรที่กำหนดในตารางที่ 1 เติมน้ำตามปริมาตรที่กำหนด ผสมลงในบีกเกอร์ให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องจนสารละลายมีลักษณะใส จากนั้นเติมกลีเซอรอลตามปริมาตรที่กำหนดลงในสารละลาย แล้วกวนต่อเป็นเวลา 3 นาที เทสารละลายลงบนแผ่นอะคริลิกเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนแห้ง และลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นอะคริลิก เพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลต่อไป

ตารางที่ 1 น้ำหนักของแป้งและปริมาตรของกลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มสูตรต่างๆ

ชนิดแป้ง	น้ำ (ml)	กลีเซอรอล (ml)
แป้งข้าวโพด (10 g)	200	0
	195	5
	190	10
	180	20
แป้งข้าวโพด (5 g) ผสม แป้งถั่วเขียว (5 g)	200	0
	195	5
	190	10
	180	20

ตารางที่ 1 น้ำหนักของแป้งและปริมาตรของกลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มสูตรต่างๆ (ต่อ)

ชนิดแป้ง	น้ำ (ml)	กลีเซอรอล (ml)
แป้งข้าวเขียว (10 g)	200	0
	195	5
	190	10
	180	20

หมายเหตุ ปริมาตรของเหลวรวมในทุกสูตรเท่ากับ 200 มิลลิลิตร

2.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากแป้ง

2.2.1 ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์มและผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม

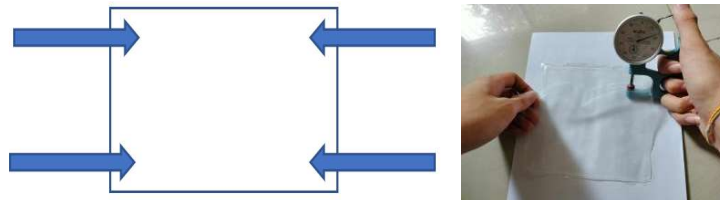
ประเมินความสามารถในการลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นอะคริลิก และประเมินลักษณะผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มโดยกำหนดเกณฑ์การประเมินตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์มและผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม

เกณฑ์ที่กำหนด	ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์ม	ผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม
+	ไม่สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ หรือ ขาด	เหนียว
++	สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้	เหนียวเล็กน้อย
+++	สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย	ไม่เหนียว

2.2.2 ความหนาและสีของของแผ่นฟิล์ม

วัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยใช้เครื่องวัดความหนา (Thickness gauge) จำนวน 4 ตำแหน่งแสดงดังภาพที่ 1 และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และบันทึกสีของแผ่นฟิล์มจากการสังเกตด้วยสายตา



ภาพที่ 1 ตำแหน่งการวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม

2.2.3 ความสามารถในการดูดน้ำของแผ่นฟิล์ม

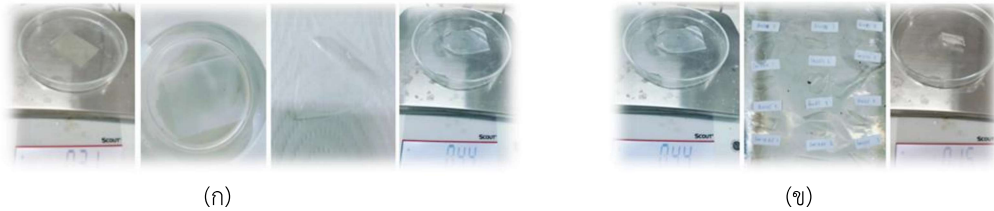
ทดสอบความสามารถในการดูดน้ำของแผ่นฟิล์ม โดยดำเนินการดังนี้ ตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาดเท่ากันในรูปแบบสี่เหลี่ยม โดยชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของแผ่นฟิล์มให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.28–0.35 กรัม จากนั้นนำแผ่นฟิล์มแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำแผ่นฟิล์มขึ้นจากน้ำให้ซับน้ำบริเวณผิวออกและนำไปชั่งน้ำหนักแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำ (น้ำหนักฟิล์มเปียก) แสดงดังภาพที่ 2 (ก) จากนั้นคำนวณร้อยละการดูดน้ำตามสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละการดูดน้ำหรืออัตราการดูดน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มเปียก} - \text{น้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100 \quad (1)$$

2.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำแผ่นฟิล์ม

ศึกษาความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์ม โดยนำแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแช่น้ำ (จากการทดลองข้อ 2.2.3) ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักแผ่นฟิล์มหลังอบแห้ง (น้ำหนักฟิล์มที่ไม่ละลายน้ำ) แสดงดังภาพที่ 2 (ข) และคำนวณร้อยละการละลายน้ำตามสมการที่ 2

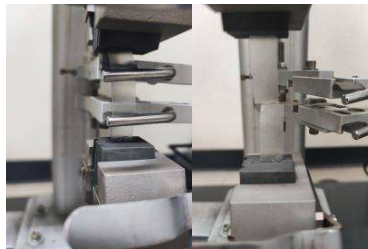
$$\text{ร้อยละการละลายน้ำหรืออัตราการละลายน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักฟิล์มที่ไม่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2)$$



ภาพที่ 2 การทดสอบ (ก) ความสามารถในการดูดน้ำ และ (ข) ความสามารถในการละลายน้ำแผ่นฟิล์ม

2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้ง

ทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้งโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine

2.4 การเตรียมและทดสอบความเป็นอินดิเคเตอร์ของกะหล่ำปลีม่วง

งานวิจัยนี้ใช้กะหล่ำปลีม่วงทั้งในรูปแบบผงและสารสกัดน้ำเป็นสารอินดิเคเตอร์ โดยสารสกัดน้ำมีขั้นตอนการเตรียมนำกะหล่ำปลีม่วงสด 500 กรัม เติมน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปั่นให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำมากรองเพื่อแยกส่วนของเหลว เก็บส่วนสารละลายที่ได้เป็นสารสกัดกะหล่ำปลีม่วง ทดสอบสมบัติการเป็นอินดิเคเตอร์ของกะหล่ำปลีม่วงทั้งในรูปแบบผงและสารสกัดน้ำ โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีในสารละลายที่มีค่า pH 1-14

2.5 การเตรียมฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

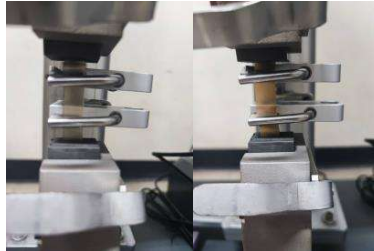
เมื่อได้สูตรฟิล์มที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า จึงนำสูตรดังกล่าวมาใช้ในการเตรียมฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง โดยฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงรูปแบบผง เตรียมโดยเติมผงกะหล่ำปลีม่วงปริมาณ 2 กรัม ลงในสูตรฟิล์มที่เหมาะสม จากนั้นเตรียมฟิล์มตามขั้นตอนเดียวกับข้อ 2.1 ในขณะที่ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงรูปแบบสารสกัดน้ำใช้สารสกัดกะหล่ำปลีม่วงแทนน้ำในสูตรฟิล์มและ เตรียมฟิล์มตามขั้นตอนเดียวกับข้อ 2.1 เช่นเดียวกัน

2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ของฟิล์มอินดิเคเตอร์ตามวิธีการเดียวกับข้อ 2.2 และ 2.3 ในขณะที่การทดสอบสมบัติทางเคมีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ทดสอบโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่มีค่า pH 1–14

2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

ทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine

2.8 การศึกษาพื้นผิวของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้ง

3.1.1 สี ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นและผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม

ผลของสีของแผ่นฟิล์ม ความสามารถในการลอกออกจากแผ่นอะคริลิก และลักษณะผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มจากแป้งที่เตรียมได้แสดงดังตารางที่ 3 โดยเกณฑ์การประเมินความสามารถในการลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นอะคริลิกและลักษณะผิวสัมผัส กำหนดตามเกณฑ์ที่แสดงในตารางที่ 2 ผลการทดลองพบว่า แผ่นฟิล์มจากแป้งทุกชนิดที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีลักษณะสีขาวขุ่น ผิวสัมผัสไม่เหนียว และมีความเปราะกรอบ ส่งผลให้แผ่นฟิล์มแตกหักง่ายและไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่สมบูรณ์ได้ เนื่องจากการไม่มีสารพลาสติไซเซอร์ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่โครงสร้างฟิล์ม เมื่อเติมกลีเซอรอลลงในสูตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีความใสมากขึ้น และสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดีขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลเป็น 20 มิลลิลิตร แผ่นฟิล์มไม่สามารถลอกออกจากแผ่นอะคริลิกได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแผ่นฟิล์มมีความเหนียวมากและเกิดการฉีกขาดระหว่างการลอกออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแป้งที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม พบว่า ชนิดของแป้งไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์ม โดยแนวโน้มของลักษณะฟิล์มที่ได้มีความใกล้เคียงกันในทุกสูตรการทดลอง



ตารางที่ 3 สี ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นและผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มจากแป้ง

ชนิดแป้ง	น้ำ (ml)	กลีเซอรอล (ml)	สีของแผ่นฟิล์ม	ความสามารถในการดึงออกเป็น แผ่นฟิล์ม*	ผิวสัมผัสของ แผ่นฟิล์ม*
แป้งข้าวโพด (10 g)	200	0	ขาวขุ่น	+ แผ่นฟิล์มกรอบ ดึงออกแล้วขาด	+++
	195	5	ใส ไม่มีสี	+++	+++
	190	10	ใส ไม่มีสี	++	++
	180	20	ใส ไม่มีสี	+ ดึงออกมาไม่เป็นแผ่นขาด	+
แป้งข้าวโพด (5 g) ผสม แป้งถั่วเขียว (5 g)	200	0	ขาวขุ่น	+ แผ่นฟิล์มกรอบ ดึงออกแล้วขาด	+++
	195	5	ใส ไม่มีสี	+++	+++
	190	10	ใส ไม่มีสี	++	++
	180	20	ใส ไม่มีสี	+ ดึงออกมาไม่เป็นแผ่นขาด	+
แป้งถั่วเขียว (10 g)	200	0	ขาวขุ่น	+ แผ่นฟิล์มกรอบ ดึงออกแล้วขาด	+++
	195	5	ใส ไม่มีสี	+++	+++
	190	10	ใส ไม่มีสี	++	++
	180	20	ใส ไม่มีสี	+ ดึงออกมาไม่เป็นแผ่นขาด	+

* จากตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์ได้ดังนี้

เกณฑ์ที่กำหนด	ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์ม	ผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม
+	ไม่สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ หรือ ขาด	เหนียว
++	สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้	เหนียวเล็กน้อย
+++	สามารถดึงออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย	ไม่เหนียว

3.1.2 ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ความหนาของแผ่นฟิล์มจากแป้งสูตรต่าง ๆ วัดด้วยเครื่องวัดความหนา โดยผลการวัดความหนาแสดงในตารางที่ 4 พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 0.20–0.31 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมกลีเซอรอลส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณของแข็งและลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้ง ส่งผลให้โครงสร้างของแผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นและมีปริมาตรมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแป้งที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม พบว่า ชนิดของแป้งไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม โดยแผ่นฟิล์มจากทุกสูตรมีค่าความหนาอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน

กลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร ($p = 0.924$) แป้งข้าวโพดผสมถั่วเขียวกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร ($p = 0.287$) และแป้งถั่วเขียวกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร ($p = 0.885$) อัตราการดูดน้ำและการละลายน้ำเป็นสมบัติสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์ม โดยแผ่นฟิล์มที่มีอัตราการดูดน้ำสูงจะสามารถดูดซับความชื้นและเกิดการพองตัวได้มาก ขณะที่แผ่นฟิล์มที่มีอัตราการละลายน้ำสูงจะเกิดการละลายหรือเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับน้ำ ซึ่งอาจส่งผลต่อขนาด รูปร่าง และความแข็งแรงเชิงกลของแผ่นฟิล์ม

3.1.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากแป้ง

สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงและระยะยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มจากแป้งสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 โดยผลการวิเคราะห์ Two-way ANOVA พบว่าชนิดของแป้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความต้านทานแรงดึง ($F(2,12) = 125.39, p < 0.001$) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด ($F(2,12) = 44.66, p < 0.001$) ในขณะที่ปริมาณกลีเซอรอลไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อทั้งสองสมบัตินี้โดยตรง ($p = 0.186$ และ $p = 0.867$ ตามลำดับ) แต่พบว่าชนิดแป้งกับปริมาณกลีเซอรอลมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อระยะยืดตัว ณ จุดขาด ($p = 0.002$) แสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลส่งผลต่อความยืดหยุ่นของฟิล์มขึ้นอยู่กับชนิดแป้งที่ใช้ร่วมด้วย แผ่นฟิล์มจากแป้งถั่วเขียวที่เติมกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดที่ 6.78 ± 0.08 MPa และมีระยะยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ $23.64 \pm 3.43\%$ แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดี ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของแป้งถั่วเขียวที่สามารถสร้างโครงข่ายฟิล์มได้แน่นและสม่ำเสมอ ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เมื่อทดสอบเปรียบเทียบรายคู่ด้วย Tukey's HSD พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของสูตรนี้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสูตรแป้งข้าวโพดกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร แป้งข้าวโพดกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร และแป้งข้าวโพดผสมแป้งถั่วเขียวที่มีกลีเซอรอลทั้งสองปริมาตร ($p \leq 0.0001$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากแป้งถั่วเขียวกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร ($p = 0.898$) เช่นเดียวกันกับ ระยะยืดตัว ณ จุดขาดของสูตรนี้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากทุกสูตร ($p < 0.05$ ทุกคู่) รวมถึงแตกต่างจากแป้งถั่วเขียวกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร ($p = 0.0344$) ซึ่งเป็นสูตรที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกัน

เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจาก 5 เป็น 10 มิลลิลิตร พบว่าแผ่นฟิล์มทุกสูตรมีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงลดลงขณะที่ระยะยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในบางสูตร โดยเฉพาะแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวโพด ซึ่งระยะยืดตัวเพิ่มจาก 14.90% เป็น 16.72% การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้ง ทำให้โครงสร้างฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง อย่างไรก็ตาม รูปแบบดังกล่าวไม่ปรากฏในแป้งถั่วเขียว ซึ่งเมื่อเพิ่มกลีเซอรอลเป็น 10 มิลลิลิตร กลับพบว่าทั้งความต้านทานแรงดึงและระยะยืดตัวลดลงพร้อมกัน (6.46 MPa และ 17.78% ตามลำดับ) อาจอธิบายได้ว่ากลีเซอรอลในปริมาณสูงเกินไปในระบบแป้งถั่วเขียวไปรบกวนโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ไมโลสและอะไมโลเพกติน จนลดทั้งความยืดหยุ่นและเสถียรภาพเชิงโครงสร้างของฟิล์มลงแทนที่จะเสริมความยืดหยุ่นตามกลไกปกติของพลาสติกไซเซอร์

สำหรับแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งถั่วเขียว พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 3.16–3.54 MPa ซึ่งต่ำกว่าแผ่นฟิล์มจากแป้งถั่วเขียวเพียงชนิดเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$ ทุกคู่) และมีระยะยืดตัว ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 7.52–12.05% ซึ่งต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ($p < 0.05$ ทุกคู่ โดยส่วนใหญ่ $p < 0.001$) ยกเว้นคู่แป้งข้าวโพดผสมแป้งถั่วเขียวกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร เทียบกับแป้งถั่วเขียวกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร ที่ $p = 0.0397$) แสดงให้เห็นว่าการผสมแป้งทั้งสองชนิดอาจทำให้โครงสร้างภายในของฟิล์มมีความไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเทียบกับแป้งถั่วเขียวบริสุทธิ์

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way ANOVA ร่วมกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD ($\alpha = 0.05$) สนับสนุนผลการทดลองว่า ฟิล์มจากแป้งถั่วเขียว 10 กรัม ร่วมกับกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาฟิล์มอินดิเคเตอร์ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีอัตราการดูดน้ำต่ำที่สุด และมีอัตราการละลายน้ำอยู่ในระดับต่ำ

โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสูตรที่มีค่าการละลายน้ำสูงที่สุด ขณะเดียวกันยังให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสูตรส่วนใหญ่ ยกเว้นสูตรแป้งถั่วเขียวร่วมกับกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร และมีค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสูตร

3.2 การทดสอบความเป็นอินดิเคเตอร์ของกะหล่ำปลีม่วง

อินดิเคเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) อินดิเคเตอร์จากผงกะหล่ำปลีม่วง และ 2) อินดิเคเตอร์จากสารสกัดน้ำของกะหล่ำปลีม่วง โดยผลการทดสอบสมบัติการเป็นอินดิเคเตอร์เบื้องต้นของกะหล่ำปลีม่วง พบว่า ทั้งกะหล่ำปลีม่วงในรูปแบบผงและสารสกัดน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตามสภาวะกรดเบสที่แตกต่างกันในช่วง pH 1–14 โดยมีลักษณะการเปลี่ยนสีที่ pH ต่างๆได้เช่นกับยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์แสดงดังภาพที่ 5 จากภาพเห็นถึงศักยภาพของสารแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีม่วงในการประยุกต์ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ธรรมชาติและติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สารสกัดจากพืช	สี	สีของสารละลายที่ค่า pH ต่าง ๆ													
	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
กะหล่ำปลีม่วง ผง															
น้ำกะหล่ำปลีม่วง สด															
ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์															

ภาพที่ 5 การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงรูปแบบผงและสารสกัดน้ำที่ pH ต่างๆ เปรียบเทียบกับยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์

3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

3.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

ภาพที่ 6 แสดงลักษณะของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากแป้งถั่วเขียวที่เตรียมได้ โดยผลการศึกษาสี ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์ม และผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากแป้งถั่วเขียวร่วมกับกะหล่ำปลีม่วงในรูปแบบผงและสารสกัดน้ำ แสดงดังตารางที่ 5 ลักษณะสีของแผ่นฟิล์มในตาราง พบว่าสูตรควบคุมหรือสูตรแป้งถั่วเขียวมีลักษณะใส ไม่มีสี ขณะที่สูตรที่เติมผงกะหล่ำปลีม่วงให้สีชา และสูตรที่เติมสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงให้สีเข้มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุธรรมชาติในกะหล่ำปลีม่วงสามารถกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างฟิล์ม ส่งผลให้สีของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณและรูปแบบของอินดิเคเตอร์ที่เติมลงไป โดยสูตรที่เติมสารสกัดน้ำมีความเข้มสีมากกว่าสูตรผง เนื่องจากสารสีสามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลายและแทรกอยู่ในโครงสร้างฟิล์มได้สม่ำเสมอมากกว่า

ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์มพบว่าแผ่นฟิล์มทุกสูตรสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี โดยดึงแผ่นฟิล์มออกจากแม่พิมพ์อะคริลิกได้ง่าย ไม่เกิดการฉีกขาดหรือการยึดติดกับพื้นผิวแม่พิมพ์ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของแป้งถั่วเขียวและกลีเซอรอลมีความเหมาะสมต่อการสร้างโครงสร้างฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นและคงรูปได้ดี ในด้านผิวสัมผัส พบว่าแผ่นฟิล์มมีผิวสัมผัสเรียบ ไม่เหนียว และมีลักษณะสม่ำเสมอ สะท้อนให้เห็นว่าการเติมกะหล่ำปลีม่วงทั้งในรูปแบบผงและสารสกัด

น้ำไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพพื้นผิวของฟิล์มอย่างชัดเจน ทั้งนี้กลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์อาจช่วยลดความเปราะของฟิล์ม และทำให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น



ภาพที่ 6 แผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วง

ตารางที่ 5 สี ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นและผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์

สูตรฟิล์มแข็ง	ผงกะหล่ำปลีม่วง (g)	น้ำกะหล่ำปลีม่วง (ml)	น้ำ (ml)	สีของแผ่นฟิล์ม	ความสามารถในการดึงออกเป็นแผ่นฟิล์ม	ผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์ม
แป้งข้าวเขียว (10 g) กลีเซอรอล (5 ml)	0	0	195	 ใส ไม่มีสี	+++	+++
	2	0	195	 ใส สีขา	+++	+++
	0	195	0	 ใส สีขาเข้ม	+++	+++

ผลการทดสอบความสามารถในการดูดน้ำและการละลายน้ำของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์แสดงดังตารางที่ 6 พบว่าแผ่นฟิล์มที่เติมอินดิเคเตอร์ในรูปสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงมีแนวโน้มดูดน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมหรือสูตรฟิล์มแป้งข้าวเขียว ขณะที่การเติมอินดิเคเตอร์ในรูปผงกะหล่ำปลีม่วงทำให้อัตราการดูดน้ำลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของเส้นใยและอนุภาคของผงกะหล่ำปลีที่ช่วยลดการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างฟิล์มได้บางส่วน นอกจากนี้พบว่าอัตราการละลายน้ำของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมกะหล่ำปลีม่วงทั้งในรูปสารสกัดน้ำและรูปผง ซึ่งอาจเกิดจากสารประกอบที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic compounds) เช่น แอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในกะหล่ำปลีม่วง ส่งผลให้โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างฟิล์มได้ง่ายขึ้น และทำให้แผ่นฟิล์มเกิดการละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม

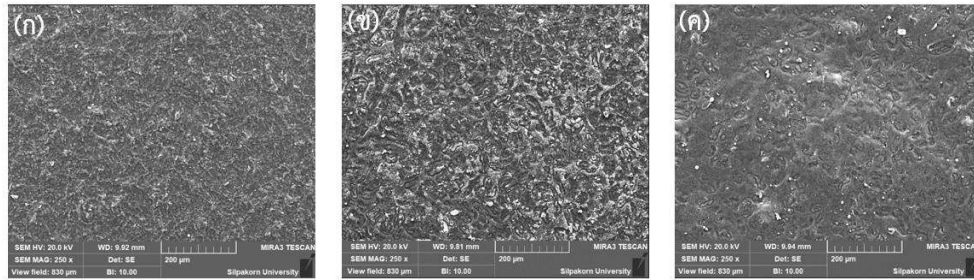
ตารางที่ 6 ความหนา อัตราการดูดน้ำ อัตราการละลายน้ำ สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์

สูตรฟิล์ม แป้ง	ผง กะหล่ำ ปลีม่วง (g)	น้ำ กะหล่ำ ปลีม่วง (ml)	น้ำ (ml)	ความหนา แผ่นฟิล์ม (mm)	อัตราการดูด น้ำ (%)	อัตราการ ละลายน้ำ (%)	ความ ต้านทาน แรงดึง (MPa)	ระยะยืดตัว ณ จุดขาด (%)
แป้ง ถั่วเขียว (10 g) กลี	0	0	195	0.22±0.01	32.58±2.76	34.8±2.28	6.78±0.08	23.64±3.43
	2	0	195	0.23±0.01	28.73±0.52	41.47±2.25	4.53±0.27	13.61±3.60
เชอร์อล (5 ml)	0	195	0	0.24±0.01	39.57±0.74	45.05±1.67	3.76±0.11	12.50±1.34

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์ ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) แสดงดังตารางที่ 6 พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 6.78±0.08 MPa และมีค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 23.64±3.43% แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดี เนื่องจากโครงสร้างพอลิเมอร์ของแป้งสามารถจัดเรียงตัวและยึดเหนี่ยวกันได้อย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับภาพถ่าย SEM แสดงดังภาพที่ 7(ก) จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มแป้งถั่วเขียวสูตรควบคุม พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ โครงสร้างมีความต่อเนื่อง ไม่มีรูพรุนหรือรอยแตกขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งที่แน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ดี

เมื่อเติมกะหล่ำปลีม่วงในรูปแบบผง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเหลือ 4.53±0.27 MPa และค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเหลือ 13.61±3.60% แสดงให้เห็นว่าการเติมผงกะหล่ำปลีม่วงส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นลดลง อาจเนื่องจากอนุภาคของผงกะหล่ำปลีม่วงกระจายตัวไม่สม่ำเสมอภายในโครงสร้างฟิล์ม ทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างฟิล์มแป้ง ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และทำให้ฟิล์มแตกขาดได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงดึงดังเห็นได้จากภาพถ่าย SEM ในภาพที่ 7(ข) ซึ่งพบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะหยาบมากขึ้น และมีอนุภาคหรือเส้นใยกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างฟิล์ม ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของผงกะหล่ำปลีม่วง

ในกรณีของการเติมสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงลงในฟิล์มแป้งถั่วเขียว พบว่าฟิล์มลักษณะพื้นผิวมีความค่อนข้างเรียบกว่าและเห็นโครงสร้างที่ต่อเนื่องมากกว่าฟิล์มที่เติมผงกะหล่ำปลีม่วง แม้จะมีร่องหรือบริเวณไม่สม่ำเสมอบางส่วน แต่ไม่พบอนุภาคหยาบจำนวนมาก ดังแสดงในภาพถ่าย SEM ภาพที่ 7(ค) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งถั่วเขียว ในภาพที่ 7(ก) พบว่า มีบริเวณที่คล้ายช่องว่างภายในโครงสร้าง ซึ่งบ่งชี้ว่าสารสกัดน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งและกลีเชอร์อล ทำให้โครงสร้างฟิล์มมีความหลวมและความต่อเนื่องลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงลดลงมีค่าเท่ากับ 3.76±0.11 MPa และมีค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 12.50±1.34% แสดงให้เห็นว่าสารสกัดน้ำส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มมากกว่าการเติมในรูปแบบผง อาจเนื่องจากสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น แอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิก เข้าไปรบกวนการเกิดพันธะระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งและกลีเชอร์อล ทำให้โครงสร้างฟิล์มมีความหลวมและความต่อเนื่องลดลง ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเปราะและทนต่อแรงดึงได้น้อยลง



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (ก) फिल्मแบ่งถั่วเขียวสูตรควบคุม (ข) फिल्मแบ่งถั่วเขียวที่เติมผงกะหล่ำปลีม่วง และ (ค) फिल्मแบ่งถั่วเขียวที่เติมสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วง



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากกะหล่ำปลีม่วงรูปแบบผงและสารสกัดน้ำที่ pH ต่าง ๆ

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์สีในระบบ CIELAB (L^* , a^* , b^*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของฟิล์มอินดิเคเตอร์จากผงและสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงที่ค่า pH ต่าง ๆ

	ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากผงกะหล่ำปลีม่วง				ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วง			
pH	L^*	a^*	b^*	ΔE	L^*	a^*	b^*	ΔE
เริ่มต้น	71.9	-5.3	12.3	0	71	-1.1	10.2	0
1	68.5	-0.7	14.7	6.2	55.4	18.6	32.1	33.3
2	64.4	-3.2	17.9	9.6	61.2	9.4	18.5	16.6
3	64.2	-1.4	18.7	10.7	61.6	10.9	10.1	15.3
4	65	-2.7	15.3	7.9	62	8.6	10.4	13.3
5	70.5	-2.8	0.7	11.9	60.5	4.6	7.7	12.2
6	70.7	-3.5	-1.3	13.8	71	-2.5	-1.8	12.1
7	72.1	-3.2	-1.6	14	66.9	-1.7	-0.9	11.9
8	66.4	-4.1	3.7	10.2	68.7	-1.7	-5.2	15.6
9	70	-2.7	-4.4	17	67	-1.4	-3.7	14.4
10	64.5	-3.8	3.2	11.8	58.2	1.7	-0.1	16.6
11	67.4	-3.5	-3	16	59.4	-5.1	-4.6	19.2
12	67.4	-3.8	-4.4	17.3	66.7	-4.8	-5.8	17
13	57.2	-1.4	21	17.5	60.6	-3.9	-3.4	17.4
14	47.4	2.9	34.2	33.9	63.6	-3.3	-5.5	17.5

ความสามารถในการเป็นฟิล์มอินดิเคเตอร์จากผงกะหล่ำปลีม่วงและสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงแสดงดังภาพที่ 8 พบว่า ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างชัดเจนและต่อเนื่องในช่วง pH 1–14 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มอินดิเคเตอร์จากผงกะหล่ำปลีม่วง โดยฟิล์มจากสารสกัดน้ำแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีชมพูอ่อนในสภาวะกรด เปลี่ยนเป็นสีชมพูอมม่วง สีเทา สีน้ำเงิน สีเขียว และสีเหลืองในสภาวะต่าง ขณะที่ฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงมีการเปลี่ยนแปลงของสีค่อนข้างน้อยในช่วงกรดถึงเป็นกลาง และเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเหลืองอย่างเด่นชัดในช่วง pH 12–14 ผลจากการสังเกตด้วยตาเปล่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELAB (L^* , a^* , b^*) ดังแสดงในตารางที่ 7 ค่า L^* สะท้อนความสว่างของฟิล์ม ส่วนค่า a^* และ b^* แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีในแกนสีแดง–เขียว และสีเหลือง–น้ำเงิน ตามลำดับโดยพบว่าฟิล์มจากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงมีการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* , a^* และ b^* อย่างต่อเนื่องตลอดช่วง pH ส่งผลให้ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) มีแนวโน้มสูงกว่าฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วง ในหลายช่วงของค่า pH โดยเฉพาะ pH 1–5 แสดงถึงความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH และสามารถจำแนกความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจน ขณะที่ฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงมีการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* , a^* และ b^* ค่อนข้างน้อยในช่วง pH ต่ำ ส่งผลให้ค่า ΔE มีค่าต่ำ และเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเฉพาะในช่วง pH 12–14 ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า

การเปลี่ยนแปลงสีของกะหล่ำปลีม่วงที่ pH ต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งเป็นรงควัตถุธรรมชาติหลักในกะหล่ำปลีม่วง มีโครงสร้างทางเคมีที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดเบสโดยในสภาวะกรด แอนโทไซยานินจะอยู่ในรูป ฟลาวิลเลียมแคทไอออน (flavylium cation) ซึ่งให้สีแดงหรือสีชมพู เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น ควิโนนเบส (quinoidal base) และโครงสร้างอนุพันธ์อื่น ส่งผลให้สีเปลี่ยนเป็นสีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว และสีเหลืองตามลำดับ [11]

จากการทดลองพบว่าฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยครอบคลุมช่วง pH 1–14 และสังเกตได้ง่ายกว่าฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วง เนื่องจากแอนโทไซยานินสามารถละลายและกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอภายในโครงสร้างของฟิล์ม ทำให้สัมผัสกับสารละลายได้ทั่วถึงและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างรวดเร็ว ขณะที่ฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงมีการกระจายตัวของสารสีไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งมีองค์ประกอบของเนื้อเยื่อพืชปะปนอยู่ จึงลดประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่า L^* , a^* , b^* และค่า ΔE เกิดขึ้นชัดเจนในช่วง pH 12–14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงของค่า CIELAB สอดคล้องกับการสังเกตสีของฟิล์มในทุกช่วง pH จึงยืนยันว่าฟิล์มจากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH สูงกว่าฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วง

4. สรุปผลการทดลอง

ฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวที่เติมกลีเซอรอล 5 มิลลิลิตร เป็นสูตรที่มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลเหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ โดยมีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีความเหนียวที่พื้นผิว มีความหนาเฉลี่ย 0.22 ± 0.01 มิลลิเมตร และมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 6.78 ± 0.08 MPa ภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีพื้นผิวเรียบ สม่ำเสมอ และมีโครงสร้างต่อเนื่องเมื่อพัฒนาเป็นฟิล์มอินดิเคเตอร์โดยเติมกะหล่ำปลีม่วงทั้งในรูปผงและสารสกัดน้ำ พบว่าการเติมสารสกัดน้ำทำให้โครงสร้างฟิล์มมีร่องและช่องว่างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าระยะยืดตัวลดลง แต่สารแอนโทไซยานินสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอภายในฟิล์ม จึงทำให้ฟิล์มตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH 1–14 ได้อย่างชัดเจน ขณะที่ฟิล์มที่เติมผงกะหล่ำปลีม่วงมีพื้นผิวหยาบและพบการกระจายตัวของอนุภาคและเส้นใยพืชไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสีต่ำกว่าฟิล์มจากสารสกัดน้ำโดยการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในช่วง pH 12–14 แม้ว่าฟิล์มจากผงกะหล่ำปลีม่วงจะมีอัตราการดูดน้ำและการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มจากสารสกัดน้ำเล็กน้อย แต่ฟิล์มจากสารสกัดน้ำกะหล่ำปลีม่วงมีศักยภาพสูงกว่าในการประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มอินดิเคเตอร์หรือบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะเนื่องจากสามารถแสดงการ



เปลี่ยนแปลงของสีได้อย่างชัดเจน ครอบคลุมช่วง pH 1–14 และเป็นวัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ อันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401.
- [2] Realini, C. E., & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98(3), 404–419.
- [3] Zheng, L., Liu, L., Yu, J., & Shao, P. (2022). Novel trends and applications of natural pH-responsive indicator film in food packaging for improved quality monitoring. *Food Control*, 134, 108769.
- [4] Cheng, M., Yan, X., Cui, Y., Han, M., Wang, X., Wang, J., & Zhang, R. (2022). An eco-friendly film of pH-responsive indicators for smart packaging. *Journal of Food Engineering*, 321, 110943.
- [5] Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications. *Materials*, 15(17), 5899.
- [6] Boccalon, E., Viscusi, G., Lamberti, E., Fancello, F., Zara, S., Sassi, P., Marinozzi, M., Nocchetti, M., & Gorrasi, G. (2022). Composite films containing red onion skin extract as intelligent pH indicators for food packaging. *Applied Surface Science*, 593, 153319.
- [7] Wiczowski, W., Szawara-Nowak, D., & Topolska, J. (2013). Red cabbage anthocyanins: Profile, isolation, identification, and antioxidant activity. *Food Research International*, 51(1), 303–309.
- [8] Wu, H., Jiao, C., Li, S., Li, Q., Zhang, Z., Zhou, M., & Yuan, X. (2022). A facile strategy for development of pH-sensing indicator films based on red cabbage puree and polyvinyl alcohol for monitoring fish freshness. *Foods*, 11(21), 3371.
- [9] Theamdee, P., & Klinson, C. (2026). Development of pH-sensitive intelligent indicator film based on cassava flour/polyvinyl alcohol incorporated with turmeric powder for pork freshness monitoring. *Trends in Sciences*, 23(3), 11783.
- [10] Kaewprachu, P., Romruen, O., Jaisan, C., Rawdkuen, S., & Klunklin, W. (2024). Smart colorimetric sensing films based on carboxymethyl cellulose incorporated with a natural pH indicator. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129156.
- [11] Mahatmanti, F. W., Alaudhin, M., & Kusumaningrum, S. B. C. (2024). Smart and green packaging made from chitosan-based biofilm with the addition of ginger oil and anthocyanins from butterfly pea flower extract (*Clitoria ternatea* L.). *Journal of Scientific and Applied Chemistry*, 27(2), 53–63.