

ความคงตัวของไฟโคไซยานินในตำรับเจล

Stability of Phycocyanin in Gel-based Formulation

ภัทรเดช วงษ์คำณู

อีเมล: 6651701276@lamduan.mfu.ac.th

หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรिता สังข์ทอง

อีเมล: Sarita.san@mfu.ac.th

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกตำรับพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับไฟโคไซยานิน และศึกษาความคงตัวของไฟโคไซยานินในตำรับเจลที่พัฒนาร่วมกับซิงค์พีซีเอ (Zinc PCA) ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน งานวิจัยเริ่มจากการเปรียบเทียบตำรับเจลไฟโคไซยานิน (PC-GEL) และตำรับอิมัลชันไฟโคไซยานิน (PC-EMULSION) โดยประเมินคุณลักษณะทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความหนืด ค่าสี ความเป็นเนื้อเดียวกัน และประเมินความคงตัวของตำรับด้วยวิธีปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) จากนั้นนำตำรับที่ผ่านการคัดเลือกไปพัฒนาร่วมกับ Zinc PCA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5% w/w และทดสอบความคงตัวภายใต้ 6 สภาวะ ได้แก่ สภาวะร้อนสลับเย็น (Heating-Cooling cycle), 45°C, 4°C, 25°C, สภาวะมีแสง และสภาวะไม่มีแสง เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยใช้ pH ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความหนืด (% Δ Visc) ค่าความแตกต่างของสี (Δ E) และร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (% Δ Abs) เป็นตัวชี้วัดหลัก และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ผลการคัดเลือกตำรับตั้งต้นพบว่า PC-GEL มีความเหมาะสมมากกว่า PC-EMULSION เนื่องจากผ่านเกณฑ์ครบทุกด้าน โดยมีค่า pH เฉลี่ย 6.49 $\pm$ 0.01 ความหนืดเฉลี่ย 18,026.67 $\pm$ 80.83 cP ค่า Δ E เท่ากับ 1.20 และไม่พบการแยกชั้นหลังการทดสอบ centrifugation ขณะที่ PC-EMULSION มีค่า Δ E เท่ากับ 39.95 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ด้านสี จึงเลือกใช้ PC-GEL เป็นสูตรพื้นฐานและนำมาผสมกับ Zinc PCA เพื่อทดสอบความคงตัว ผลการทดสอบความคงตัวพบว่า ทุกตำรับผ่านเกณฑ์ในสภาวะ 4°C และสภาวะไม่มีแสง แต่ไม่ผ่านในสภาวะ Heating-Cooling cycle, 45°C, 25°C และสภาวะมีแสง โดย 4°C เป็นสภาวะที่ช่วยรักษาสี ความหนืด และค่าการดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด ภาพรวมของผลการทดลองแสดงว่าสภาวะ

การเก็บรักษามีอิทธิพลต่อความคงตัวของตำรับมากกว่าระดับ Zinc PCA ในช่วงที่ศึกษาการนำตำรับไปประยุกต์ใช้จริง ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากตำรับไม่คงตัวที่ 25°C และสภาวะมีแสง จึงควรควบคุมการเก็บรักษา หลีกเลี่ยงแสงและความร้อน และพิจารณาบรรจุภัณฑ์ป้องกันแสงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบต่อไป

คำสำคัญ: ไฟโคไซยานิน, ตำรับเจล, ซิงค์, ความคงตัว, ความแตกต่างของสี, ค่าการดูดกลืนแสง

Abstract

This study aimed to select a suitable base formulation for phycocyanin and to evaluate the stability of phycocyanin in a gel formulation containing Zinc PCA. Phycocyanin gel formulation (PC-GEL) and phycocyanin emulsion formulation (PC-EMULSION) were compared based on pH, viscosity, color characteristics, homogeneity, and stability after centrifugation. The selected formulation was developed with Zinc PCA at 0.1, 0.5, 1.0, and 1.5% w/w and tested under six storage conditions: heating-cooling cycle, 45°C, 4°C, 25°C, light exposure, and dark storage for four weeks. The stability indicators were pH, percentage change in viscosity (% Δ Visc), color difference (Δ E), and percentage change in absorbance (% Δ Abs). One-way ANOVA was applied at a statistical significance level of 0.05. The results showed that PC-GEL was more suitable than PC-EMULSION because it passed all criteria, with a mean pH of 6.49 ± 0.01 , viscosity of $18,026.67 \pm 80.83$ cP, Δ E of 1.20, and no phase separation after centrifugation. PC-EMULSION showed a high Δ E value of 39.95 and failed the color criterion. PC-GEL was therefore selected as the base formulation and mixed with Zinc PCA for stability testing. In the stability study, all Zinc PCA gel formulations passed under 4°C and dark storage but failed under heating-cooling cycle, 45°C, 25°C, and light exposure. The 4°C condition best preserved color, viscosity, and absorbance, whereas heat, repeated temperature changes, and light markedly increased Δ E and reduced % Δ Abs. Overall, storage conditions had a greater influence on stability than Zinc PCA concentration within the studied range. However, practical application of the formulation is limited by its instability at 25°C and under light exposure; therefore, temperature control, light protection, and protective packaging should be considered for further prototype development.

Keywords: Phycocyanin, Zinc, Gel formulation, Stability, Color difference, Absorbance

บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางให้ความสำคัญกับวัตถุดิบจากธรรมชาติมากขึ้น โดยเฉพาะสารให้สีจากธรรมชาติที่สามารถใช้ทดแทนสีสังเคราะห์ได้ เพราะสีเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อการรับรู้คุณภาพ เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ และความน่าสนใจของผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหลายกลุ่ม เช่น เซรั่ม เจล ครีม โลชั่น มาส์ก และผลิตภัณฑ์แต่งสี ล้วนใช้เม็ดสีหรือสารให้สีเพื่อสร้างลักษณะภายนอกที่สอดคล้องกับภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามสารสีจากธรรมชาติหลายชนิดยังมีข้อจำกัดด้านความคงตัวของสี โดยเฉพาะความไวต่อแสง อุณหภูมิ และสภาวะกรด-ด่างของตำรับ ซึ่งอาจทำให้สีเปลี่ยนแปลงหรือทำให้สารสำคัญเสื่อมลงระหว่างการเก็บรักษา

ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) เป็นสารสีฟ้าธรรมชาติในกลุ่ม phycobiliprotein ที่พบในสาหร่ายสไปรูลินา มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ให้สีฟ้าหรือสีน้ำเงินเข้ม และมีรายงานเกี่ยวกับฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและด้านการอักเสบ จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ในอาหาร ผลิตภัณฑ์สุขภาพ และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์กลุ่มเจลหรือเซรั่มที่มีองค์ประกอบของน้ำเป็นหลัก (Adjali et al., 2022; Chaiklahan et al., 2012; Romay et al., 2003) อย่างไรก็ตาม ไฟโคไซยานินเป็นสารสีธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นโปรตีน จึงไวต่อปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ แสง และ pH ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีและค่าการดูดกลืนแสงของสาร จากข้อมูลวิจัยที่เกี่ยวข้องรายงานว่าไฟโคไซยานินมีแนวโน้มคงตัวได้ดีในช่วง pH ใกล้เคียง 5.5-6.0 และอุณหภูมิต่ำ ช่วยลดอัตราการเสื่อมได้ดีกว่าอุณหภูมิสูง (Antelo et al., 2008; Chaiklahan et al., 2012; Sungthongjeen et al., 2023; Yuan et al., 2022)

เมื่อนำไฟโคไซยานินมาเป็นส่วนผสมในระบบตำรับเครื่องสำอาง การประเมินความคงตัวจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของสารเดี่ยวเพียงอย่างเดียว แต่ควรประเมินความสามารถในการคงอยู่ของสี ค่าการดูดกลืนแสง และลักษณะความคงตัวทางกายภาพในระบบตำรับจริง ตำรับเจลและตำรับอิมัลชันมีลักษณะทางกายภาพต่างกัน โดยระบบเจลมีความใสมากกว่า และมีแนวโน้มแสดงสีของไฟโคไซยานินได้ชัดเจน ขณะที่ระบบอิมัลชันมีความทึบและอาจทำให้สีที่เห็นเบี่ยงเบนจากสีอ้างอิง (Hu et al., 2017; Linke & Drusch, 2016)

Zinc PCA เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลผิว โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์สำหรับผิวมันหรือผิวที่มีแนวโน้มเกิดสิว เนื่องจากมีบทบาทในการดูแลสมดุลผิวและมักใช้ในตำรับเครื่องสำอางกลุ่มดูแลผิว (Cosmacon, 2026) ในบริบทของงานตำรับ Zinc PCA อาจเกี่ยวข้องกับสภาวะไอออนิกของระบบเจลที่ใช้ Carbopol และค่าความเป็นกรด-ด่างของตำรับ ซึ่งอาจส่งผลต่อความหนืด การกระจายตัวของส่วนผสม และความคงตัวของไฟโคไซยานินที่มีโครงสร้างเป็นโปรตีน การแปรผันระดับ Zinc PCA

ที่ 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5% w/w จึงใช้เพื่อประเมินแนวโน้มของระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ต่อ pH ความหนืด สี และค่าการดูดกลืนแสงของตำรับ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งคัดเลือกตำรับพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับไฟโคไซยานิน และศึกษาความคงตัวของไฟโคไซยานินในตำรับเจลที่พัฒนาร่วมกับ Zinc PCA โดยประเมินภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกันด้วยตัวชี้วัด pH, % Δ Visc, Δ E และ % Δ Abs เพื่อให้ได้ข้อมูลสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่ใช้สารสีธรรมชาติอย่างเป็นระบบ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตำรับและการคัดเลือกสูตรตั้งต้น

การวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไฟโคไซยานินเป็นสารให้สีธรรมชาติ และเป็นตัวชี้วัดความคงตัวด้านสีและค่าการดูดกลืนแสง ขั้นตอนแรกเตรียมตำรับพื้นฐาน 2 รูปแบบ ได้แก่ ตำรับเจลไฟโคไซยานิน (PC-GEL) และตำรับอิมัลชันไฟโคไซยานิน (PC-EMULSION) จากนั้นประเมิน pH ความหนืด ค่าสีในระบบ CIE L*a*b* ค่า Δ E และความเป็นเนื้อเดียวกันของตำรับ โดยเกณฑ์คัดเลือกตำรับตั้งต้นประกอบด้วยค่า pH อยู่ในช่วง 5.5-6.5 ความหนืดอยู่ในช่วง 5,000-20,000 cP ค่า Δ E $\leq$ 2 เมื่อเทียบกับค่าสีอ้างอิงของไฟโคไซยานิน ($L^* = 40$, $a^* = -3$, $b^* = -8$) และไม่พบการแยกชั้นหลัง centrifugation ที่ 5,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 1 สูตรผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางแบบเจลที่ใช้เป็นตำรับพื้นฐาน

ส่วนผสม	หน้าที่	% w/w
DI-Water	ตัวทำละลายหลัก / ช่วยทำละลายไฟโคไซยานิน	88.40
Panthenol	Humectant / Skin conditioning agent	2.00
Glycerin	Humectant	3.00
Carbopol Ultrez 21	Thickener / Gelling agent	0.20
Triethanolamine	pH adjuster / Neutralizer	0.20
Phenoxyethanol	Preservative	1.00
Vitamin E Acetate	Antioxidant / Skin conditioning agent	0.10
DI-Water	Solvent	5.00
Phycocyanin	Natural colorant / Target compound	0.10
รวม		100.00

หมายเหตุ ตำรับนี้เป็นตำรับเจลพื้นฐานสำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงของสี ค่า Δ E และค่าการดูดกลืนแสงของไฟโคไซยานิน

2. การพัฒนาตำรับเจลร่วมกับ Zinc PCA และการทดสอบความคงตัว

นำ PC-GEL ซึ่งเป็นตำรับที่ผ่านการคัดเลือกมาพัฒนาพร้อมกับ Zinc PCA ที่ระดับ 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5% w/w โดยใช้รหัสตำรับ PC_Zinc_GEL_0.1, PC_Zinc_GEL_0.5, PC_Zinc_GEL_1.0 และ PC_Zinc_GEL_1.5 ตามลำดับ จากนั้นนำไปทดสอบความคงตัวภายใต้ 6 สภาวะ ได้แก่ Heating-Cooling cycle, 45°C, 4°C, 25°C, สภาวะมีแสง และสภาวะไม่มีแสง เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยการประเมินใช้ตัวชี้วัด pH, % Δ Visc, Δ E และ % Δ Abs เป็นหลัก โดยวัดซ้ำ 3 ครั้ง ต่อสูตรต่อสภาวะ (n = 3) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2 สภาวะการทดสอบความคงตัวของตำรับเจลที่มีไฟโคไซยานินและ Zinc PCA

สภาวะทดสอบ	วิธีดำเนินการ	ระยะเวลา / จุดประเมิน	ตัวชี้วัดหลัก
Heating-Cooling cycle	เก็บที่ 45°C 24 ชั่วโมง และ 4°C 24 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบ ทำทั้งหมด 4 รอบ	หลังสิ้นสุดรอบที่ 4	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs
45°C	เก็บที่ 45 $\pm$ 2°C	4 สัปดาห์	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs
4°C	เก็บที่ 4 $\pm$ 2°C	4 สัปดาห์	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs
25°C	เก็บที่ 25°C	4 สัปดาห์	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs
มีแสง	เก็บภายใต้แสง LED	4 สัปดาห์	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs
ไม่มีแสง	เก็บในภาชนะทึบแสง หรือสภาวะที่ป้องกันแสง	4 สัปดาห์	pH, % Δ Visc, Δ E, % Δ Abs

หมายเหตุ การวัด pH ใช้ pH meter, ความหนืดวัดด้วย Brookfield Viscometer ที่ 10 rpm และ 25 $\pm$ 2°C, ค่าสีวัดด้วย Colorimeter ในระบบ CIE L*a*b*, ความเป็นเนื้อเดียวกันทดสอบด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที และค่าการดูดกลืนแสงวัดด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

3. การประเมินผลและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลองแต่ละตำรับถูกบันทึกจากการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ($n = 3$) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\text{mean} \pm \text{SD}$) จากนั้นพิจารณาแนวโน้มของค่า pH, $\% \Delta \text{Visc}$, ΔE และ $\% \Delta \text{Abs}$ ร่วมกับเกณฑ์ผ่าน/ไม่ผ่านที่กำหนด โดยคำนวณตามสมการ $\% \Delta \text{Visc} = [(\text{Visc}_t - \text{Visc}_0) / \text{Visc}_0] \times 100$; $\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5}$; และ $\% \Delta \text{Abs} = [(\text{Abs}_t - \text{Abs}_0) / \text{Abs}_0] \times 100$ สำหรับการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตำรับใช้ One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ โดยการวิเคราะห์นี้ใช้เพื่อประเมินความแตกต่างโดยรวมระหว่างตำรับภายใต้สภาวะการเก็บรักษาเดียวกัน

ทั้งนี้ การจัดลำดับตำรับในบทความนี้เป็นการจัดลำดับเชิงพรรณนาจากแนวโน้มของค่า ΔE และ $\% \Delta \text{Visc}$ เท่านั้น ไม่ได้ใช้เพื่อยืนยันความแตกต่างรายคู่ระหว่างตำรับ เนื่องจากไม่ได้วิเคราะห์ post-hoc หรือ pairwise compariso

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการคัดเลือกสูตรตั้งต้น

ผลการเปรียบเทียบตำรับพื้นฐาน พบว่า PC-GEL มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตำรับตั้งต้นมากกว่า PC-EMULSION เนื่องจากผ่านเกณฑ์ครบทุกด้าน โดยเฉพาะค่า ΔE ของ PC-GEL เท่ากับ 1.20 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ $\Delta E \leq 2$ และสะท้อนว่าสีของตำรับใกล้เคียงกับสีอ้างอิงของไฟโคไซยานิน ขณะที่ PC-EMULSION มีค่า ΔE สูงถึง 39.95 แม้ pH ความหนืด และการทดสอบ centrifugation อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่สีของตำรับเบี่ยงเบนจากสีอ้างอิงอย่างชัดเจน การคัดเลือก PC-GEL จึงพิจารณาจากเกณฑ์รวมหลายด้าน ได้แก่ pH ความหนืด สี และความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่ใช้การพิจารณาค่าสีเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ลักษณะทึบของอิมัลชันอาจทำให้การแสดงสีของไฟโคไซยานินเบี่ยงเบนจากสีอ้างอิง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการด้านการกระเจิงแสงและความขุ่นของระบบอิมัลชัน (Hu et al., 2017; Linke & Drusch, 2016)

ตารางที่ 3 สรุปผลการทดสอบสูตรเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกสูตรตั้งต้น

สูตร	pH	Viscosity	ΔE	Centrifugation	สรุปผล
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD (cP)			
PC-GEL	6.49 $\pm$ 0.01	18,026.67 $\pm$ 80.83	1.20	ไม่แยกชั้น	ผ่าน

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สูตร	pH	Viscosity	ΔE	Centrifugation	สรุปผล
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD (cP)			
PC-EMULSION	6.47 $\pm$ 0.02	16,860.00 $\pm$ 140.00	39.95	ไม่แยกชั้น	ไม่ผ่านด้านสี

หมายเหตุ ค่า ΔE คำนวณเทียบกับค่าสีอ้างอิงของไฟโคไซยานิน โดยกำหนดเกณฑ์ผ่านด้านสีที่ $\Delta E \leq 2$

2. ผลการทดสอบความคงตัวของตำรับเจลที่มี Zinc PCA

เมื่อนำ PC-GEL ไปพัฒนาร่วมกับ Zinc PCA ทั้ง 4 ระดับ และทดสอบความคงตัวภายใต้ 6 สภาวะ พบว่าตำรับทุกระดับความเข้มข้นมีรูปแบบการผ่านและไม่ผ่านใกล้เคียงกัน กล่าวคือทุกตำรับผ่านเกณฑ์ในสภาวะ 4°C และสภาวะไม่มีแสง แต่ไม่ผ่านในสภาวะ Heating-Cooling cycle, 45°C, 25°C และสภาวะมีแสง ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าสภาวะการเก็บรักษาเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมความคงตัวของตำรับมากกว่าระดับ Zinc PCA ในช่วง 0.1-1.5% w/w

ตารางที่ 4 ค่าตัวชี้วัดสำคัญ ณ จุดสิ้นสุดการทดสอบแยกตามสภาวะและระดับ Zinc PCA

สภาวะ	Zinc PCA	ผล	pH	% Δ Visc	ΔE	% Δ Abs
			mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD
HC	0.1%	ไม่ผ่าน	6.400 $\pm$ 0.010	-21.331 $\pm$ 0.883	16.746 $\pm$ 0.001	-78.339 $\pm$ 0.000
			6.370 $\pm$ 0.010	-30.171 $\pm$ 0.355	16.000 $\pm$ 0.097	-73.103 $\pm$ 0.000
	1.0%	ไม่ผ่าน	6.410 $\pm$ 0.010	-28.628 $\pm$ 0.381	13.489 $\pm$ 0.006	-80.030 $\pm$ 0.000
			6.400 $\pm$ 0.010	-29.414 $\pm$ 1.476	18.834 $\pm$ 0.035	-85.155 $\pm$ 0.000
	1.5%	ไม่ผ่าน	6.380 $\pm$ 0.010	-50.597 $\pm$ 0.768	29.595 $\pm$ 0.034	-81.949 $\pm$ 0.000
			6.350 $\pm$ 0.010	-53.669 $\pm$ 0.768	26.935 $\pm$ 0.149	-94.358 $\pm$ 0.000
45°C	0.1%	ไม่ผ่าน	6.380 $\pm$ 0.010	-50.597 $\pm$ 0.768	29.595 $\pm$ 0.034	-81.949 $\pm$ 0.000
			6.350 $\pm$ 0.010	-53.669 $\pm$ 0.768	26.935 $\pm$ 0.149	-94.358 $\pm$ 0.000
	0.5%	ไม่ผ่าน	6.350 $\pm$ 0.010	-53.669 $\pm$ 0.768	26.935 $\pm$ 0.149	-94.358 $\pm$ 0.000
			6.350 $\pm$ 0.010	-53.669 $\pm$ 0.768	26.935 $\pm$ 0.149	-94.358 $\pm$ 0.000

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สภาวะ	Zinc	ผล	pH	% Δ Visc	Δ E	% Δ Abs
	PCA		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD
HC	1.0%	ไม่ผ่าน	6.400 $\pm$	-49.703 $\pm$	21.547 $\pm$	-80.480 $\pm$
			0.010	0.712	0.016	0.000
	1.5%	ไม่ผ่าน	6.390 $\pm$	-47.802 $\pm$	32.139 $\pm$	-87.629 $\pm$
			0.010	0.549	0.042	0.000
4°C	0.1%	ผ่าน	6.253 $\pm$	2.287 $\pm$	0.614 $\pm$	-0.866 $\pm$
			0.006	0.717	0.060	0.000
	0.5%	ผ่าน	6.300 $\pm$	2.884 $\pm$	0.618 $\pm$	-0.719 $\pm$
			0.000	0.717	0.075	0.000
	1.0%	ผ่าน	6.320 $\pm$	2.985 $\pm$	0.726 $\pm$	-1.652 $\pm$
			0.000	0.919	0.301	0.000
	1.5%	ผ่าน	6.483 $\pm$	3.736 $\pm$	0.839 $\pm$	-1.031 $\pm$
			0.029	0.714	0.660	0.000
25°C	0.1%	ไม่ผ่าน	6.420 $\pm$	-1.399 $\pm$	1.763 $\pm$	-11.372 $\pm$
			0.010	0.469	0.105	0.000
	0.5%	ไม่ผ่าน	6.380 $\pm$	-1.724 $\pm$	2.107 $\pm$	-33.004 $\pm$
			0.010	0.411	0.153	0.000
	1.0%	ไม่ผ่าน	6.430 $\pm$	-1.384 $\pm$	1.343 $\pm$	-26.577 $\pm$
			0.010	0.535	0.252	0.000
	1.5%	ไม่ผ่าน	6.420 $\pm$	-1.392 $\pm$	2.111 $\pm$	0.619 $\pm$
			0.010	0.496	0.752	0.000
Light	0.1%	ไม่ผ่าน	5.877 $\pm$	-1.399 $\pm$	14.022 $\pm$	-53.249 $\pm$
			0.025	0.469	0.163	0.000
	0.5%	ไม่ผ่าน	5.800 $\pm$	-1.297 $\pm$	13.923 $\pm$	-54.161 $\pm$
			0.020	0.469	0.090	0.000
	1.0%	ไม่ผ่าน	5.733 $\pm$	-1.246 $\pm$	4.519 $\pm$	-58.859 $\pm$
			0.015	0.771	0.875	0.000

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สภาวะ	Zinc	ผล	pH	% Δ Visc	Δ E	% Δ Abs
	PCA		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD
Light	1.5%	ไม่ผ่าน	5.700 $\pm$ 0.020	-0.879 $\pm$ 0.495	5.224 $\pm$ 0.378	-38.763 $\pm$ 0.000
Dark	0.1%	ผ่าน	6.430 $\pm$ 0.010	-1.297 $\pm$ 0.469	0.352 $\pm$ 0.044	-7.906 $\pm$ 0.000
	0.5%	ผ่าน	6.400 $\pm$ 0.010	-0.870 $\pm$ 0.447	0.390 $\pm$ 0.119	-5.360 $\pm$ 0.000
	1.0%	ผ่าน	6.450 $\pm$ 0.010	-1.127 $\pm$ 0.652	0.482 $\pm$ 0.068	-8.559 $\pm$ 0.000
	1.5%	ผ่าน	6.440 $\pm$ 0.010	0.971 $\pm$ 0.632	0.729 $\pm$ 0.460	-7.216 $\pm$ 0.000
	1.5%	ไม่ผ่าน	5.700 $\pm$ 0.020	-0.879 $\pm$ 0.495	5.224 $\pm$ 0.378	-38.763 $\pm$ 0.000

หมายเหตุ HC = Heating-Cooling cycle; Light = สภาวะมีแสง; Dark = สภาวะไม่มีแสง; เกณฑ์ผ่าน/ไม่ผ่านพิจารณาจาก pH, % Δ Visc, Δ E และ % Δ Abs ร่วมกับเกณฑ์ที่กำหนด

จากตารางค่าตัวชี้วัดสำคัญ ณ จุดสิ้นสุดการทดสอบแยกตามสภาวะและระดับ Zinc PCA พบว่า HC และ 45°C เป็นสภาวะที่กระทบทั้งความหนืด สี และ % Δ Abs อย่างชัดเจน โดยเฉพาะ 45°C ที่ทำให้ % Δ Visc ลดลงมากในภาพรวม การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับผลของความร้อนต่อโครงสร้างโปรตีนของไฟโคไซยานินและโครงสร้างเจล ซึ่งทำให้สีและค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้าม สภาวะ 4°C ทำให้ค่า Δ E อยู่ในระดับต่ำและ % Δ Abs ลดลงน้อย จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเก็บรักษา สภาวะมีแสงทำให้ค่า Δ E และ % Δ Abs เปลี่ยนแปลงสูง แม้ความหนืดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงว่าแสงกระทบต่อไฟโคไซยานินโดยตรงมากกว่ากระทบโครงสร้างเจล ส่วนสภาวะไม่มีแสงช่วยให้ค่า Δ E อยู่ในระดับต่ำและทุกตัวรับผ่านเกณฑ์ บ่งชี้ถึงความสำคัญของการป้องกันแสงและการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม

3. การจัดลำดับเชิงพรรณนาและการตีความเชิงกลไก

เมื่อพิจารณาจำนวนสภาวะที่ผ่าน พบว่าทุกตัวรับผ่าน 2 จาก 6 สภาวะเท่ากัน จึงใช้ค่า Δ E เป็นข้อมูลหลักในการพิจารณาด้านสี และใช้ % Δ Visc เป็นข้อมูลประกอบในเชิงพรรณนาเท่านั้น

ผลการจัดลำดับแนวโน้มพบว่า PC_Zinc_GEL_1.0 มีค่า ΔE ที่ใช้จัดลำดับต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม การจัดลำดับนี้ไม่ควรตีความว่า PC_Zinc_GEL_1.0 ดีกว่าตำรับอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ post-hoc หรือ pairwise comparison เพื่อเปรียบเทียบรายคู่ระหว่างตำรับ

ตารางที่ 5 การจัดลำดับเชิงพรรณนาจากความเสถียรเชิงกายภาพโดยรวม

อันดับ	Zinc PCA	จำนวนสภาวะ ที่ผ่าน	ค่า ΔE ที่ใช้ จัดลำดับ	ค่า % Δ Visc ที่ใช้ ประกอบ
1	1.0%	2	21.547	49.703
2	0.5%	2	26.935	53.669
3	0.1%	2	29.595	50.597
4	1.5%	2	32.139	47.802

หมายเหตุ ตารางนี้เป็นการจัดลำดับเชิงพรรณนา ไม่ใช่ผลการเปรียบเทียบรายคู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ณ จุดสิ้นสุดการทดสอบแสดงในตารางที่ 6 พบว่า HC และ 45°C ทำให้ทุกตัวแปรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วน 4°C และ 25°C มีความแตกต่างเด่นที่ pH และ % Δ Abs ขณะที่สภาวะมีแสงส่งผลต่อ pH, ΔE และ % Δ Abs อย่างมีนัยสำคัญ และสภาวะไม่มีแสงทำให้ค่า ΔE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสนับสนุนว่าการป้องกันแสงช่วยลดความแตกต่างของการเปลี่ยนสีระหว่างตำรับได้ แม้ผล ANOVA ในหลายสภาวะแสดงความแตกต่างระหว่างตำรับบางตัวแปร แต่รูปแบบการผ่านและไม่ผ่านของทุกตำรับเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าในขอบเขตการทดลองนี้ สภาวะการเก็บรักษามีบทบาทต่อความคงตัวของตำรับมากกว่าระดับ Zinc PCA

ตารางที่ 6 สรุปผล ANOVA รายสภาวะ ณ จุดสิ้นสุดการทดสอบ

สภาวะ	pH	% Δ Visc	ΔE	% Δ Abs
	p-value	p-value	p-value	p-value
HC	0.006*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
45°C	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
4°C	<0.001*	0.228	0.856	<0.001*

ตารางที่ 6 (ต่อ)

สภาวะ	pH	% Δ Visc	Δ E	% Δ Abs
	p-value	p-value	p-value	p-value
25°C	0.001*	0.784	0.144	<0.001*
Light	<0.001*	0.704	<0.001*	<0.001*
Dark	0.002*	0.004*	0.292	<0.001*

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$; % Δ Abs รายงานเป็น p-value สำหรับการแปลผลเมื่อค่า F statistic ไม่ได้ระบุ

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า PC-GEL สามารถใช้เป็นตัวรับพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไฟโคไซยานินเป็นส่วนผสมในตัวรับ มากกว่า PC-EMULSION เนื่องจากให้สีใกล้เคียงกับสีอ้างอิงของไฟโคไซยานิน มีค่า pH และความหนืดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม และไม่พบการแยกชั้นหลังการทดสอบ centrifugation จึงเหมาะสำหรับนำไปพัฒนาร่วมกับ Zinc PCA เมื่อนำ PC-GEL ไปพัฒนาร่วมกับ Zinc PCA ที่ระดับ 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5% w/w พบว่าตัวรับทุกระดับมีรูปแบบการผ่านและไม่ผ่านใกล้เคียงกัน โดยผ่านในสภาวะ 4°C และสภาวะไม่มีแสง แต่ไม่ผ่านในสภาวะ Heating-Cooling cycle, 45°C, 25°C และสภาวะมีแสง ภาพรวมดังกล่าวสะท้อนว่าสภาวะการเก็บรักษา มีอิทธิพลต่อความคงตัวของไฟโคไซยานินในตัวรับมากกว่าระดับของ Zinc PCA ในช่วงที่ศึกษา

จุดเด่นของตัวรับคือสามารถแสดงสีของไฟโคไซยานินได้ชัดเจนในระบบเจล และมีความเหมาะสมสำหรับเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ใช้สารสีธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบข้อจำกัดสำคัญคือไม่คงตัวภายใต้ 25°C และสภาวะมีแสง ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาก่อนการนำไปใช้จริง การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีไฟโคไซยานินจึงควรเน้นการควบคุมสภาวะเก็บรักษา หลีกเลี่ยงความร้อนและแสง ใช้บรรจุภัณฑ์ป้องกันแสง และควรศึกษาความคงตัวระยะยาว การทดสอบ photostability เชิงควบคุม การทดสอบกับบรรจุภัณฑ์จริง การประเมิน in-use stability และการทดสอบคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสหรือการยอมรับของผู้ใช้ เพื่อยืนยันความเหมาะสมของตัวรับในระดับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

รายการอ้างอิง

- Adjali, A., Clarot, I., Chen, Z., Marchioni, E., & Boudier, A. (2022). Physicochemical degradation of phycocyanin and means to improve its stability: A short review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 12(3), 406-414.
<https://doi.org/10.1016/j.jpha.2021.12.005>
- Antelo, F. S., Costa, J. A. V., & Kalil, S. J. (2008). Thermal degradation kinetics of the phycocyanin from *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*, 41(1), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.03.012>
- BYK-Gardner. (n.d.). *Solid color difference equations*. Retrieved May 27, 2026, from <https://www.byk-instruments.com/support/knowledge/white-papers/color/difference-equations>
- Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., & Bunnag, B. (2012). Stability of phycocyanin extracted from *Spirulina* sp.: Influence of temperature, pH and preservatives. *Process Biochemistry*, 47(4), 659-664. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2012.01.010>
- Hu, Y. T., Ting, Y., Hu, J. Y., & Hsieh, S. C. (2017). Techniques and methods to study functional characteristics of emulsion systems. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25(1), 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.10.021>
- International Federation of Societies of Cosmetic Chemists. (2018). *The fundamentals of stability testing* (IFSCC Monograph No. 2). <https://ifsc.org/wp-content/uploads/2018/05/2-Fundamentals-of-Stability-Testing.pdf>
- Linke, C., & Drusch, S. (2016). Turbidity in oil-in-water emulsions: Key factors and visual perception. *Food Research International*, 89, 202-210.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.019>
- Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Color difference ΔE : A survey. *Machine Graphics and Vision*, 20(4), 383-411.
- Romay, C., González, R., Ledón, N., Ramirez, D., & Rimbau, V. (2003). C-phycocyanin: A biliprotein with antioxidant, anti-inflammatory and neuroprotective effects. *Current Protein & Peptide Science*, 4(3), 207-216.
<https://doi.org/10.2174/1389203033487216>

Sharma, G., Wu, W., & Dalal, E. N. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula:

Implementation notes, supplementary test data, and mathematical

observations. *Color Research & Application*, 30(1), 21-30.

<https://doi.org/10.1002/col.20070>

Sungthongjeen, S., Jitpreedakorn, C., Chajaun, S., Kriangkrai, W., Charoenthai, N., &

Puttipipatkachorn, S. (2023). Stability study of blue phycocyanin from

spirulina and compatibility evaluation in eye remover solution using Plackett-

Burman design. *Science, Engineering and Health Studies*, 17, 23050001.

<https://doi.org/10.14456/sehs.2023.3>

Yuan, B., Li, Z., Shan, H., & Liu, Y. (2022). A review of recent strategies to improve the

physical stability of phycocyanin. *Current Research in Food Science*, 5, 2329-

2337. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.11.019>

