

สภาวะเหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการกรดอินทรีย์

Optimization of conditions for producing extruded cricket powder using response surface methodology and improving its properties with organic acids

หทัยกาญจน์ กกแก้ว^{1*} และ นิสากอร์ ศรีธัญรัตน์¹

Hathaigan Kokkaew^{1*} and Nisakorn Srithanyarat¹

Received: 15 October 2024 ; Revised: 8 January 2025 ; Accepted: 22 April 2025

บทคัดย่อ

จิ้งหรีดแหล่งโปรตีนทางเลือกคุณภาพสูง การแปรรูปเป็นผงจิ้งหรีดที่มีโปรตีนสูงจะช่วยเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบได้ กระบวนการเอกซ์ทรูดชันเป็นการแปรรูปอาหารที่ทำได้ง่าย ให้ผลผลิตสูง ของเสียน้อย รวมทั้งสามารถปรับสูตร รูปร่าง เนื้อสัมผัส สี กลิ่น-รส และคุณค่าทางโภชนาการได้ตามที่ต้องการ นอกจากนี้ การเติมไฮโดรคอลลอยด์ มอลโทเดกซ์ทรีน และกรดอินทรีย์ร่วมกับกระบวนการเอกซ์ทรูดชันจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดได้อีกด้วย การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูดชันเพื่อให้มีคุณสมบัติสูงสุดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) รวมถึงศึกษาผลของการปรับสภาพด้วยการกรดอินทรีย์ต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด (Extrude cricket powder; ECP) การหาสภาวะเหมาะสมในการผลิต ECP ศึกษา 3 ปัจจัยคือ อัตราส่วนของผงจิ้งหรีด (Cricket powder; CP) ต่อมอลโทเดกซ์ทรีน (Maltodextrin; MD) (x_1) ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose; CMC) (x_2) และปริมาณน้ำ (x_3) เพื่อให้ค่าตอบสนองสูงสุดของปริมาณโปรตีน ความสามารถในการละลาย และดัชนีความขาว โดยวางแผนการทดลองแบบการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design; CCD) มีทั้งหมด 20 การทดลอง จากการวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธีการพื้นผิวการตอบสนองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดคือ อัตราส่วนของ CP:MD, ปริมาณ CMC และปริมาณน้ำ เท่ากับ 83:17, 1.6% และ 41% โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด ตามลำดับ ณ สภาวะดังกล่าวให้ค่าตอบสนองสูงสุดของปริมาณโปรตีน (63.0%) ความสามารถในการละลาย (74.9%) และดัชนีความขาว (46.7) เมื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือในการทำนายค่าตอบสนอง นอกจากนี้ การปรับสภาพ ECP ด้วยกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดซิตริก กรดฟูมาริก และกรดแอสคอร์บิก ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0% โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ทั้งสามชนิดสูงขึ้นส่งผลให้ผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดมีความสามารถในการละลาย ดัชนีความขาว และความสามารถในการต้านจุลินทรีย์มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และการเติมกรดฟูมาริกที่ระดับความเข้มข้น 1% ทำให้ได้ผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดที่มีคุณสมบัติสูงสุด ผลการวิจัยนี้ยืนยันได้ว่า RSM เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด รวมทั้งการเติมกรดอินทรีย์ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งนับว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับจิ้งหรีดในการใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระบวนการเอกซ์ทรูดชัน, จิ้งหรีด, ผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด, วิธีการพื้นผิวตอบสนอง, กรดอินทรีย์

Abstract

Crickets, a high-quality alternative protein source, can be value-added through processing into high-protein cricket powder. The extrusion process is a simple and efficient food processing method that offers high yields with minimal waste. It also enables customization of formulations, shapes, textures, colors, flavors, and nutritional values as desired. Moreover, the addition of hydrocolloids, maltodextrin, and organic acids with the extrusion process can enhance the

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม

¹ Department of Food Technology, Faculty of Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University

* Corresponding author, e-mail : hathaikk@npu.ac.th

properties of extruded cricket powder. This research aimed to determine the optimal conditions for producing cricket powder with the extrusion process to achieve the highest property using the Response Surface Methodology (RSM). It also investigated the effects of organic acid pretreatments on improving the properties of extruded cricket powder. The optimization of ECP production focused on three factors: the ratio of cricket powder (CP) to maltodextrin (MD) (x_1), the content of carboxymethyl cellulose (CMC) (x_2), and the water content (x_3). These factors were studied to maximize the response values, including protein content, solubility, and whiteness index. The experimental design followed a Central Composite Design (CCD) with a total of 20 experiments. The regression analysis using RSM showed that the optimal conditions for producing extruded cricket powder were a CP:MD ratio of 83:17, 1.6% CMC, and 41% water content by weight of cricket powder, respectively. These conditions resulted in the highest values for protein content (63.0%), solubility (74.9%), and whiteness index (46.7%). The verification of the model revealed that the experimental values and the predicted values had a deviation of less than 5%, indicating that the model was reliable for predicting response values. Additionally, the pretreatments of ECP with organic acids, including citric acid, fumaric acid, and ascorbic acid, were applied at concentrations of 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0% by weight of cricket powder. This study found that as the concentrations of all three organic acids increased, the solubility, whiteness index, and antimicrobial activity of the extruded cricket powder were significantly improved. The addition of fumaric acid at a concentration of 1% in the extrusion process resulted in the highest property of ECP. The results of this study confirmed that RSM was an effective method for determining the optimal conditions for producing extruded cricket powder. The addition of organic acids in extruded products enhances the properties of the product. This is considered an effective way to add value to crickets by utilizing them as a raw material in high-protein food products.

Keywords: Extrusion technology, cricket, extrude cricket powder, response surface methodology, organic acids

บทนำ

ประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ความต้องการอาหารสูงขึ้น จึงได้มีความพยายามในการค้นหาแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ยั่งยืนและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง จิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) เป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพดี มีปริมาณโปรตีนสูงอยู่ระหว่าง 23-65% โดยน้ำหนักแห้ง (Hanboonsong *et al.*, 2013) และมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่จำเป็นในสัดส่วนที่เหมาะสม นอกจากนี้ จิ้งหรีดยังเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้พื้นที่และน้ำปริมาณน้อยกว่าการเลี้ยงสัตว์ชนิดอื่น (Mancini *et al.*, 2019; Halloran *et al.*, 2017) จิ้งหรีดจึงเป็นแหล่งอาหารที่พัฒนาได้อย่างยั่งยืน (Pervez & Manzoor, 2022) การแปรรูปเป็นผงจิ้งหรีดเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนสูงจะช่วยเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ โดยนิยมใช้กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนเพื่อผลิตผงจิ้งหรีด แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถในการละลายต่ำ และใช้เวลาในการทำแห้งสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด การเสื่อมเสียจากไตรเมทิลเอมีน (Trimethylamine; TMA) และกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมถึงการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์อีกด้วย ทำให้ผงจิ้งหรีดที่ได้จึงมีอายุการเก็บรักษาสั้นซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำไป

ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion process) ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ สามารถผลิตอาหารได้หลากหลายชนิด เช่น ธัญพืช ขนมขบเคี้ยว อาหารสำหรับสัตว์เลี้ยง และผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือก การเอกซ์ทรูชัน (Extrusion) หรือที่เรียกว่า การอัดผ่านเกลียว หรือการอัดพอง เป็นเทคนิคที่ใช้แปรรูปอาหารด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน การผสม (Mixing) การทำให้สุก (Cooking) การนวด (Kneading) การฉีก (Shearing) และการขึ้นรูป (Forming) (Ali *et al.*, 2024) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของอาหาร และสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่าง เนื้อสัมผัส สี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการที่แตกต่างกัน (Pismag *et al.*, 2024) จึงนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโปรตีนจากแมลงและการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จากแมลง เช่น ขนมขบเคี้ยว เส้นพาสต้า และโปรตีนแท่ง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน (Leonard *et al.*, 2019) การปรับโครงสร้างโปรตีนแมลงทำให้ได้เนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ (Mazumder *et al.*, 2023) งานวิจัยของ Islam *et al.* (2022) รายงานว่าการใช้กระบวนการ

การเอ็กซ์ทรูชันที่มีความชื้นสูง (High moisture extrusion) สามารถผลิตเนื้อเทียมจากโปรตีนจิ้งหรีดผสมโปรตีนถั่วเหลืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีความยืดหยุ่น ผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติตามต้องการและควบคุมได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำงานได้ต่อเนื่อง มีผลผลิตมากและของเสียน้อย จึงนับว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ และสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนสูง อีกทั้งยังให้ความคุ้มค่าในการลงทุนและเหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เพื่อรองรับตลาดอาหารแห่งอนาคต

กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟิวมาริก เป็นต้น ได้นำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูตจากแมลง กรดอินทรีย์ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของโปรตีนและโครงสร้างทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Sorathiya *et al.*, 2025) กรดอินทรีย์ทำให้ค่า pH ของระบบลดลงในช่วงเป็นกรด ($\text{pH} < 5$) จึงชะลอการเกิดอนุมูลอิสระยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Maillard reaction) (Ali *et al.*, 2024) การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันทำให้โครงสร้างโปรตีนคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้โปรตีนสามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น (Leonard *et al.*, 2019) กรดอินทรีย์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารมีค่า pH จนเป็นกรดจึงไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Natukunda *et al.*, 2015; Sorathiya *et al.*, 2025) ยิ่งไปกว่านั้นกรดอินทรีย์ยังช่วยส่งเสริมรสชาติของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย (Shi *et al.*, 2022) ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการหาสภาวะเหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อให้มีคุณสมบัติสูงสุดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และศึกษาผลของการปรับสภาพด้วยกรดอินทรีย์ต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของผงจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูต

การทดลอง

1. การเตรียมผงจิ้งหรีด

ผงจิ้งหรีดได้จากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมแมลงเศรษฐกิจ ตำบลโพหนอง อำเภอรณนคร จังหวัดนครพนม ผลิตจากจิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) ระยะตัวเต็มวัยอายุประมาณ 40-45 วัน นำมาบรรจุแบบสุญญากาศและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของจิ้งหรีดก่อนนำไปใช้ในการวิจัยขั้นต่อไป (Anankware *et al.*, 2021)

2. การเตรียมจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูต

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Polydrive with Rheomex R 252 HAAKE, Germany) ใช้เพื่อผลิตจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูต (ECP) สภาวะการผลิตตามวิธีของ Sobowale *et al.* (2016) ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C ความเร็วสกรูที่ 6.3 เมตรต่อวินาที และเส้นผ่านศูนย์กลางของได (die) 2 มิลลิเมตร ในขณะที่อัตราการป้อนอาหารคงที่ตลอดการทดลอง จิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูตเตรียมโดยการผสมผงจิ้งหรีดและมอลโทเดกทรีนซ์ตามอัตราส่วนที่กำหนดในแผนการทดลอง ขั้นตอนแรกนำผงจิ้งหรีดและมอลโทเดกทรีนซ์มาผสมให้เข้ากันกับคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (CMC) เติมน้ำกลั่นในส่วนผสมเพื่อปรับความชื้น จากนั้นนำไปนวดในเครื่องผสม (Kitchen Aid, รุ่น MK45SSWH, St. Joseph, Michigan, USA) นาน 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี นำโดที่ได้นำไปทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 12 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนผสมดูดซับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sobowale *et al.*, 2016) ขั้นตอนต่อมา ป้อนส่วนผสมผ่านกรวยป้อน โดยให้ส่วนผสมเต็มสกรูอย่างต่อเนื่องเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของส่วนผสมในกรวยกึ่งจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูตให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง นำไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 1 ชั่วโมง จนมีความชื้นที่ 9-10% โดยน้ำหนักเปียก จากนั้นนำจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูตมาบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช เพื่อให้ได้ผงจิ้งหรีดเอ็กซ์ทรูตที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ นำมาบรรจุแบบสุญญากาศและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อช่วยรักษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ (Janssen *et al.*, 2017)

3. การเติมกรดอินทรีย์

กรดซิตริก กรดฟิวมาริก และกรดแอสคอร์บิกเป็นกรดอินทรีย์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร (Osorio & Hofmann, 2024) ได้นำมาศึกษาเพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของ ECP ให้ดีขึ้น โดยปรับสภาพ ECP ให้เป็นกรดที่ระดับความเข้มข้น 0.2-1.0% (โดยน้ำหนักจิ้งหรีด) จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความสามารถในการละลายดัชนีความขาว และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด

4. การหาปริมาณโปรตีนทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดของ ECP ตามวิธีของ AOAC (2000) โดยค่าคอนเวอร์ชัน แฟกเตอร์ (conversion factor) ที่ใช้ในการคำนวณโปรตีนคือ 6.25 (Haug & Lantzsch, 1983) เพื่อคำนวณหาปริมาณโปรตีนทั้งหมดของตัวอย่าง

5. ความสามารถในการละลาย

วิเคราะห์ความสามารถในการละลาย (Solubility; Sol) ดัดแปลงจากวิธีของ Adebawale *et al.* (2009) ใช้ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในหลอดเหวี่ยงเติมน้ำ 10 มิลลิลิตร ผสมให้ละลายที่อุณหภูมิ 30 °C แล้วนำไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที เทของเหลวส่วนใส (Supernatant) ใส่ในกระป๋องอะลูมิเนียมแล้วเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 24 ชั่วโมง คำนวณหา Sol (%) = (มวลแห้งของตัวอย่างที่ละลายได้ใน Supernatant (กรัม)/มวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (กรัม)) x 100

6. ดัชนีความขาว

ประเมินดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI) ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านสีที่คำนวณจากระบบ Hunter CIE color (CIE, 2004) โดยใช้ค่าสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ที่วัดด้วยเครื่องโครมามิเตอร์ (Minolta CR-300 series, Japan) โดยคำนวณได้จากสมการคือ $WI = 100 - ((100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ วัดตัวอย่างละ 2 ซ้ำ ในแต่ละการวัดจะอ่านค่า 3 ค่า เพื่อหาเฉลี่ย

7. การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

วัดค่า pH ตามวิธีของ AOAC (2000) โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม มาละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 30 นาที จากนั้นวัดค่า pH โดยใช้เครื่องวัด pH (รุ่น pH211, Hanna Instrument Ltd., USA)

8. จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด

หาปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total microbial count; TMC) โดยวิธีเทเพลท (Pour plate method) (AOAC, 2000) ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ (Plate Count Agar, PCA) ปริมาณ TMC รายงานเป็นโคโลนีต่อกรัม (CFU/g)

9. การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองด้วยวิธี Central composite design (CCD) โดยศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ ECP ได้แก่ อัตราส่วนของ CP:MD (x_1 : 80:20-95:5%) ปริมาณ CMC (x_2 : 0.5-1.5%) และปริมาณน้ำ (x_3 : 30.0-50.0%) (%) โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด) เพื่อให้ค่าตอบสนองสูงสุดของปริมาณโปรตีน (Y_1), ความสามารถในการละลาย (Y_2) และดัชนีความขาว (Y_3) พื้นผิวตอบสนองได้จาก 3 ตัวแปร ที่ 5 ระดับ (-1.68, -1, 0, +1, +1.68) สัญลักษณ์และรหัสตัวแปรได้แก่ x_1 , x_2 และ x_3 แสดงดัง Table 1 โดย CCD มีทั้งหมด 20 การทดลอง (Table 2) สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic equation) ใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ (Y) ดังนี้: $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3$ โดยที่ Y คือ ตัวแปรตอบสนอง, x_1 , x_2 และ x_3 คือ รหัสตัวแปร (coded process variables) และ β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_{11} , β_{22} , β_{33} และ β_{12} , β_{13} , β_{23} ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อคุณสมบัติของผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด

10. การวิเคราะห์ทางสถิติ

หาสภาวะเหมาะสมที่ให้ค่าตอบสนองสูงสุดโดยวางแผนการทดลองแบบ CCD และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design Expert version 7.0 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) และ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลทางสถิติโดย ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ด้วยโปรแกรม SPSS statistic program (Version 17)

Table 1 Independent variables and levels of CCD applied to instant extruded cricket powder ingredients.

Independent variables		Levels				
Code	Real	- α	-1	0	+1	+ α
x_1	Ratio of CP:MD (% total weight cricket powder basis)	75 : 25	80 : 20	88 : 12	95 : 5	100:0
x_2	CMC content (% total weight cricket powder basis)	0.3	1.0	2.0	3.0	3.7
x_3	Water content (% total weight cricket powder basis)	23.2	30.0	40.0	50.0	56.8

Table 2 Response values for Y_1 , Y_2 and Y_3 with different combinations of x_1 , x_2 , and x_3 in CCD.

No.	Code level of variables ¹			Response values ²		
	x_1 (%)	x_2 (%)	x_3 (%)	Y_1 (%)	Y_2 (%)	Y_3 (%)
1	80:20	1.0	30	60.8	72.5	48.9
2	88:12	2.0	40	64.8	75.8	45.1
3	88:12	2.0	40	65.1	73.9	44.5
4	95:5	1.0	50	68.7	71.2	42.9
5	88:12	2.0	40	64.4	75.9	45.1
6	88:12	3.7	40	64.6	72.2	43.9
7	88:12	2.0	57	64.2	75.0	44.5
8	88:12	0.3	40	65.2	65.8	43.8
9	80:20	3.0	50	56.8	72.0	46.1
10	88:12	2.0	23	64.0	65.0	44.6
11	100:0	2.0	40	69.6	75.5	40.8
12	95:5	1.0	30	67.8	60.5	40.9
13	95:5	3.0	50	68.7	75.8	41.8
14	75:25	2.0	40	56.0	73.8	52.5
15	88:12	2.0	40	64.8	73.5	45.1
16	80:20	3.0	30	58.0	73.5	47.9
17	88:12	2.0	40	67.0	75.1	44.9
18	88:12	2.0	40	65.4	77.4	43.4
19	95:5	3.0	30	67.2	74.8	42.5
20	80:20	1.0	50	61.5	71.8	47.4

¹ x_1 : Ratio of CP:MD (%), x_2 : CMC content (%), x_3 : Water content (%).

² Y_1 : Total protein content (%), Y_2 : Solubility (%), Y_3 : Whiteness index.

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การวิเคราะห์ทางสถิติและการสร้างแบบจำลอง

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ พบว่าสมการพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial equations) และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ของค่าตอบสนอง Y_1 , Y_2 และ Y_3 เท่ากับ 0.9713, 0.8823 และ 0.9711 ตามลำดับ และค่าความน่าเชื่อถือ (p-value) ของแบบจำลอง Y_1 , Y_2 และ Y_3 เท่ากับ <0.0001, 0.0013 และ <0.0001 ตามลำดับ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะเดียวกันเมื่อทดสอบความไม่เหมาะสม (lack of fit) ของแบบจำลอง Y_1 , Y_2 และ Y_3 ให้ค่าความน่าจะเป็น (p-value) เท่ากับ 0.5641, 0.1352 และ 0.3914 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งสามมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการ

ผลิต ECP ผลการวิเคราะห์พหุนามกำลังสอง พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและกำลังสองเชิงบวกของ x_1 (อัตราส่วนของ CP: MD) x_2 (CMC) และ x_3 (ปริมาณน้ำ) ที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง Y_1 , Y_2 , และ Y_3

ปริมาณโปรตีนของ ECP ทั้ง 20 การทดลอง มีค่าตั้งแต่ 56.0-69.6 % โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าอัตราส่วนของ CP: MD และปริมาณ CMC มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณโปรตีนของ ECP ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณน้ำไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนของ ECP จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน CP: MD ปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มของโปรตีนจึงหรีดในผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การเติมมอลโทเดกทรีนยังเป็นอีกปัจจัยที่ช่วยรักษาคูณสมบัติของโปรตีนในกระบวนการเอกทรีนขึ้น เนื่องจากมอลโทเดกทรีนมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยเติมเต็ม (Filler) ที่มี

ประสิทธิภาพ ช่วยให้ผงโปรตีนคงตัวมากขึ้นจึงลดการสูญเสียโปรตีนระหว่างกระบวนการเอกซทราซัน ขณะที่การเติม CMC แสดงอิทธิพลเส้นตรงเชิงลบต่อปริมาณโปรตีนของ ECP โดยปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณโปรตีนของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจาก CMC เป็นสารเพิ่มความหนืดจึงส่งผลต่อการจับกลุ่มกันของโปรตีนระหว่างกระบวนการเอกซทราซัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuaychan and Benjakul (2016) รายงานว่าการใช้ CMC ในปริมาณมากเกินไปอาจลดการจับตัวกันของโปรตีน ซึ่งส่งผลให้โปรตีนถูกทำลายมากขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูป จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณโปรตีนลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้น การเติม CMC ในปริมาณเหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการควบคุมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โปรตีนจากแมลง

ความสามารถในการละลายของ ECP มีค่าตั้งแต่ 60.5-75.9% พบว่าปริมาณ CMC และปริมาณน้ำ มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการละลายของ ECP ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราส่วนของ CP: MD ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนของ ECP การเติม CMC ในการผลิต ECP ช่วยส่งเสริมให้โปรตีนสามารถดูดซับน้ำ และอนุภาคโปรตีนสามารถกระจายตัวในของเหลวได้ดีขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติการพองตัวของ CMC จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ ECP มีความสามารถในการละลายของเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของ ECP (Islam *et al.*, 2022) โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางช่วยให้โปรตีนผ่านกระบวนการแปรรูปได้อย่างราบรื่น และลดการเสียดสีระหว่างอนุภาค จึงส่งเสริมให้โปรตีนในผงจึงหรีดละลายได้ง่ายขึ้นหลังกระบวนการเอกซทราซัน (Yu *et al.*, 2023) ถึงแม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของ CP: MD สามารถช่วยรักษาเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเอกซทราซัน แต่ความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์เป็นอิทธิพลจากปริมาณ CMC และปริมาณน้ำ ซึ่งปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้นส่งผล

ทำให้โปรตีนกระจายตัวได้ดีขึ้น รวมทั้งปริมาณน้ำที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการละลายของโปรตีนให้มากขึ้นอีกด้วย (Chaipoot *et al.*, 2024) สอดคล้องการวิจัยก่อนหน้านี้ที่ยืนยันว่าปริมาณ CMC และปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการละลายของโปรตีนของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซทราซัน โดย CMC ทำหน้าที่เสริมการทำงานของน้ำในการทำให้อนุภาคโปรตีนแตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมปริมาณ CMC และปริมาณน้ำในกระบวนการเอกซทราซันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โปรตีนที่มีคุณสมบัติสูง (Yu *et al.*, 2023)

ดัชนีความขาวของ ECP มีค่าตั้งแต่ 40.8-52.5% พบว่าอัตราส่วนของ CP: MD มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความขาวของ ECP ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณ CMC และปริมาณน้ำ ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ต่อความขาวของ ECP ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อัตราส่วนของ CP:MD ที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อค่าดัชนีความขาวของ ECP เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรีนมีลักษณะเป็นผงสีขาว เมื่อใช้ในสัดส่วนที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้ผงจึงหรีดมีความขาวเพิ่มขึ้น (Chaipoot *et al.*, 2024) ขณะที่ CMC และปริมาณน้ำไม่มีอิทธิพลต่อดัชนีความขาวเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของ CP:MD แม้ว่า CMC จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อดัชนีความขาวยิ่งไปกว่านั้น นอกจากนี้ MD ยังช่วยปรับปรุงความคงตัวของ ECP และทำให้โครงสร้างของผงละเอียดและน้ำหนักเบาขึ้น ซึ่งส่งผลทางอ้อมต่อการสะท้อนแสงและทำให้ดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smith & Harris (2020) ได้รายงานว่ายนิยมใช้ MD ในกระบวนการผลิตอาหารแบบผงเพื่อปรับปรุงความขาวและเนื้อสัมผัส เป็นต้น ดังนั้น อัตราส่วนของ CP:MD เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อดัชนีความขาวของ ECP ปริมาณ MD ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความขาวมากขึ้น ขณะที่การใช้ CMC และปริมาณน้ำมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความขาวของผลิตภัณฑ์

Table 3 Second order polynomial equations, coefficients of determinations and lack of fits of response variables.

Responses	Second order polynomial equations	R^2	Model (p-value)	Lack of fits (p-value)
Y_1	$= 65.3 + 4.3x_1 - 0.7x_2 + 0.9x_1^2 + 0.9x_1x_2$	0.9713	<0.0001	0.5641
Y_2	$= 75.3 + 2.3x_2 + 1.9x_3 - 2.1x_2^2 - 1.8x_3^2 + 2.2x_1x_2 + 1.7x_1x_3$	0.8823	0.0013	0.1352
Y_3	$= 44.7 - 3.1x_1 + 0.7x_1^2 + 0.6x_1x_3$	0.9711	<0.0001	0.3914

2. การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองสามมิติ (Three-dimensional response surface plots) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระโดยอัตราส่วนของ CP:MD (x_1) ปริมาณ CMC (x_2) และปริมาณน้ำ (x_3) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองปริมาณโปรตีน (Y_1) ความสามารถในการละลาย (Y_2) และดัชนีความขาว (Y_3) การวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนอง Figure 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของ CP:MD เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในผงจึงหรีดเอกซ์ทรูด (Y_1) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราส่วน CP:MD มีผลเชิงบวกต่อการเพิ่มปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์ ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มปริมาณ CMC ส่งผลเชิงลบต่อปริมาณโปรตีนในผงจึงหรีดเอกซ์ทรูด เนื่องจากการเติม CMC ปริมาณมากเกินไปอาจลดการจับตัวกันของโปรตีน โปรตีนจึงถูกทำลายมากขึ้นระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณโปรตีนลดลง (Chuaychan & Benjakul, 2016) ขณะที่ปริมาณน้ำไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณโปรตีนในผงจึงหรีดเอกซ์ทรูด

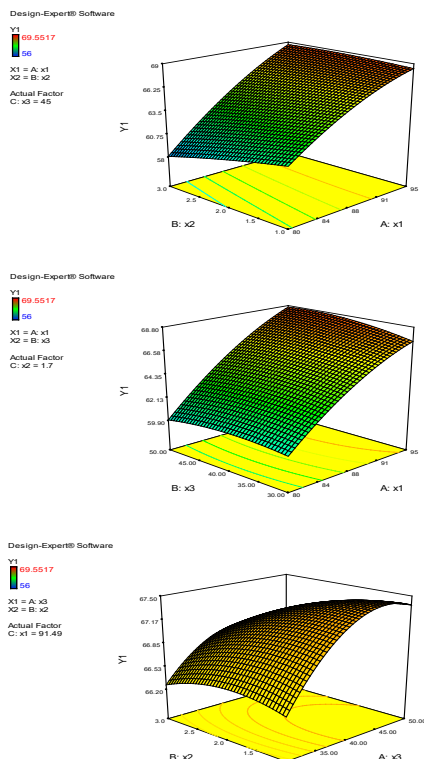


Figure 1 Response surface plots for the effect of independent variables (x_1 , ratio of cricket powder to maltodextrin; x_2 , CMC content; x_3 , water content) on protein content (Y_1)

Figure 2 ได้แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลาย (Y_2) ของ ECP จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ CMC โดยที่อัตราส่วนของ CP:MD และปริมาณมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ CMC ต่อไป กลับส่งผลให้ความสามารถในการละลายของ ECP ลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ CMC มากเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นยังมีผลเชิงบวกต่อความสามารถในการละลายของ ECP เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางช่วยให้โปรตีนผ่านกระบวนการแปรรูปได้อย่างราบรื่น และลดการเสียดสีระหว่างอนุภาค จึงส่งเสริมให้โปรตีนในผงจึงหรีดละลายได้ง่ายขึ้นหลังกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Yu *et al.*, 2023)

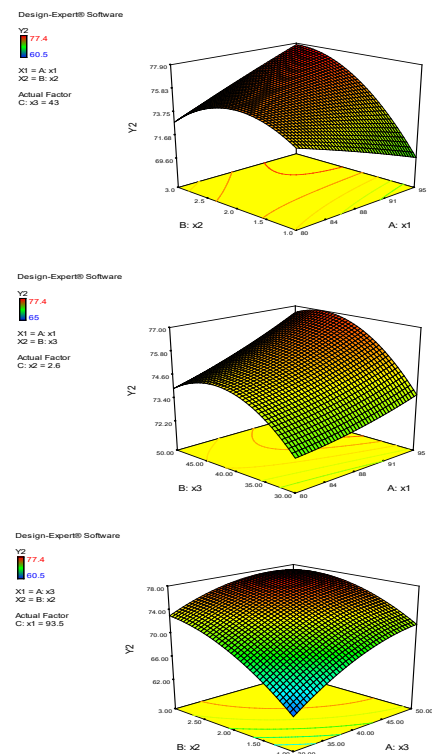


Figure 2 Response surface plots for the effect of independent variables (x_1 , ratio of cricket powder to maltodextrin; x_2 , CMC content; x_3 , water content) on solubility capacity (Y_2)

การวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองเพื่อประเมินดัชนีความขาว (Y_3) ของผงจึงหรีดเอกซ์ทรูดแสดงโดย Figure 3 พบว่าดัชนีความขาว (Y_3) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ CP:MD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อให้ปริมาณ CMC และปริมาณน้ำคงที่ พบว่าที่สภาวะเริ่มต้นดัชนีความขาวจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ CP:MD ต่อไปกลับส่งผลให้ดัชนี

ความขาว ECP ลดลง แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลที่มีความซับซ้อนระหว่างการเพิ่มอัตราส่วน CP:MD ต่อการเปลี่ยนแปลงของความขาวของ ECP การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัตราส่วนของ CP:MD ปริมาณ CMC และปริมาณน้ำในกระบวนการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองปริมาณโปรตีน ความสามารถในการละลาย และดัชนีความขาวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถือเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารเอกซ์ทรูดที่มีส่วนผสมของโปรตีนจากแมลงต่อไป

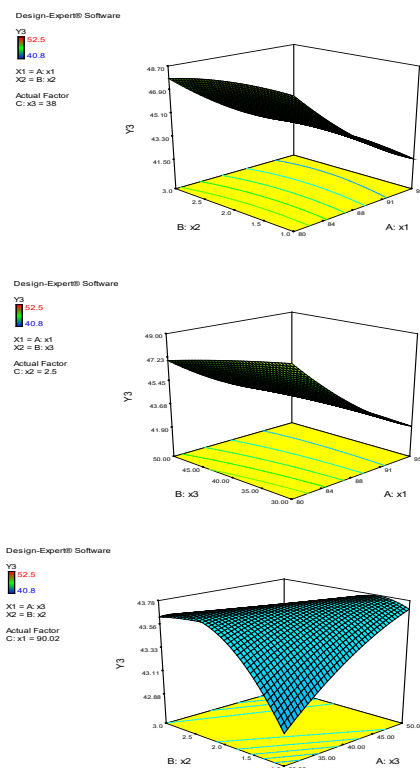


Figure 3 Response surface plots for the effect of independent variables (x_1 , ratio of cricket powder to maltodextrin; x_2 , CMC content; x_3 , water content) on whiteness index (Y_3)

3. สภาวะเหมาะสมและการทวนสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

การวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองเป็นวิธีการที่ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต ECP ให้มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติสูงสุด โดยอธิบายค่าตัวแปรอิสระที่เหมาะสมได้แก่ อัตราส่วนของ CP:MD, CMC และปริมาณน้ำที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (ปริมาณโปรตีน ความสามารถในการละลาย และดัชนีความขาว) อย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ECP คือ อัตราส่วนของ CP:MD, ปริมาณ

CMC และปริมาณน้ำเท่ากับ 83:17, 1.6% และ 41% โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด ซึ่งสภาวะดังกล่าวให้ค่าตอบสนองสูงสุดของปริมาณโปรตีน (63.0%), ความสามารถในการละลาย (74.9%) และดัชนีความขาว (46.7) การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของ CP:MD เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มปริมาณโปรตีนใน ECP ซึ่งมีผลดีต่อคุณค่าทางโภชนาการ (Montowska *et al.*, 2019) นอกจากนี้ CMC ยังเป็นอีกปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงความสามารถในการละลายและความขาวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญในการประเมินคุณสมบัติของอาหาร จากการทวนสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือในการทำนายค่าตอบสนอง (Cunha *et al.*, 2025) ผลการศึกษาข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและสามารถในการแข่งขันในตลาดเชิงพาณิชย์ต่อไป

4. ผลของการเติมกรดอินทรีย์ต่อคุณสมบัติของผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด

การศึกษาผลของการปรับสภาพความเป็นกรดของ ECP ด้วยกรดอินทรีย์ได้แก่ กรดซิตริก ฟูมาริก และแอสคอร์บิก พบว่า ECP ที่ปรับสภาพให้เป็นกรดมีความสามารถในการละลาย ดัชนีความขาว และความสามารถในการต้านจุลินทรีย์สูงกว่าผลิตภัณฑ์ ECP ที่ไม่ได้ปรับสภาพเป็นกรด (Figure 2a, 2b และ 3c) นอกจากนี้ การปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดฟูมาริกที่ระดับความเข้มข้น 1% มีความสามารถในการละลายสูงสุด (80.1%) รองลงมาคือ กรดซิตริก (77.9%) และกรดแอสคอร์บิกมีค่าต่ำสุด (76.8%) ($p < 0.05$) และความสามารถในการละลายของผงจิ้งหรีดไม่ผ่านเอกซ์ทรูดเท่ากับ 44.5% ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากการศึกษาการปรับสภาพ ECP ด้วยกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Figure 3a) ECP ที่เติมกรดฟูมาริกที่ระดับความเข้มข้น 1% ความสามารถในการละลายสูงสุด ขณะที่กรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิกก็มีประสิทธิภาพรองลงมาตามลำดับ ($p < 0.05$) การปรับสภาพ ECP ด้วยกรดอินทรีย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนให้เสถียรมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการละลายของ ECP อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมอีกด้วย งานวิจัยที่ผ่านมาได้ชี้ให้เห็นว่าการใช้กรดอินทรีย์ในผงโปรตีนจิ้งหรีดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการละลายของโปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกรดอินทรีย์สามารถจับกับไอออนโลหะที่กระตุ้นการออกซิเดชันของโปรตีน การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันทำให้โครงสร้างโปรตีนคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้โปรตีนสามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น (Sorathiya *et al.*, 2025) การเติมกรดอินทรีย์ช่วยปรับค่า pH ของระบบให้อยู่ในช่วงที่ห่างจากค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric Point, pI) ซึ่งเป็นจุดที่โปรตีนมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้โปรตีนมีประจุสุทธิเป็นลบหรือบวก ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลโปรตีน ช่วยลดการจับตัวกันและเพิ่มความสามารถในการละลายในสารละลายได้ดีขึ้น นอกจากนี้ กรดอินทรีย์ยังมีบทบาทสำคัญในการลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโปรตีน โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจนและพันธะซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โปรตีนจับตัวกันในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ อีกทั้ง การเติมกรดอินทรีย์ยังช่วยยับยั้งการรวมตัวของโปรตีน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) ที่ส่งผลต่อการลดความสามารถในการละลายของโปรตีน (Sorathiya *et al.*, 2025)

ดัชนีความขาวนับว่าเป็นตัวชี้วัดทางกายภาพที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านสีของ ECP พบว่าการเติมกรดฟูมาริกที่ระดับความเข้มข้น 1% มีดัชนีความขาวสูงสุด (38.7) รองลงมาคือกรดซิตริก (38.5) และกรดแอสคอร์บิกมีค่าต่ำสุด (37.9) และดัชนีความขาวของผงจึงหรีดไม่ผ่านเอกซ์ทราดเท่ากับ 30.4 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การปรับสภาพ ECP ด้วยกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Figure 3b) การเติมกรดฟูมาริกใน ECP ที่ระดับความเข้มข้น 1% มีผลให้ค่าดัชนีความขาวมากกว่ากรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กรดฟูมาริกมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความขาวมากกว่ากรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกรดสูงที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากัน ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณไอออนไฮโดรเจน (H^+) ในสารละลายที่สูงกว่ากรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิก (Abdullahi *et al.*, 2022) กรดฟูมาริกมีความเป็นกรดสูงจึงสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้โปรตีนเปลี่ยนสีส่งผลให้มีดัชนีความขาวของ ECP สูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้รายงานว่า การใช้กรดอินทรีย์ในการผลิตผงโปรตีนเอกซ์ทราดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดได้ดีที่สุดในค่า pH เป็นกลางถึงด่างอ่อน (pH 6–10) การเติมกรดอินทรีย์ลดค่า pH ของระบบทำให้เป็นกรด

($pH < 5$) ซึ่งจะยับยั้งปฏิกิริยาเริ่มต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Leonard *et al.*, 2019) นอกจากนี้ กรดอินทรีย์ยังสามารถจับกับไอออนโลหะ เช่น เหล็กและทองแดง ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาล และลดสารตั้งต้น เช่น น้ำตาลรีดิวซ์และกลุ่มอะมิโนอิสระส่งผลให้สีและกลิ่นไม่พึงประสงค์ลดลง รวมถึงกรดอินทรีย์ยังช่วยลดการเกิดอนุมูลอิสระ และยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ส่งผลต่อคุณสมบัติโปรตีน (Sorathiya *et al.*, 2025; Natukunda *et al.*, 2015) ดังนั้น การใช้กรดอินทรีย์ในกระบวนการเอกซ์ทราดเพิ่มความขาวของผลิตภัณฑ์โดยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ ยังช่วยคงคุณค่าทางโภชนาการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลของการเติมกรดอินทรีย์ใน ECP เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ พบว่าการเติมกรดฟูมาริกที่ระดับความเข้มข้น 1% มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (178 cfu/g) ต่ำสุด รองลงมาคือกรดซิตริก (125 cfu/g) และกรดแอสคอร์บิกมีค่าสูงสุด (224 cfu/g) ตามลำดับ และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของผงจึงหรีดไม่ผ่านเอกซ์ทราดเท่ากับ 656 cfu/g ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้มีการลดลงของปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($pH < 5$) (Figure 3c) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovanda *et al.* (2019) ได้รายงานว่ากรดอินทรีย์มีผลในการยับยั้งจุลินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สภาวะที่มีค่า pH ต่ำยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์อีกด้วยด้วยกรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแอสคอร์บิก ได้นำมาใช้ปรับค่า pH ของผลิตภัณฑ์อาหารให้ลดลงเพื่อสร้างสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Natukunda *et al.*, 2015; Sorathiya *et al.*, 2025) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovanda *et al.* (2019) ที่รายงานว่ากรดอินทรีย์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ จะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ มีการใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแอสคอร์บิก เพื่อลดค่า pH ของผลิตภัณฑ์อาหารให้ลดลงเพื่อให้มีสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Natukunda *et al.*, 2015; Sorathiya *et al.*, 2025) แม้ว่าการใช้กรดอินทรีย์จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผงโปรตีนจึงหรีดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราด แต่การเลือกชนิดและปริมาณกรดที่เหมาะสมยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อรสชาติและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยรวม

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ECP ด้วยวิธีการตอบสนองพื้นผิวพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูดคือ อัตราส่วนของ CP:MD, ปริมาณ CMC และปริมาณน้ำ เท่ากับ 83:17, 1.6% และ 41% โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด สภาวะดังกล่าวให้ค่าตอบสนองสูงสุดของ ปริมาณโปรตีน (63.0%) ความสามารถในการละลาย (74.9%) และดัชนีความขาว(46.7) เมื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีความเชื่อมั่นสูงในการทำนายค่าตอบสนองเหล่านี้ นอกจากนี้ การปรับสภาพ ECP ด้วยกรดอินทรีย์ได้แก่ กรดซิตริก กรดฟูมาริก และกรดแอสคอร์บิก ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน (0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% และ 1.0% โดยน้ำหนักผงจิ้งหรีด) ส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการละลาย ดัชนีความขาวและการต้านจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่สูงขึ้น โดยกรดฟิวมาริกที่ความเข้มข้น 1% ช่วยส่งเสริมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สูงสุด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ ยืนยันได้ว่าวิธีการตอบสนองพื้นผิวเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงจิ้งหรีดเอกซ์ทรูด และการเติมกรดอินทรีย์ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งนับว่าเป็นทางเลือกที่ดีในการเพิ่มมูลค่าให้กับจิ้งหรีดในการเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนสูงต่อไป

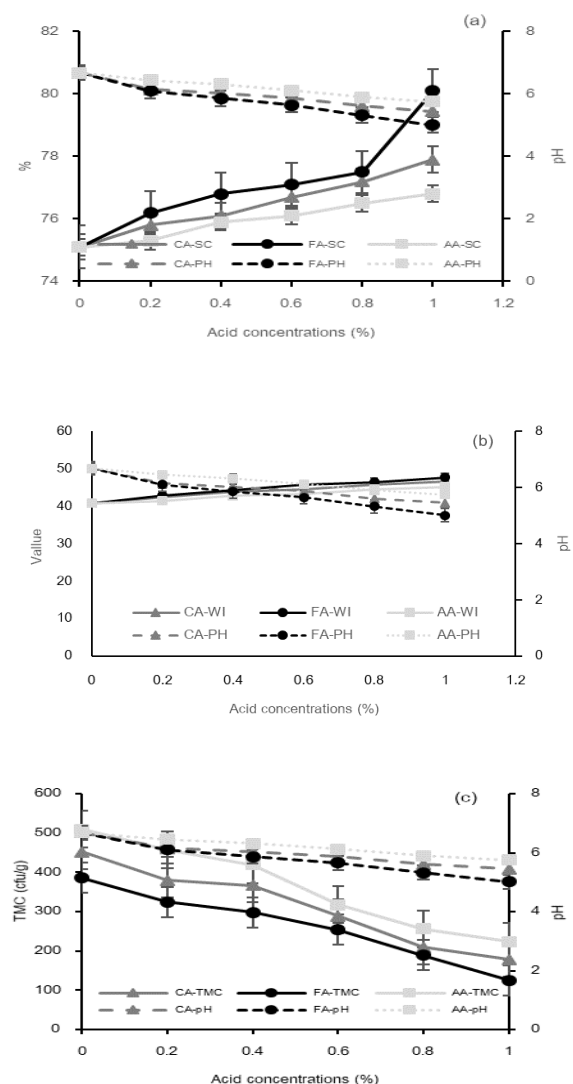


Figure 2 Effect of various levels of citric acid, fumaric acid and ascorbic acid on Solubility (Sol;%) (a), Whiteness Index (b) and Total microbial counts (TMC) (c) and pH in extruded cricket powder

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากกองทุนวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม เพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) ปีงบประมาณ 2566 มหาวิทยาลัยนครพนม

เอกสารอ้างอิง

Abdullahi, N., Igwe, E. C., Dandago, M. A., Rilwan, A., Jibril, H., & Iliyasu, R. (2022). Utilization of edible insects as protein substitute in food and effects of processing on their nutrient contents and protein functionalities. *Food ScienTech Journal*, 4(2), 83–93. <https://doi.org/10.33512/fsj.v4i2.14527>

- Adebowale, A. A., Sanni, S. A., & Oladapo, F. O. (2009). Chemical, functional and sensory properties of instant yam–breadfruit flour. *Nigerian Food Journal*, 26(1), 1–10. <https://doi.org/10.4314/nifoj.v26i1.47417>
- Ali, I. M., Forsido, S. F., Kuyu, C. G., Ahmed, E. H., Andersa, K. N., Chane, K. T., & Regasa, T. K. (2024). Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: A review. *Food Science & Nutrition*, 12(11), 8755–8761. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4472>
- Anankware, J. P., Roberts, B. J., Cheseto, X., Osuga, I., Savolainen, V., & Collins, C. M. (2021). The nutritional profiles of five important edible insect species from West Africa—An analytical and literature synthesis. *Frontiers in Nutrition*, 8, Article 792941. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.792941>
- AOAC. (2000). *Official methods of analysis of AOAC Intl* (17th ed.). Association of Official Analytical Chemists.
- Chaipoot, S., Phongphisutthinant, R., Wiriyaicharee, P., Kanthakat, G., Wongwatcharayothin, W., Somjai, C., Danmek, K., & Chuttong, B. (2024). Application of carboxymethyl cellulose and glycerol monostearate as binder agents for protein powder production from honey bee brood using foam-mat drying technique. *Foods*, 13(14), Article 2265. <https://doi.org/10.3390/foods13142265>
- Chuaychan, S., & Benjakul, S. (2016). Effect of malto-dextrin on characteristics and antioxidative activity of spray-dried powder of gelatin and gelatin hydrolysate from scales of spotted golden goatfish. *Journal of Food Science and Technology*, 53(9), 3583–3592. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2340-7>
- Cunha, N., Andrade, V., Macedo, A., Ruivo, P., & Lima, G. (2025). Methods of protein extraction from house crickets (*Acheta domesticus*) for food purposes. *Foods*, 14(7), Article 1164. <https://doi.org/10.3390/foods14071164>
- Halloran, A., Roos, N., Flore, R., & Hanboonsong, Y. (Eds.). (2017). *Edible insects in sustainable food systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9>
- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T., & Durst, P. B. (2013). *Six-legged livestock: Edible insect farming, collecting and marketing in Thailand*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Haug, W., & Lantzsch, H.-J. (1983). Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(12), 1423–1426. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740341217>
- Islam, M., Huang, Y., Islam, M. S., Lei, N., Shan, L., Fan, B., Tong, L., & Wang, F. (2022). Effect of high-moisture extrusion on soy meat analog: Study on its morphological and physicochemical properties. *Italian Journal of Food Science*, 34(2), 9–20. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v34i2.2141>
- Janssen, R. H., Lakemond, C. M. M., Riedl, H., van der Fels-Klerx, H. J., & van Boekel, M. A. J. S. (2017). Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(10), 2275–2278. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00471>
- Kovanda, L., Zhang, W., Wei, X., Luo, J., Wu, X., Atwill, E. R., Vaessen, S., Li, X., & Liu, Y. (2019). In vitro antimicrobial activities of organic acids and their derivatives on several species of Gram-negative and Gram-positive bacteria. *Molecules*, 24(20), Article 3770. <https://doi.org/10.3390/molecules24203770>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., & Fang, Z. (2019). Application of extrusion technology in plant food processing by-products: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514>
- Mancini, S., Moruzzo, R., Riccioli, F., & Paci, G. (2019). European consumers' readiness to adopt insects as food: A review. *Food Research International*, 122, 661–678. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.041>
- Mazumder, M. A. R., Panpipat, W., Chaijan, M., Shetty, K., & Rawdkuen, S. (2023). Role of plant protein on the quality and structure of meat analogs: A new perspective for vegetarian foods. *Future Foods*, 8,

- Article 100280. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100280>
- Montowska, M., Kowalczewski, P. Ł., Rybicka, I., & Fornal, E. (2019). Nutritional value, protein and peptide composition of edible cricket powders. *Food Chemistry*, 289, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.062>
- Natukunda, S., Muyonga, J. H., & Mukisa, I. M. (2015). Effect of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed on antioxidant activity, phytochemicals, physicochemical characteristics, and sensory acceptability of enriched cookies and mango juice. *Food Science & Nutrition*, 4(4), 494–507. <https://doi.org/10.1002/fsn3.311>
- Osorio, C., & Hofmann, T. (2024). Role of analytical and organic chemistry supporting the challenges in food preservation and safety. *ACS Food Science & Technology*, 4(1), 1–2. <https://doi.org/10.1021/acs-food-scitech.3c00683>
- Pervez, M., & Manzoor, F. (2022). Role of edible insects as food source to combat food security challenges: Innovative and traditional approaches. In *Food security challenges and approaches*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106809>
- Pismag, R. Y., Polo, M. P., Hoyos, J. L., Bravo, J. E., & Roa, D. F. (2024). Effect of extrusion cooking on the chemical and nutritional properties of instant flours: A review. *F1000Research*, 12, Article 1356. <https://doi.org/10.12688/f1000research.140748.2>
- Shi, Y., Pu, D., Zhou, X., & Zhang, Y. (2022). Recent progress in the study of taste characteristics and the nutrition and health properties of organic acids in foods. *Foods*, 11(21), Article 3408. <https://doi.org/10.3390/foods11213408>
- Sobowale, S. S., Obadina, A. O., Omemu, A. M., & Adegunwa, M. O. (2016). Process optimization of extrusion variables and its effect on properties of extruded cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) noodles. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 516–527. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12630>
- Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., & Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability*, 17(8), Article 3434. <https://doi.org/10.3390/su17083434>
- Yu, X., Wang, H., Yuan, Y., Shi, J., Duan, Y., Wang, L., Wang, P., & Xiao, Z. (2023). Changes in physicochemical and structural properties of pea protein during the high moisture extrusion process: Effects of carboxymethylcellulose sodium and different extrusion zones. *International Journal of Biological Macromolecules*, 243, Article 126350. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126350>