

โปรตีนแมลงกินได้: คุณสมบัติเชิงหน้าที่และการใช้ประโยชน์ในอาหาร

ธิดารัตน์ พันโท

ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อีเมล : ifrtp@ku.ac.th

รับเมื่อ 2 ธันวาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 1 มีนาคม 2568 ตอรับเมื่อ 10 มีนาคม 2568

จุดเด่น

- กระบวนการสกัดโปรตีนจากแมลงกินได้
- คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแมลงกินได้
- การใช้ประโยชน์แมลงกินได้และโปรตีนแมลงกินได้ในอาหาร

บทคัดย่อ

จำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับความต้องการโปรตีนที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับวิกฤตทางธรรมชาติที่อาจจะทำให้แหล่งโปรตีนในปัจจุบันไม่เพียงพอต่อความต้องการโปรตีนในอนาคต ดังนั้นแมลงกินได้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยตอบโจทย์ปัญหาความไม่มั่นคงทางอาหารในอนาคตได้ แต่อย่างไรก็ดีแมลงกินได้มีข้อจำกัดในเรื่องของรูปลักษณ์ที่ไม่น่ารับประทาน การแปรรูปแมลงกินได้ไม่ว่าจะเป็นการบดเป็นผง หรือการสกัดแยกเฉพาะโปรตีน เป็นวิธีการที่จะช่วยลดข้อจำกัดในการใช้แมลงกินได้ในอาหารลงได้ นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแมลงกินได้ยังส่งผลโดยตรงกับลักษณะปรากฏ รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมแมลงกินได้อีกด้วย

คำสำคัญ : แมลงกินได้ โปรตีนแมลง คุณสมบัติเชิงหน้าที่



Edible insect proteins: functional properties and food applications

Thidarat Pantoa

Department of Food Chemistry and Physics, Institute of Food Research and Product Development,
Kasetsart University

E-mail : ifrtp@ku.ac.th

Received 2 December 2024; **Revised** 1 March 2025; **Accepted** 10 March 2025

Highlights

- Edible insect protein extraction
- Functional properties of edible insect proteins
- Application of edible insects and edible insect proteins in food

Abstract

The increase in the world's population corresponds with rising demand for protein, compounded by natural crises that may render current protein sources insufficient to meet future needs. As such, edible insects present a viable alternative to address the challenges of future food insecurity. However, edible insects face limitations regarding their unappealing appearance. Method of food processing, such as grinding insects into powder or extracting proteins, mitigate these limitations for food application and utilization. Furthermore, the functional properties of insect protein directly influence the appearance, taste, texture, and overall acceptance of products incorporating edible insects among consumers.

Keywords : edible insects, insect proteins, functional properties

บทนำ

แมลงกินได้มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีน ไขมัน และไคติน เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอุดมไปด้วยสารอาหารรองอย่าง ธาตุเหล็ก สังกะสี แคลเซียม วิตามิน และสารประกอบฟีนอลิก แมลงถือเป็นแหล่งของโปรตีนโดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 25-75 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณโปรตีนในถั่วเหลือง⁽¹⁾ ทั้งนี้ปริมาณโปรตีนมีความแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ช่วงชีวิต และอาหารของแมลงนั้น ๆ⁽²⁾ หนอนนก (*Tenebrio molitor*) หนอนไหม (*Bombyx mori*) และผีเสื้อกลางคืน (*Gonimbrasia belina*) มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าเนื้อหมูและเนื้อไก่⁽³⁾ โปรตีนจากแมลงกินได้เป็นโปรตีนที่มีคุณภาพสูงเนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วนในปริมาณที่สมดุล⁽⁴⁾ เป็นไปตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (WHO) โดยมีกรดอะมิโนฟีนิลอะลานีน ไทโรซีน ทรีปโตเฟน ไลซีน และทรีโอนีนปริมาณสูง⁽⁵⁾ หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) มีสัดส่วนของกรดอะมิโนจำเป็นต่อกรดอะมิโนทั้งหมดสูงกว่าโปรตีนไข่⁽⁶⁾ ดักแด้หมามีกรดอะมิโนจำเป็นอาร์จินีน และเมไทโอนีนในปริมาณสูงกว่าถั่วเหลือง⁽⁷⁾ ถือเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับโปรตีนจากพืชที่ขาดกรดอะมิโนบางชนิด แมลงกินได้จึงเป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกอีกแหล่งหนึ่งที่น่าจะช่วยตอบสนองต่อความต้องการโปรตีนในอนาคต แต่อย่างไรก็ดีข้อจำกัดในเรื่องรูปลักษณะของแมลงกินได้เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ต้องอาศัยการแปรรูปให้ไม่คงเหลือความเป็นรูปลักษณะเดิม การสกัดแยกโปรตีนเพื่อใช้เป็นส่วนผสมอาหารต่าง ๆ และรวมเข้ากับผลิตภัณฑ์อาหารที่คุ้นเคยจึงอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการ

เพิ่มการใช้ประโยชน์จากแมลงกินได้และเพิ่มการยอมรับของผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะกล่าวถึงงานวิจัยในแง่ของกระบวนการในการสกัดแยกโปรตีนออกจากแมลงกินได้ คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแมลงกินได้ และตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำแมลงกินได้ในรูปแบบต่าง ๆ ไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่คุ้นเคย

กระบวนการในการสกัดโปรตีนจากแมลงกินได้

กระบวนการในการสกัดโปรตีนจากแมลงอาจมีวิธีการที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแมลง แต่อย่างไรก็ตามจะประกอบไปด้วยกระบวนการที่สำคัญ 5 กระบวนการ ดังที่ Gravel และคณะ⁽⁸⁾ ได้อธิบายไว้โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กระบวนการลดขนาด

แมลงจะถูกทำแห้งก่อนกระบวนการลดขนาดเพื่อให้การลดขนาดทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และได้ผงแมลงที่มีความละเอียดมากที่สุด กระบวนการทำแห้งสามารถใช้ได้หลายวิธีการ เช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำแห้งโดยการอบ เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแล้วแมลงจะถูกบดและร่อนเป็นผงละเอียด ซึ่งในกระบวนการนี้มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการสกัดได้ของโปรตีนเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของผงแมลงทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปสกัดโปรตีนออกจากผงแมลงได้ดีขึ้น⁽⁹⁾

2. กระบวนการกำจัดไขมันออกจากผงแมลงกินได้

ผงแมลงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งและลดขนาดแล้วจะถูกนำมากำจัดไขมัน ซึ่งการกำจัดไขมันส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการสกัด

โปรตีนและความบริสุทธิ์ของโปรตีน เนื่องจากไขมันจะปะปนอยู่ในเนื้อของแมลงและยังคงเหลืออยู่ภายหลังกระบวนการทำแห้งและลดขนาด ไขมันมีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งปฏิสัมพันธ์ระหว่างไขมันและโปรตีนจะทำให้ความสามารถในการละลายได้ของโปรตีนต่ำลง นอกจากนี้กระบวนการกำจัดไขมันยังทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนเพิ่มสูงขึ้น Bußler และคณะ⁽⁹⁾ รายงานว่า การกำจัดไขมันด้วยเฮกเซน (hexane) ในหนอนนกและหนอนแมลงวันลาย ทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 57.8 เป็นร้อยละ 64.6 และร้อยละ 34.7 เป็นร้อยละ 44.9 ตามลำดับ การสกัดไขมันด้วยเฮกเซนมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสกัดไขมันได้สูง อย่างไรก็ตามนอกจากเฮกเซนแล้วนั้นตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ มีความปลอดภัย และราคาถูกอย่างเอทานอลก็สามารถนำมาใช้สกัดไขมันทดแทนเฮกเซนได้⁽¹⁰⁾ อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าวอาจส่งผลให้สูญเสียโปรตีนบางส่วนเนื่องจากถูกสกัดออกไปด้วยความจำเพาะทางชีวภาพระหว่างโมเลกุลของโปรตีนกับตัวทำละลาย⁽¹¹⁾ นอกจากนี้วิธีการสกัดไขมันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์แล้วนั้น วิธีการสกัดไขมันอื่น ๆ ที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เพียงเล็กน้อย หรือแทบไม่ใช้ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง วิธีการสกัดไขมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (supercritical CO₂) เป็นวิธีการที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสกัดไขมันได้สูงถึงร้อยละ 95 ในตัวอย่างหนอนนก แต่วิธีการนี้ยังมีต้นทุนสูงในระดับอุตสาหกรรม⁽¹²⁾

3. การทำละลายและแยกโปรตีนออกจากแมลงกินได้

โปรตีนแมลงมักถูกแยกออกจากผงแมลงที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วโดยการทำให้ละลายในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างหรือไอออนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อควบคุมความสามารถในการละลายได้ของโปรตีน การละลายโปรตีนในสารละลายที่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างจะอาศัยหลักการปรับให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายออกจากจุดไอโซอิเล็กทริก (pI) ซึ่งจะทำให้บริเวณสายของโปรตีนเกิดประจุไฟฟ้า เกิดแรงผลักระหว่างสายโปรตีนจึงส่งผลให้โปรตีนละลายได้ในสารละลาย⁽¹³⁾ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่จุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนในอาหารส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4 ถึง 5 นอกจากนี้อีกวิธีการหนึ่งคือการปรับความเข้มข้นของไอออนให้สารละลายมีความเข้มข้นไอออนต่ำ ๆ (0.5-1 M) ไอออนของเกลือจะทำหน้าที่เป็นเกราะ (shield) อยู่บนโปรตีนที่มีประจุตรงข้าม จึงช่วยเสริมปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับน้ำทำให้โปรตีนละลายอยู่ในสารละลายได้ดีขึ้น⁽¹⁴⁾ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เกลือพาละลาย (salting-in) เมื่อโปรตีนแมลงกินได้ละลายอยู่ในสารละลายอย่างสมบูรณ์แล้วนั้น สารละลายดังกล่าวจะถูกหมุนเหวี่ยงและค่อย ๆ เทสารละลายส่วนใสออก สารละลายส่วนใสที่ได้จะประกอบไปด้วยโปรตีนและสารที่สามารถละลายในสารละลายได้ ในขณะที่ส่วนตะกอนจะประกอบไปด้วยพอลิแซ็กคาไรด์หรือสารอื่น ๆ ที่ไม่สามารถละลายได้ ซึ่งตะกอนส่วนนี้จะถูกทิ้งไป สารละลายโปรตีนที่ได้จะถูกนำมาแยกเฉพาะโปรตีนออกจากตัวทำละลาย วิธีการที่มีการใช้กัน

อย่างแพร่หลายมากที่สุดคือการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายโปรตีนให้เข้าใกล้จุดไอโซอิเล็กทริก ซึ่งที่ค่าความเป็นกรด-ด่างดังกล่าวจะทำให้ประจุสุทธิบนสายของโปรตีนเท่ากับศูนย์ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนเกิดการรวมตัวกัน (aggregation) และตกตะกอน (precipitation) โปรตีนจึงตกตะกอนแยกตัวออกจากสารละลาย⁽¹³⁾ Purschke และคณะ⁽¹²⁾ รายงานว่า โปรตีนที่สกัดได้จากตั๊กแตนโลกัสตา (*Locusta migratoria*) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณร้อยละ 51.7 และมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 82.3 กระบวนการสกัดโปรตีนดังกล่าวยังถูกนำมาใช้ในการสกัดโปรตีนจากหนอนนกซึ่งทำให้ได้โปรตีนความบริสุทธิ์ร้อยละ 75⁽¹⁰⁾ และ 83.03⁽¹⁵⁾ นอกจากวิธีการแยกโปรตีนออกจากสารละลายโดยการตกตะกอนที่จุดไอโซอิเล็กทริกแล้วนั้น วิธีการเกลือพาดตกตะกอน (salting-out) สามารถนำมาใช้เพื่อแยกโปรตีนออกจากสารละลายได้เช่นกันแต่ได้รับความนิยมน้อยกว่า วิธีการนี้จะใช้หลักการในการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนในสารละลายโปรตีนจนถึงจุดที่น้ำอิสระไม่สามารถที่จะทำละลายเกลือได้จึงเป็นการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างโปรตีนทำให้เกิดการรวมตัวของโปรตีนและตกตะกอน⁽¹³⁾ นอกจากทั้ง 2 วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นสารละลายโปรตีนสามารถนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อกำจัดน้ำออกจากโปรตีนหรือทำการแยกโปรตีนด้วยเมมเบรนแทนการตกตะกอนโปรตีน ซึ่งการแยกโปรตีนด้วยเมมเบรนนี้เป็นกระบวนการที่ไม่รุนแรง (mild process) เมื่อเทียบกับการตกตะกอนโปรตีน เนื่องจากวิธีการนี้

จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน (denature)

4. การทำบริสุทธิ์โปรตีนแมลงกินได้

โปรตีนที่ได้จากกระบวนการสกัดแยกโปรตีนสามารถนำมาทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นด้วยวิธีการทางโครมาโทกราฟี ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการทำบริสุทธิ์โปรตีน วิธีการทางโครมาโทกราฟีอาศัยความสัมพันธ์ของความแตกต่างของโปรตีนกับเฟสคงที่ ซึ่งวิธีการทำบริสุทธิ์โปรตีนโดยโครมาโทกราฟียังไม่ถูกนำมาใช้ในการทำบริสุทธิ์โปรตีนแมลงสำหรับนำไปใช้ในอาหารแต่มีการนำไปใช้แยกโปรตีนแมลงไอโซเลทเพื่อใช้ในการแพทย์ ตัวอย่างเช่น Francis และคณะ⁽¹⁶⁾ ทำบริสุทธิ์อาร์จินีนไคเนส (arginine kinase) ซึ่งเป็นสารก่อภูมิแพ้ที่สำคัญจากหนอนนกโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange chromatography) และ Strobl และคณะ⁽¹⁷⁾ แยกเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) จากหนอนนก โดยใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับโครมาโทกราฟีแบบแอฟฟินิตี (affinity) และโครมาโทกราฟีที่ใช้การคัดเลือกลำดับขนาด (size exclusion chromatography)

5. การทำแห้งโปรตีนแมลงกินได้

การทำแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้ตั้งแต่ขั้นตอนแรกในการทำแห้งผงแมลงหรือขั้นตอนในการทำแห้งโปรตีนคอนเซนเทรต หรือโปรตีนไอโซเลท เทคนิคในการทำแห้งมีมากมายในอุตสาหกรรมอาหารอย่างเช่น การอบแห้งด้วยเตาอบ การอบแห้งด้วยฟลูอิดไชเบด และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ วิธีการทำแห้งที่แตกต่างกันสามารถ

นำมาใช้ได้ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง เช่น การทำแห้งโปรตีนแมลงด้วยเตาอบส่วนใหญ่ใช้อุณหภูมิ 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาดั้งแต่ 7 ถึง 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่⁽¹⁸⁾ การทำแห้งด้วยไมโครเวฟส่วนใหญ่จะใช้ที่ 0.5 ถึง 2 กิโลวัตต์ เป็นเวลาดั้งแต่ 30 วินาที ถึง 20 นาที กระบวนการทำแห้งอื่น ๆ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) ถูกใช้ในการทำแห้งสารละลายโปรตีน โดยเทคนิคนี้ตัวอย่างสารละลายโปรตีนจะถูกพ่นผ่านหัวฉีดแรงดันสูง (atomizer) ให้กลายเป็นหยดเล็ก ๆ และถูกพ่นผ่านอากาศร้อนจึงทำให้ตัวอย่างกลายเป็นผงแห้ง⁽¹³⁾ แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยยังไม่มีนำมาใช้ในการทำแห้งโปรตีนแมลง

คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแมลงในอาหาร

1. ความสามารถในการละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำเป็นหนึ่งในคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญในระบบอาหาร เช่นเดียวกับคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น การเกิดโฟม การเกิดเจล และการเกิดอิมัลชัน ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของโปรตีนแมลงขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยภายในของโปรตีนแมลงและปัจจัยภายนอก ปัจจัยภายในของโปรตีนแมลง ได้แก่ ชนิดและโครงสร้างของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบ ขนาดของโปรตีน และโครงสร้างสามมิติของโปรตีน ปัจจัยภายนอก ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ⁽¹⁹⁾ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและน้ำเป็นตัวกำหนดความสามารถในการละลายของโปรตีน การมีกรดอะมิโนที่มีประจุลบและมีขั้วอยู่บนพื้นผิวของโปรตีนจะเพิ่มความสามารถ

ในการละลายได้ของโปรตีนแมลง ในขณะที่กรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง⁽¹⁹⁾ โครงสร้างโปรตีนยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายโดยโครงสร้างของโปรตีนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำและทำให้เกิดการละลายได้มากที่สุด การลดขนาดโปรตีนยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการละลายของโปรตีนได้ โดยการไฮโดรไลซิสจะเพิ่มแรงผลักระหว่างโมเลกุลของโปรตีนทำให้เกิดช่องว่างที่โมเลกุลน้ำสามารถแทรกผ่านโมเลกุลโปรตีนได้ นอกจากนี้การไฮโดรไลซิสจะทำให้เกิดการปลดปล่อยชิ้นส่วนเปปไทด์ที่มีขนาดเล็กกว่าซึ่งมีกลุ่มที่แตกตัวได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น⁽²⁰⁾ การไฮโดรไลซิสช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของโปรตีนตักแตนและจิ้งหรีดทองแดงลาย (*Grylloides sigillatus*) ข้อจำกัดของการไฮโดรไลซิสอาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่บางอย่างของโปรตีนแมลง เช่น คุณสมบัติการเกิดเจล ความเสถียรของโฟมและอิมัลชัน เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการไฮโดรไลซิสและเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซิส⁽²¹⁾ อย่างไรก็ตามปัจจัยภายนอกสามารถเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายของโปรตีนได้ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของโปรตีนจนถึงจุดที่โปรตีนถูกทำให้เสียสภาพ ที่อุณหภูมิดังกล่าวกรดอะมิโนไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่อยู่ด้านในของสายโปรตีนถูกคลายออก ทำให้โปรตีนรวมตัวกันและตกตะกอนมากขึ้น ความสามารถในการละลายของโปรตีนจึงลดลง⁽²²⁾ ปรากฏการณ์นี้เช่นเดียวกับโปรตีนในอาหารทั่วไป เช่น โปรตีนนม และโปรตีนไข่ เป็นต้น Bußler และ

คณะ⁽⁹⁾ รายงานความสามารถในการละลายของโปรตีนแมลงวัน (*Hermetia illucens*) เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายยังแตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่โปรตีนแมลงละลายอยู่ ที่ความเข้มข้นของไอออนต่ำ ไอออนจะทำหน้าที่เป็นเกราะปกป้องโปรตีนจากแรงดึงดูดซึ่งกันและกันจึงช่วยส่งเสริมให้โปรตีนมีความสามารถในการละลายได้ดีขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของไอออนสูง การแข่งขันที่รุนแรงระหว่างเกล็ดและโปรตีนเพื่อแย่งชิงโมเลกุลน้ำทำให้โปรตีนละลายน้ำได้น้อยลง⁽²²⁾ นอกจากนี้ความสามารถในการละลายยังขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อใกล้จุดไอโซอิเล็กทริก ประจุสุทธิของโปรตีนเข้าใกล้จึงส่งผลเสียต่อปฏิกิริยาระหว่างน้ำและโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนตกตะกอน ในทางกลับกันค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นต่างจะทำให้พื้นผิวโปรตีนมีประจุซึ่งผลักกันและเพิ่มความสามารถในการละลาย โปรตีนเข้มข้นหนอนนก (*Temebrio molitor*) แมลงวัน (*Hermetia illucens*) ตั๊กแตน (*Locusta migratoria*) ตั๊กแตนปาทั้งกา (*Patanga succinta*) ตั๊กแตนคอนดราคริส (*Chondracris rosea*) และตั๊กแตนทะเลทราย (*Schistocerca gregaria*) มีความสามารถในการละลายต่ำสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 และความสามารถในการละลายสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นต่าง⁽⁹⁾

2. การทำให้เกิดอิมัลชัน

อิมัลชันคือส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันของของเหลวสองชนิดที่ไม่สามารถผสมกันได้ ไม่ว่าจะเป็นหยดน้ำมันในน้ำหรือหยดน้ำในน้ำมัน⁽²³⁾ ลักษณะแอมฟิฟิลิก (amphiphilic) ของโปรตีนที่มีทั้งส่วนที่

ชอบน้ำและส่วนที่ชอบไขมัน จึงทำให้โปรตีนสามารถทำให้อิมัลชันอาหารเสถียรขึ้นได้โดยการลดแรงดึงผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างน้ำมันกับน้ำ คุณสมบัติเชิงหน้าที่นี้มีประโยชน์ในหลายผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ มายองเนส น้ำสลัดอาหารแช่แข็ง และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ ปัจจัยภายในและภายนอกโปรตีนมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความเสถียรของอิมัลชันขนาดของโปรตีนโดยโปรตีนขนาดเล็กจะสามารถแพร่เข้าสู่บริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำมันได้ดีกว่าโปรตีนขนาดใหญ่จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดอิมัลชันที่ดี แต่มีเสถียรภาพของอิมัลชันต่ำ ในขณะที่โปรตีนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการแพร่เข้าสู่บริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำมันได้ต่ำกว่าโปรตีนขนาดเล็ก แต่เมื่อโปรตีนขนาดใหญ่แพร่เข้าไประหว่างรอยต่อของน้ำมันกับน้ำแล้วนั้นจะส่งผลให้มีเสถียรภาพของอิมัลชันเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับความสามารถในการละลายโดยคุณสมบัติของอิมัลชันจะดีขึ้นเนื่องจากมีกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำอยู่บนพื้นผิวของโปรตีน ซึ่งจำเป็นต่อการดูดซับกับน้ำมันในอิมัลชัน ปัจจัยภายนอก เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง ความเข้มข้นของไอออนต่ำ และการไฮโดรไลซิสบางส่วนยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการเกิดอิมัลชันของโปรตีน⁽²⁴⁾ โปรตีนหนอนนกและโปรตีนจิ้งหรีด มีสถานะค่าความเป็นกรด-ด่างและความเข้มข้นของไอออนที่เหมาะสม มีคุณสมบัติในการเกิดอิมัลชันใกล้เคียงกับพืชตระกูลถั่ว⁽²⁵⁾

3. การทำให้เกิดโฟม

โฟมในอาหารคือลักษณะที่ฟองอากาศที่ถูกกักขังอยู่ในองค์ประกอบอาหารที่เป็นของเหลวและคงตัวอยู่ได้โดยโปรตีนจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความ

เสถียรอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว เช่นเดียวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่อื่น ๆ คุณสมบัติการเกิดโฟมของโปรตีนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น โครงสร้างของโปรตีน เนื่องจากการก่อตัวของโพนหมายถึง การคลายตัวของโปรตีนและถูกดูดซับบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำ โปรตีนทรงกลมและหนาแน่นจึงมักมีประสิทธิภาพในการเกิดโพนน้อยกว่าโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและยืดหยุ่น ในทางกลับกันคุณสมบัติในการเกิดโพนที่ดีไม่ได้หมายความว่าความเสถียรของโพนที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบอาหาร โปรตีนทรงกลมที่เชื่อมโยงกันอย่างแน่นหนามีแนวโน้มที่จะสร้างฟิล์มที่ทนทานกว่า ทำให้โพนที่ได้มีความทนทานและความเสถียรดีกว่าโปรตีนที่มีความยืดหยุ่น การที่โปรตีนมีกรดอะมิโนชนิดที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการเกิดโพนได้ดี อย่างไรก็ตาม Zielińska และคณะ⁽²⁵⁾ รายงานว่าไขมันมีผลกระทบเชิงลบต่อการเกิดโพนของโปรตีน โดยโปรตีนจิ้งหรีดที่ผ่านกระบวนการสกัดไขมันแล้วมีความสามารถในการเกิดโพนได้ดีกว่าและโพนที่ได้มีความเสถียรมากกว่าโปรตีนของแมลงดังกล่าวที่ยังไม่ได้กำจัดไขมัน ในทางกลับกันการไฮโดรไลซิสมีผลกระทบเชิงบวกต่อคุณสมบัติการเกิดโพน โดยการไฮโดรไลซิสทำให้โปรตีนมีขนาดเล็กลงจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับของเปปไทด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสออกมาที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลวและอากาศจึงทำให้ความสามารถในการเกิดโพนดีขึ้น⁽²⁶⁾ นอกจากนี้ในสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของไอออนที่เหมาะสม โปรตีนแมลงกินได้บางชนิดจะมี

คุณสมบัติในการเกิดโพนที่ดีขึ้นและสามารถนำมาใช้ในสูตรอาหารได้

4. การทำให้เกิดเจล

การเกิดเจลของโปรตีนคือโปรตีนที่จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างซึ่งสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างร่างแห⁽²⁷⁾ เช่นเดียวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในระบบอาหารอื่น ๆ ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ การเกิดเจลขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในหลายประการ เช่น ปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ความร้อนมีความสำคัญในการสร้างเจลเนื่องจากความร้อนส่งเสริมให้โปรตีนคลายตัว (unfold) และเสียสภาพ (denature) อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrange) และการรวมตัว (aggregate) อย่างช้า ๆ จึงทำให้เกิดเจลตามต้องการในขั้นตอนการทำความเย็น⁽²⁸⁾ Yi และคณะ⁽²⁹⁾ ศึกษาความสามารถในการเกิดเจลของโปรตีนเข้มข้นของแมลงกินได้ 5 ชนิด ได้แก่ หนอนนก หนอนนกยักษ์ (*Zophobas morio*) ตัวงดำ (*Alphitobius diaperinus*) จิ้งหรีดทองแดงลาย (*Acheta domesticus*) และแมลงสาบดุกเบีย (*Blaptica dubia*) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 สามารถเกิดเจลได้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ระหว่าง 51.2-63.2 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการทดแทนด้วยโปรตีนแมลง

Kim และคณะ⁽³⁰⁾ ศึกษาการทดแทนเนื้อหมูไม่ติดมันด้วยหนอนนกหรือหนอนไหมในรูปของผงแมลง ผงแมลงกำจัดไขมัน และโปรตีนไฮโดรไลเสต ร้อยละ 10 โดยพบว่า ไส้กรอกที่มีการทดแทนเนื้อหมูด้วยแมลงมีความแข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม การเติมผงแมลงในไส้กรอกทำให้สูญเสียความชื้นในไส้กรอกอิมัลชันอย่างมากจึงส่งผลให้เนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป Scholliers และคณะ⁽³¹⁾ ได้ใช้ผงหนอนยักษ์ (*Zophobas morio*) ทดแทนเนื้อหมูบางส่วน (ร้อยละ 5-50) ในการผลิตไส้กรอกปรุงสุกและอธิบายว่า การใช้ผงหนอนยักษ์ ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 ช่วยลดการสูญเสียในการปรุงอาหารและมีเสถียรภาพของอิมัลชันดีเทียบเท่าไส้กรอกที่ทำจากเนื้อหมูร้อยละ 100 อย่างไรก็ตาม การทดแทนเนื้อด้วยผงหนอนยักษ์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ลดลง ในขณะที่ Smetana และคณะ⁽³²⁾ รายงานการทดแทนโปรตีนถั่วด้วยโปรตีนด้วงดำ (*Alphitobius diaperinus*) อัตราส่วนร้อยละ 40 ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมความชื้นสูงที่มีลักษณะเส้นใยแข็งแรงและมีเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ Kim และคณะ⁽³³⁾ ผสมโปรตีนแมลงกับโปรตีนพืชในอัตราส่วนที่ต่างกันเพื่อทำเป็นเนื้อเทียม โดยสูตรที่ประกอบด้วยโปรตีนแมลงร้อยละ 100 มีกรดอะมิโนจำเป็นสูงสุดรวมถึงมีเสถียรภาพต่อความร้อนสูงสุด โดยมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสภาพและเอนทัลปีสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีโปรตีนพืชเป็นส่วนประกอบ⁽³⁴⁾ การทดแทนด้วยโปรตีนหนอนนก ร้อยละ 30 มีความสามารถในการละลายและการย่อย

ของโปรตีน ความสามารถในการกักเก็บน้ำ และปฏิกิริยาต่อสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นตามปริมาณโปรตีนแมลงที่เพิ่มขึ้น การประเมินทางประสาทสัมผัสในแง่ของการยอมรับในรสชาติของความเป็นเนื้อ กลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมโปรตีนแมลง⁽³⁵⁾ Azzollini และคณะ⁽³⁶⁾ ศึกษาการเติมผงแมลงหนอนนกในขนมขบเคี้ยวจากธัญพืชพบว่า การเติมผงแมลงช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนและเพิ่มการย่อยได้ของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณผงแมลงร้อยละ 10 ไม่ทำให้คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของแมลงแตกต่างไปจากขนมขบเคี้ยวจากธัญพืชที่ไม่มีการเติมผงแมลง ในขณะที่การเติมผงแมลงร้อยละ 20 ทำให้เนื้อสัมผัสแย่ง นอกจากนั้นการเติมผงผักแทนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลและรสชาติเฉพาะของผงผักแทนซึ่งส่งผลเชิงลบต่อการยอมรับของผู้บริโภค⁽³⁷⁾

การผสมผงจิ้งหรีดทองแดงลาย (*Acheta domesticus*) กับแป้งสาลีในการทำขนมปังทำให้ขนมปังที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้น แต่ส่งผลเสียต่อความแข็งของขนมปังอีกด้วย⁽³⁸⁾ González และคณะ⁽³⁹⁾ ศึกษาเปรียบเทียบการเติมผงแมลง ร้อยละ 5 ได้แก่ แมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) จิ้งหรีดทองแดงลาย (*Acheta domesticus*) และหนอนนกในแป้งขนมปังโดยพบว่า จิ้งหรีดทองแดงลาย มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำขนมปัง เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่และรสชาติที่เหมาะสมกับการเป็นขนมปังมากที่สุดแมลงทั้งสามชนิด ขนมปังที่เสริมด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 10 ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสและสี รวมถึงปริมาณร่จำเพาะที่ใกล้เคียงกับขนมปังที่ทำด้วยแป้งสาลี นอกจากนี้ยัง

มีปริมาณโปรตีนและไฟเบอร์ที่สูงอีกด้วย⁽³⁹⁾ ในทำนองเดียวกัน การเสริมด้วยผงตักแตน (*Schistocerca gregaria*) ทำให้ขนมปังมีปริมาณโปรตีนและไฟเบอร์สูงขึ้น มีเนื้อสัมผัส สี และรสชาติที่คล้ายกับขนมปังที่ไม่มีการเติมผงแมลง แต่ส่งผลต่อคะแนนความชอบเรื่องกลิ่นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่มีการเติมผงแมลง⁽⁴⁰⁾ Roncolini และคณะ⁽⁴¹⁾ รายงานว่า การเสริมผงหนอนนก ในขนมปังนอกจากจะช่วยเพิ่มปริมาณ

โปรตีนและกรดอะมิโนของขนมปังแล้ว สามารถช่วยเพิ่มปริมาณจำเพาะและความนุ่มของขนมปังเมื่อเทียบกับขนมปังสูตรควบคุม อย่างไรก็ตามขนมปังสูตรควบคุมได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสมากกว่า นอกจากนี้การเสริมผงจิ้งหรีดในสูตรขนมปังที่ไม่มีกลูเตน ทำให้มีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี⁽⁴²⁾ ตัวอย่างการศึกษาการทดแทนแมลงกินได้ในผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Physical and chemical characteristic by incorporating insect protein and their application

Insect	Food product	Outcomes	Reference
<i>Alphitobius diaperinus</i>	Meat analogs	- Protein composition similar to meat - Hardness texture	(32)
<i>Tenebrio molitor</i> L.	Bread	- Increase protein and fat content - Darker appearance	(43)
<i>Arthrospira maxima</i>	Meat sausage	- Enhance nutrition quality - Texture unchanged - Reduce color parameter	(44)
<i>Ruspolia differens</i>	Cookies	- Higher protein, fat and energy - High level of isoleucine and leucine - Contain omega-3	(45)

บทสรุป

เพื่อตอบสนองความต้องการด้านอาหารในอนาคต แมลงกินได้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีศักยภาพสูง ด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่ครบถ้วน กระบวนการเพาะเลี้ยงที่ใช้เวลาสั้น และความ

ต้องการพื้นที่เพาะเลี้ยงน้อย อย่างไรก็ตามข้อจำกัดด้านภาพลักษณ์อาจเป็นอุปสรรคต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น การสกัดโปรตีนจากแมลงจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มโอกาสในการนำ

แมลงมาใช้เป็นแหล่งอาหารได้กว้างขวางยิ่งขึ้น โปรตีนแมลงที่สกัดได้ไม่เพียงช่วยเสริมคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ยังมีบทบาทสำคัญในด้านคุณสมบัติทางฟังก์ชันของอาหารอีกด้วย ความหลากหลายของชนิดแมลง กระบวนการสกัดโปรตีน ตลอดจนเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพโปรตีน ล้วนมีส่วนช่วยให้โปรตีนแมลงสามารถพัฒนาให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับ

ผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายประเภท ด้วยศักยภาพดังกล่าว โปรตีนแมลงจึงมีแนวโน้มที่จะสามารถต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมได้ อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในด้านการกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม ต้นทุนการผลิต ความยั่งยืน และความปลอดภัยของผู้บริโภค เพื่อให้สามารถนำโปรตีนแมลงมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างแพร่หลายและยั่งยืนในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Rumpold BA, Schlüter OK. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol Nutr Food Res.* 2013;57(5):802-23.
2. Psarianos M, Aghababaei F, Schlüter OK. Bioactive compounds in edible insects: Aspects of cultivation, processing and nutrition. *Food Research International.* 2025;203:115802.
3. Orkusz A. Edible insects versus meat-nutritional comparison: knowledge of their composition is the key to good health. *Nutrients.* 2021;13(4).
4. Santiago LA, Queiroz LS, Tavares GM, Feyissa AH, Silva NFN, Casanova F. Edible insect proteins: how can they be a driver for food innovation? *Curr Opin Food Sci.* 2024;58:101195.
5. van Huis A. Edible insects are the future? *The Proceedings of the Nutrition Society.* 2016;75(3):294-305.
6. Huang W, Wang C, Chen Q, Chen F, Hu H, Li J, et al. Physicochemical, functional, and antioxidant properties of black soldier fly larvae protein. *J Food Sci.* 2024;89(1):259-75.
7. Tomotake H, Katagiri M, Yamato M. Silkworm Pupae (*Bombyx mori*) Are New Sources of High Quality Protein and Lipid. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo).* 2010;56(6):446-8.
8. Gravel A, Doyen A. The use of edible insect proteins in food: Challenges and issues related to their functional properties. *IFSET.* 2020;59:102272.
9. Bußler S, Rumpold BA, Jander E, Rawel HM, Schlüter OK. Recovery and techno-functionality of flours and proteins from two edible insect species: Meal worm (*Tenebrio molitor*) and black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Heliyon.* 2016;2(12):e00218.
10. Zhao X, Vázquez-Gutiérrez JL, Johansson DP, Landberg R, Langton M. Yellow mealworm protein for food purposes - extraction and functional properties. *PLOS ONE.* 2016;11(2):e0147791.
11. Yang R, Zhao X, Kuang Z, Ye M, Luo G, Xiao G, et al. Optimization of antioxidant peptide production in the hydrolysis of silkworm (*Bombyx mori* L.) pupa protein using response surface methodology. *J Food Agric Environ.* 2013;11:952-6.
12. Purschke B, Brüggem H, Scheibelberger R, Jäger H. Effect of pre-treatment and drying method on physico-chemical properties and dry fractionation behaviour of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Eur Food Res Technol.* 2018;244(2):269-80.
13. Boye JL, Barbana C. Protein processing in food and bioproduct manufacturing and techniques for analysis. *J Food Ind Bioprod Bioproc.* 2012. p. 85-113.
14. Duong-Ly KC, Gabelli SB. Chapter Seven - Salting out of proteins using ammonium sulfate precipitation. In: Lorsch J, editor. *Methods in Enzymology.* 541: Academic Press; 2014. p. 85-94.



15. Azagoh C, Ducept F, Garcia R, Rakotozafy L, Cuvelier ME, Keller S, et al. Extraction and physicochemical characterization of *Tenebrio molitor* proteins. *Food Res Int.* 2016;88:24-31.
16. Francis F, Doyen V, Debaugnies F, Mazzucchelli G, Caparros R, Alabi T, et al. Limited cross reactivity among arginine kinase allergens from mealworm and cricket edible insects. *Food Chem.* 2019;276:714-8.
17. Strobl S, Gomis-Rüth F-X, Maskos K, Frank G, Huber R, Glockshuber R. The α -amylase from the yellow meal worm: complete primary structure, crystallization and preliminary X-ray analysis. *FEBS Letters.* 1997;409(1):109-14.
18. Melgar-Lalanne G, Hernández-Álvarez A-J, Salinas-Castro A. Edible insects processing: traditional and innovative technologies. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2019;18(4):1166-91.
19. Kramer Ryan M, Shende Varad R, Motl N, Pace CN, Scholtz JM. Toward a molecular understanding of protein solubility: increased negative surface charge correlates with increased solubility. *Biophys J.* 2012;102(8):1907-15.
20. Gould J, Wolf B. Interfacial and emulsifying properties of mealworm protein at the oil/water interface. *Food Hydrocoll.* 2018;77:57-65.
21. Wouters AGB, Rombouts I, Fierens E, Brijs K, Delcour JA. Relevance of the functional properties of enzymatic plant protein hydrolysates in food systems. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2016;15(4):786-800.
22. Sathe SK, Zaffran VD, Gupta S, Li T. Protein Solubilization. *Journal of the American Oil Chemists' Society.* 2018;95(8):883-901.
23. Sharif HR, Williams PA, Sharif MK, Abbas S, Majeed H, Masamba KG, et al. Current progress in the utilization of native and modified legume proteins as emulsifiers and encapsulants – A review. *Food Hydrocoll.* 2018;76:2-16.
24. Lam RSH, Nickerson MT. Food proteins: A review on their emulsifying properties using a structure–function approach. *Food Chem.* 2013;141(2):975-84.
25. Zielińska E, Karaś M, Baraniak B. Comparison of functional properties of edible insects and protein preparations thereof. *LWT.* 2018;91:168-74.
26. Liceaga-Gesualdo AM, Li-Chan ECY. Functional properties of fish protein hydrolysate from herring (*Clupea harengus*). *J Food Sci.* 1999;64(6):1000-4.
27. Ziegler GR, Foegeding EA. The Gelation Of proteins paper No. 8255 in the journal series of the Pennsylvania Agricultural Experiment Station. In: Kinsella JE, editor. *Advances in Food and Nutrition Research.* 34: Academic Press; 1990. p. 203-98.
28. Totosaus A, Montejano JG, Salazar JA, Guerrero I. A review of physical and chemical protein-gel induction. *Int J Food Sci Technol.* 2002;37(6):589-601.
29. Yi L, Lakemond CMM, Sagis LMC, Eisner-Schadler V, van Huis A, van Boekel MAJS. Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chem.* 2013;141(4):3341-8.
30. Kim H-W, Setyabrata D, Lee YJ, Jones OG, Kim YHB. Pre-treated mealworm larvae and silkworm pupae as a novel protein ingredient in emulsion sausages. *IFSET.* 2016;38:116-23.
31. Scholliers J, Steen L, Fraeye I. Partial replacement of meat by superworm (*Zophobas morio* larvae) in cooked sausages: Effect of heating temperature and insect:Meat ratio on structure and physical stability. *IFSET.* 2020;66:102535.
32. Smetana S, Ashtari Larki N, Pernutz C, Franke K, Bindrich U, Toepfl S, et al. Structure design of insect-based meat analogs with high-moisture extrusion. *J Food Eng.* 2018;229:83-5.
33. Kim T-K, Yong HI, Chun HH, Lee M-A, Kim Y-B, Choi Y-S. Changes of amino acid composition and protein technical functionality of edible insects by extracting steps. *J Asia-Pac Entomol.* 2020;23(2):298-305.
34. Kim T-K, Yong HI, Cha JY, Park S-Y, Jung S, Choi Y-S. Drying-induced restructured jerky analog developed using a combination of edible insect protein and textured vegetable protein. *Food Chem.* 2022;373:131519.
35. Cho SY, Ryu GH. Effects of mealworm larva composition and selected process parameters on the physicochemical properties of extruded meat analog. *J Food Sci Nutr.* 2021;9(8):4408-19.



36. Azzollini D, Derossi A, Fogliano V, Lakemond CMM, Severini C. Effects of formulation and process conditions on microstructure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. IFSET. 2018;45:344-53.
37. Cuj-Laines R, Hernández-Santos B, Reyes-Jaquez D, Delgado-Licon E, Juárez-Barrientos JM, Rodríguez-Miranda J. Physicochemical properties of ready-to-eat extruded nixtamalized maize-based snacks enriched with grasshopper. Int J Food Sci Technol. 2018;53(8):1889-95.
38. Osimani A, Milanović V, Cardinali F, Roncolini A, Garofalo C, Clementi F, et al. Bread enriched with cricket powder (*Acheta domestica*): A technological, microbiological and nutritional evaluation. IFSET. 2018;48:150-63.
39. González CM, Garzón R, Rosell CM. Insects as ingredients for bakery goods. A comparison study of *H. illucens*, *A. domestica* and *T. molitor* flours. IFSET. 2019;51:205-10.
40. Haber M, Mishyna M, Martinez JJI, Benjamin O. The influence of grasshopper (*Schistocerca gregaria*) powder enrichment on bread nutritional and sensorial properties. LWT. 2019;115:108395.
41. Roncolini A, Milanović V, Cardinali F, Osimani A, Garofalo C, Sabbatini R, et al. Protein fortification with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) powder: Effect on textural, microbiological, nutritional and sensory features of bread. PLOS ONE. 2019;14(2):e0211747.
42. da Rosa Machado C, Thys RCS. Cricket powder (*Gryllus assimilis*) as a new alternative protein source for gluten-free breads. IFSET. 2019;56:102180.
43. Gantner M, Król K, Piotrowska A, Sionek B, Sadowska A, Kulik K, et al. Adding mealworm (*Tenebrio molitor* L.) powder to wheat bread: effects on physicochemical, sensory and microbiological qualities of the end-product. Molecules. 2022;27(19):6155.
44. Acateca-Hernández MI, Hernández-Cázares AS, Hidalgo-Contreras JV, Jiménez-Munguía MT, Rios-Corripio MA. Evaluation of the functional properties of a protein isolate from *Arthrospira maxima* and its application in a meat sausage. Heliyon. 2024;10(13):e33500.
45. Ochieng BO, Anyango JO, Khamis FM, Ekesi S, Egonyu JP, Subramanian S, et al. Nutritional characteristics, microbial loads and consumer acceptability of cookies enriched with insect (*Ruspolia differens*) meal. LWT. 2023;184:115012.