วารสารเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 (2568)
JOURNAL OF HOME ECONOMICS TECHNOLOGY AND INNOVATION Vol. 4 No. 1 2025
ISSN 2821 – 9880 (Online)

องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโปรตีนของหนอนนก (*Tenebrio molitor*) แต่ละระยะการเจริญเติบโต เพื่อการพัฒนาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกในอนาคต

สุชัญญา สินสระน้อย[1], พรรณทิภา เล่าสัม[1,2], จริยา รอดดี[3], สุทิศา เข็มผะกา[1], ศรัญญา สุวรรณอังกูร[4], เกริกพล ลือกำลัง[5] และ ปภังกร ส่างสวัสดิ์[1*]

Chemical Composition and Protein Structure of Mealworms (*Tenebrio molitor*) at Different Growth Stages for Development as an Alternative Food Source in the Future

Suchanya Sinsranoi[1], Phanthipha Laosam[1,2], Jariya roddee[3], Sutisa Khempaka[1], Saranya Suwanangul[4], Kroekphon Luekamlang[5], and Papungkorn Sangsawad[1*]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]การวิจัยและพัฒนา สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[4]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
[5]โรงเรียนบ้านหนองแวง ตำบลโอโล อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ
[1]School of Animal Production Technology and Innovation, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology
[2]Research and Development Institute Suranaree University of Technology
[3]School of Crop Production Technology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology
[4]Program of Food Science and Technology, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University
[5]Ban Nong Waeng School, O-lo Sub-district, Phu Khiao District, Chaiyaphum Province
* Corresponding author. E-mail address: papungkorn@sut.ac.th
Received: 15th Feb 2025 ; Revised: 15th Jun 2025 ; Accepted: 20th Jun 2025
DOI : 10.60101/jhet.2025.1082

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโปรตีนของหนอนนก (*Tenebrio molitor*) ในแต่ละระยะการเจริญเติบโต ได้แก่ ตัวอ่อน (อายุ 12 สัปดาห์) ดักแด้ (อายุ 1 วัน) และตัวเต็มวัย (อายุ 10-15 วัน) เพื่อประเมินศักยภาพในการพัฒนาเป็นแหล่งอาหารทางเลือก ผลการศึกษาพบว่า ระยะดักแด้มีปริมาณโปรตีนสูงสุด (54.38 %) และมีโปรตีนกล้ามเนื้อสำคัญ เช่น Tropomyosin, Troponin และ Actin การวิเคราะห์ด้วย SDS-PAGE แสดงให้เห็นการสะสมโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็ก (10-20 kDa) ในระยะตัวเต็มวัย ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของไคติน (23.26 %) และการลดลงของไขมัน (10.41 %) การวิเคราะห์กรดไขมันพบว่า กรดโอเลอิก (C18:1n9c) เป็นกรดไขมันหลัก (46.28-49.54 %) รองลงมาคือกรดไลโนเลอิก

ISSN 2821 – 9880 (Online)

(C18:2n6c) (19.84-24.86 %) ในด้านแร่ธาตุพบการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสและกำมะถันในระยะตัวเต็มวัย (36.465 % และ 26.716 % ตามลำดับ) ขณะที่แมกนีเซียมและแคลเซียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์โครงสร้างโปรตีนด้วย FTIR และ PCA แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิที่ชัดเจน โดย β-sheet เป็นโครงสร้างหลัก (51-55 %) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าหนอนนกมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโปรตีน

คำสำคัญ: หนอนนก, แมลงกินได้, โปรตีนทางเลือก, องค์ประกอบทางเคมี, โครงสร้างโปรตีน

ABSTRACT

This study aimed to analyze the chemical composition and protein structure of mealworm (*Tenebrio molitor*) at different growth stages: larvae (12 weeks old), pupae (1 day old), and adults (10-15 days old) to evaluate their potential as an alternative food source. Results showed that the pupal stage had the highest protein content (54.38 %) with key muscle proteins such as Tropomyosin, Troponin, and Actin. SDS-PAGE analysis revealed the accumulation of small molecular weight proteins (10-20 kDa) in adults, corresponding with increased chitin content (23.26 %) and decreased fat content (10.41 %). Fatty acid analysis showed that oleic acid (C18:1n9c) was the predominant fatty acid (46.28-49.54 %), followed by linoleic acid (C18:2n6c) (19.84-24.86 %). Regarding minerals, phosphorus and sulfur increased in adults (36.465 % and 26.716 %, respectively), while magnesium and calcium decreased significantly ($p<0.05$). Protein structure analysis using FTIR and PCA demonstrated distinct changes in secondary structure, with β-sheet being the major component (51-55 %). This study demonstrates that mealworms have the potential for development as an alternative food source with high nutritional value, with growth stages significantly affecting their chemical composition and protein structure.

Keywords: Mealworm, Edible insect, Alternative protein, Chemical composition, Protein structure

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการโปรตีนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากประชากรโลกที่เติบโตอย่างรวดเร็วและการตระหนักถึงความสำคัญของโภชนาการที่สมดุล โปรตีนเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและซ่อมแซมเนื้อเยื่อของร่างกาย โดยทั่วไปแล้ว แหล่งโปรตีนหลักมาจากสัตว์ เช่น เนื้อวัว หมู ไก่ และปลา แต่การผลิตโปรตีนจากสัตว์เหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการใช้ทรัพยากรน้ำและที่ดินจำนวนมาก และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว นักวิจัยและอุตสาหกรรมอาหารทั่วโลกได้มองหาแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือ หนอนนก หรือ *Tenebrio molitor* ซึ่งเป็นแมลงที่ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะแหล่งโปรตีนที่มีคุณค่า

ISSN 2821 – 9880 (Online)

ทางโภชนาการสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตโปรตีนเนื้อสัตว์ทางด้านปศุสัตว์มีข้อจำกัดเพราะต้องใช้พื้นที่มาก และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเชิงลบอย่างมาก การผลิตแมลงกินได้มีข้อได้เปรียบ คือ ใช้พื้นที่เกษตรกรรมน้อยลงและทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยลง ดังนั้น การผลิตแมลงกินได้จึงมีความยั่งยืนมากขึ้นโดย (van Huis, 2015) ปัจจุบันแมลงที่กินได้มากกว่า 2,000 ชนิด และถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของอาหารของมนุษย์ทั่วโลก (Jongema, 2017) ตัวอย่างเช่น Coleoptera, Lepidoptera, Hymenoptera และ Orthoptera อยู่ในกลุ่มที่บริโภคมากที่สุด (Feng *et al*., 2018) จากมุมมองทางโภชนาการแมลงมีสารอาหารหลักทั้งหมดในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ (Rumpold & Schlüter, 2013) โปรตีนสูง (15–81 %, น้ำหนักแห้ง) และมีกรดอะมิโนที่จำเป็นคล้ายกับโปรตีนจากพืช (Belluco *et al*., 2013; Yi *et al*., 2013) ดังนั้นแมลงที่กินได้จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนโปรตีนจากจากสัตว์ เป็นผลให้แมลงทั้งตัว เช่น หนอนนก (*T. molitor*) และสารสกัดโปรตีนที่ได้จากหนอนนกถูกผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

หนอนนกหรือมอดรำข้าวสาลี (Mealworm) อยู่ในวงศ์ Tenebrionidae อันดับ Coleoptera นิยมเพาะเลี้ยงเป็นอาหารสัตว์เลี้ยงเศรษฐกิจ โดยมีความสำคัญในการใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์เลี้ยงชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะสัตว์เลี้ยงสวยงาม สัตว์เลื้อยคลาน รวมถึงสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กบางชนิด หนอนนกโดยธรรมชาติเป็นแมลงที่ชอบกินเมล็ดพืชหรือแป้งที่สกปรกมีเชื้อราขึ้น นอกจากนี้ยังกินรำ ขนมปัง เศษเนื้อ ขนนก และแมลงที่ตายแล้วเป็นต้น ชอบอาศัยกินอยู่ในที่มืดและที่อับชื้น การนำแมลงชนิดนี้มาเลี้ยงต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น ศัตรูและอาหารเป็นสำคัญ ส่วนการเลี้ยงหนอนนกในประเทศไทยนั้น เนื่องจากมีการปลูกข้าวสาลีน้อยมาก มีการนำข้าวสาลีจากต่างประเทศเข้ามาค่อนข้างยาก จึงมีการใช้รำข้าวจ้าวอาหารไก่กระทงเล็กพิเศษหรือหัวอาหารไก่รุ่นใดก็ได้ นอกจากนั้นยังใช้อาหารเสริมเพิ่มให้ด้วยเช่น ผักกาดขาว แตงกวา มะละกอ หรือผักอื่น ๆ ที่หาได้ในท้องถิ่นแต่ต้องปราศจากยาฆ่าแมลง (อภินันท์, 2543) หนอนนกมีโปรตีนสูงถึง 17–19 % ไขมัน 7–14 % และมีแร่ธาตุต่าง ๆ ดังนี้ ฟอสฟอรัส (P) 0.10-0.25 % แคลเซียม (Ca) 0.02-0.1 % โพแทสเซียม (K) 0.38 % แมงกานีส (Mg) 0.07 % โซเดียม (Na) 0.05 % เหล็ก (Fe) 0.48 ppm แมกนีเซียม (Mn) 0.07 ppm สังกะสี (Zn) 57 ppm ซึ่งเหมาะสมและตรงกับความต้องการแร่ธาตุของสัตว์น้ำ (ณัฏฐาและธนศักดิ์, 2548) หนอนนกเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนประมาณ 47-60 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าเนื้อวัวหรือไก่ นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วนทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ ลิวซีน ไอโซลิวซีน ไลซีน เมไธโอนีน ฟีนิลอะลานีน ทรีโอนีน ทริปโตเฟน วาลีน และฮิสติดีน ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและซ่อมแซมเนื้อเยื่อในร่างกายมนุษย์ (Yi *et al*., 2013) นอกจากโปรตีนแล้วหนอนนกยังมีไขมันที่ดีต่อสุขภาพ โดยมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFAs) เช่น กรดไลโนเลอิก (โอเมก้า-6) และกรดอัลฟาไลโนเลนิก (โอเมก้า-3) ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของโรคหัวใจและหลอดเลือด (Rumpold & Schlüter, 2013) นอกจากนี้ ยังมีแร่ธาตุสำคัญ เช่น ธาตุเหล็ก สังกะสี และแมกนีเซียม ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันและการเผาผลาญพลังงาน ในส่วนของวงจรชีวิตของหนอนนก *T. molitor* ประกอบด้วยระยะไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย ระยะไข่ ตัวเต็มวัยวางไข่สีขาวขุ่น กลมรี ผิวเรียบ ติดอยู่ตามพื้น มีเศษอาหารปกคลุม อายุไข่ 7 วัน ระยะตัวหนอน รูปร่างของหนอนนกเป็นหนอนที่มีเปลือก มีลำตัวยาวเรียวทรงกระบอกสีน้ำตาล ตัวหนอนลอกคราบ 13 ครั้ง เมื่อลอกคราบใหม่ ๆ จะมีสีขาว แล้วค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล เมื่อโตเต็มที่มีความกว้างลำตัว 0.28 - 3.2 มิลลิเมตร ยาว 29-35 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.2-0.24 กรัม มีอายุประมาณ 55-75 วัน ระยะดักแด้ หลังจากหนอนลอกคราบครั้งสุดท้ายจะกลายเป็นดักแด้สีขาว ซึ่งจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ดักแด้มีอายุ 5-7 วัน ระยะตัวเต็มวัย ตัวเต็มวัยเมื่อออกจากดักแด้ จะมีปีกสีขาว แล้วเปลี่ยนเป็นสีดำลักษณะปีกแข็ง ลำตัวสีน้ำตาลอมดำ ตัวเต็มวัยมีอายุประมาณ 60-80 วัน เริ่มผสมพันธุ์เมื่ออายุ 6-7 วัน

ISSN 2821 – 9880 (Online)

หลังจากนั้น 3-4 วัน ก็จะเริ่มวางไข่ ตัวเมีย 1 ตัว วางไข่ได้ 1-2 ฟอง/วัน หรือ 80-85 ฟอง/ตลอดวงจรชีวิต สามารถเก็บไข่ได้ถึง 11 ครั้ง

การมองหาแหล่งโปรตีนทางเลือกในศตวรรษที่ 21 เป็นเรื่องเร่งด่วนจากทั้งปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ความมั่นคงทางอาหาร และความต้องการโปรตีนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในแนวทางที่ได้รับการกล่าวถึงมากคือการใช้แมลงกินได้ เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนสำหรับมนุษย์และสัตว์ โดยในบรรดาแมลงกินได้หลากหลายชนิด หนอนนก (*T. molitor*) ได้รับความสนใจเป็นพิเศษทั้งจากภาควิชาการและอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร เนื่องจากมีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดหลายด้าน เมื่อเปรียบเทียบกับแมลงชนิดอื่นที่นำมาใช้บริโภค หนอนนกมีปริมาณโปรตีนโดยเฉลี่ยประมาณ 50–60 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับแมลงที่นิยมบริโภค เช่น จิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) และตั๊กแตน (*Locusta migratoria*) (Rumpold *et al*., 2013) อย่างไรก็ตามจุดเด่นของโปรตีนจากหนอนนกคือ มีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วนในสัดส่วนที่สมดุลต่อความต้องการของมนุษย์ โดยเฉพาะกรดอะมิโนกลุ่มซัลเฟอร์อย่างเมไทโอนีนและซิสเทอีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มักพบในปริมาณต่ำในแมลงชนิดอื่น (Zieli**ń**ska *et al*., 2015) อีกทั้งยังมีการศึกษายืนยันว่า โปรตีนจากหนอนนกมีประสิทธิภาพการย่อยในลำไส้ได้สูง (Digestibility) และมีค่าคะแนน Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score (PDCAAS) หรือค่าคะแนนที่ใช้ประเมินคุณภาพของโปรตีนใกล้เคียงกับโปรตีนคุณภาพสูง เช่น ไข่หรือเวย์โปรตีน (Yi *et al*., 2013) การเพาะเลี้ยงง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเพาะเลี้ยงในระบบปิดโดยไม่ต้องใช้พื้นที่มาก มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นมวลชีวภาพ (Feed conversion rate) ที่ดี และสามารถเลี้ยงด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น รำข้าวหรือแกลบข้าวโพด ทำให้ช่วยลดของเสียและต้นทุนการผลิต (van Huis *et al*., 2013) เมื่อเปรียบเทียบกับแมลงบางชนิดที่ต้องการอุณหภูมิหรือสภาพแวดล้อมเฉพาะ หนอนนกแสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นและเสถียรภาพในการเพาะเลี้ยงมากกว่า นอกจากนี้ ปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าเนื้อวัวถึง 99 % ต่อหน่วยโปรตีน (Oonincx *et al*., 2012) เหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นอาหารมนุษย์ เนื่องจากหนอนนกมีขนาดเล็ก เปลือกไม่แข็งมาก และไม่มีกลิ่นฉุนเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป จึงเหมาะแก่การพัฒนาเป็นผงโปรตีนหรือส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ทั้งในรูปแบบขนมปัง บะหมี่ หรือโปรตีนบาร์ (Megido *et al*., 2014) ต่างจากแมลงบางชนิด เช่น ตั๊กแตนหรือแมงดา ที่อาจมีกลิ่นเฉพาะตัวหรือมีปริมาณไคตินสูง ทำให้ลดความน่ารับประทานหรือประสิทธิภาพการดูดซึมสารอาหาร อีกทั้งมีงานวิจัยและฐานข้อมูลรองรับมากที่สุดในกลุ่มแมลงกินได้ โดย *T. molitor* เป็นหนึ่งในแมลงไม่กี่ชนิดที่ได้รับการอนุมัติให้ใช้เป็นอาหารในมนุษย์ในสหภาพยุโรป (EU Novel Food list) และมีงานวิจัยจำนวนมากรองรับความปลอดภัย การแปรรูป และคุณสมบัติเชิงฟังก์ชันในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การต้านอนุมูลอิสระ ความสามารถในการจับน้ำมัน หรือเสริมสร้างกล้ามเนื้อ (EFSA Panel on Nutrition, 2021) ซึ่งช่วยสนับสนุนการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้จริงมากกว่าแมลงชนิดอื่น ในด้านพฤติกรรมผู้บริโภค การสำรวจหลายฉบับพบว่า หนอนนกเป็นแมลงที่ได้รับความยอมรับในฐานะอาหารสูงกว่าหลายชนิด เนื่องจากรูปลักษณ์ที่ไม่สร้างความรังเกียจ และไม่มีภาพลักษณ์เชิงลบ เช่น แมลงวันหรือแมลงสาบ (Tan *et al*., 2015) เมื่ออยู่ในรูปแบบแปรรูป เช่น ผงหรือแท่งอาหาร หนอนนกสามารถถูกรับรู้ว่าไม่ใช่แมลงได้ง่าย จึงเพิ่มศักยภาพในการเข้าสู่ตลาดอาหารมนุษย์โดยตรง

แม้ว่าการบริโภคแมลงจะเป็นเรื่องปกติในหลายประเทศ เช่น ประเทศไทย จีน และเม็กซิโก แต่ในบางวัฒนธรรม โดยเฉพาะในยุโรปและอเมริกาเหนือ การบริโภคแมลงยังคงเป็นเรื่องใหม่และมีความลังเล อย่างไรก็ตาม การศึกษาในผู้บริโภคพบว่าความยอมรับในการบริโภคหนอนนกสามารถเพิ่มขึ้นได้ หากมีการแปรรูปให้ดูน่ารับประทานหรือผสมในอาหารที่คุ้นเคย เช่น โปรตีนบาร์ ขนมขบเคี้ยว หรือแป้งโปรตีน (Tan *et al*., 2016) นอกจากนี้ การให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณค่าทางโภชนาการและ

ISSN 2821 – 9880 (Online)

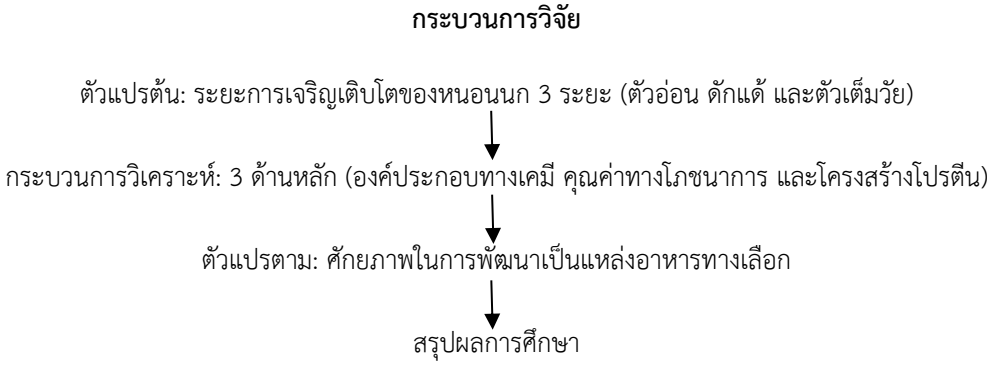
ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมยังช่วยเพิ่มความยอมรับของผู้บริโภคได้ ดังนั้น การสื่อสารที่เหมาะสมและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งเสริมการบริโภคหนอนนกในวงกว้าง

หนอนนกเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการเป็นอาหารแห่งอนาคตที่ช่วยลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสนับสนุนความมั่นคงทางอาหารของโลก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณค่าทางโภชนาการ และโครงสร้างโปรตีนของหนอนนกแต่ระยะการเจริญเติบโต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการของหนอนนก
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างโปรตีนของหนอนนก และประเมินศักยภาพในการนำโปรตีนจากหนอนนก มาใช้เป็นโปรตีนทางเลือกในอนาคต

กรอบแนวคิดในการวิจัย



วิธีการศึกษา/วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างหนอนนก

หนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโตที่ทำการแช่แข็ง (-20 องศาเซลเซียส) ได้ซื้อมาจากมาจากอุทยานผีเสื้อเฉลิมพระเกียรติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย ซึ่งมีการเก็บเกี่ยวหนอนนกระยะตัวหนอนเมื่ออายุประมาณ 80-85 วัน หนอนนกระยะดักแด้ เมื่อสังเกตเห็นเป็นดักแด้ หรืออายุ 1 วัน และ ตัวเต็มวัย อายุประมาณ 10-15 วัน โดยหนอนนกแต่ละระยะจะถูกอดอาหารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของตัวอย่างหนอนนกทั้ง 3 ระยะ

ISSN 2821 – 9880 (Online)

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของหนอนนกในแต่ละระยะ: (ก) ตัวหนอนที่มีลำตัวเป็นส่วน ๆ สีน้ำตาล, (ข) ดักแด้ที่มีสีน้ำตาลอ่อน, และ (ค) แมลงตัวเต็มวัยที่มีเกราะแข็งสีน้ำตาลดำ

2. แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) โดยใช้หนอนนกสายพันธุ์ *T. molitor* ทั้ง 3 ระยะ โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มการทดลอง การทดลองละ 1000 กรัม แต่ละการทดลองมี 5 ซ้ำ ซ้ำละ 200 กรัม ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1) ตัวอ่อน (Larva) อายุ 12 สัปดาห์ กลุ่มที่ 2) ดักแด้ (Pupa) อายุ 1 วัน และกลุ่มที่ 3) ตัวเต็มวัย (Adult) อายุ 10-15 วัน

3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหนอนนก

นำหนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโตที่ทำการแช่แข็งจำนวน 1000 กรัม ไปบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี เช่น วัตถุแห้ง (Dry matter) โปรตีนหยาบ (Crude protein) ตามวิธี Kjeldahl รุ่น Gerhardt Vapodest 400 เถ้า (Ash) และเยื่อใยหยาบ (Crude fiber) ใช้เครื่อง muffle furnace ผลิตภัณฑ์ CARBOLITE รุ่น AAF 11/7 ASHING FURNACE ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2016) ไขมันใช้คลอโรฟอร์มตามวิธีของ Mopuri *et al*. (2021) และการวิเคราะห์หาไคติน (Chitin) โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Fadlaoui *et al*. (2019)

4. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของหนอนนก

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์แร่ธาตุในตัวอย่างหนอนนก โดยดัดแปลงจากวิธีของ Jayanthi *et al*. (2023) ชั่งตัวอย่าง 500 มิลลิกรัม แล้วเติมสารผสมระหว่างกรดไนตริก (Nitric acid) ความเข้มข้น 65 % กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ความเข้มข้น 30 % ใน อัตราส่วน 3:1 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปย่อยที่อุณหภูมิ 110-130°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากตัวอย่างย่อยสมบูรณ์แล้ว กรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 หรือ 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ ปราศจากไอออน ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS, PerkinElmer PinAAcle 900F) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ (เหล็ก (Fe) λmax = 248.20 นาโนเมตร, สังกะสี (Zn) λmax = 213.86 นาโนเมตร, โซเดียม (Na) λmax = 589.59 นาโนเมตร)

ISSN 2821 – 9880 (Online)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การสกัดไขมัน การเตรียม Fatty acid methyl ester (FAME) และการ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC) ขั้นตอนที่ 1 การสกัดไขมันจากตัวอย่างด้วยวิธี Folch *et al*. (1957) ขั้นตอนที่ 2 การเตรียม Fatty acid methyl ester (Morrison and Smith, 1964) ดูดตัวอย่างที่สกัดได้ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 0.5 M NaOH ใน Methanol 4 มิลลิลิตร เขย่า 30 วินาที จากนั้น Reflux จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ทิ้งให้เย็น แล้วเติม 20 % Boron-trifluoride ใน Methanol 5 มิลลิลิตร เขย่า 30 วินาที แล้ว Reflux ต่ออีก 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เทสารละลายที่ได้ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย NaCl อิ่มตัว 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติม Iso-octane (2, 2, 4-trimethylpentane) 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วย Vortex mixer (Vortex genie 2, Scientific Industries, United States) 30 วินาที ตั้งไว้ให้แยกชั้น จากนั้นเก็บสารละลายชั้นบน 1 มิลลิลิตร ใส่ใน Microcentrifuge tube ที่มี Sodium sulfate anhydrous ปริมาณ 1 มิลลิกรัม แล้วปิด Microcentrifuge tube ให้สนิทเก็บในตู้เย็นเพื่อรอการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC) ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC) ดูดสารละลาย FAME ที่เตรียมไว้ 2 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่อง GC (GC-2010 Shimadzu, Japan) ควบคุม ด้วยโปรแกรม GC-solution

การวิเคราะห์กรดอะมิโนทั้งหมด (Total amino acids) ของตัวอย่างหนอนนกทั้ง 3 ระยะคือ ตัวหนอน ดักแด้ ตัวเต็มวัย โดยการเตรียมตัวอย่างโดยชั่ง 0.05 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 6 M Hydrochloric acid (HCl) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex mixer (Vortex genie 2, Scientific Industries, United States) จากนั้นนำไปใส่ใน Heating bath (B-300 Base, Buchi, Switzerland) เพื่อทำการย่อยที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ทำการปรับปริมาตรตัวอย่างด้วยน้ำ DI Type I ให้ได้ 10 มิลลิลิตร ปิเปตส่วนสารละลายมาทำการเจือจางด้วย 0.1 M Ammonium formate และกรองผ่าน Syringe filter ที่ความละเอียด 0.2 ไมโครเมตร ใส่ในขวดสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-MS/MS (LCMS-8060, Shimadzu, Japan) การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์กรดอะมิโน Tryptophan ทำการทดลองตามวิธีข้างต้นโดยเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ในการย่อย จาก 6 M Hydrochloric acid (HCl) เป็น 4.2 M Sodium hydroxide (NaOH) แทน แล้วนำตัวอย่างที่ย่อยแล้วมาทำการตรวจวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนด้วยเครื่อง LC-MS/MS (LCMS-8060, Shimadzu, Japan) โดยใช้ Column ชนิด Intrada amino acid (Pure spherical silica) ขนาด 50x3 mm, 3 µm สารละลายตัวอย่าง 1 µL ถูกฉีดเข้าเครื่อง LC-MS/MS ใช้สารละลายเฟสเคลื่อนที่ 2 ชนิด คือ Solvent A (Acetonitrile with 0.1 % Formic acid) และ Solvent B (0.1 M Amnonium formate) ตั้งโปรแกรมการวิเคราะห์แบบ Gradient 0-3 นาที (14 % B), 3-10 นาที (100 % B), 10-15 นาที (14 % B) ที่อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตร/นาที จากนั้นทำการคำนวณหาปริมาณของกรดอะมิโนและไดเปปไทด์ที่ได้ จากกราฟสารมาตรฐานของกรดอะมิโน

ISSN 2821 – 9880 (Online)

5. การวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตโพลีอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรโฟรีซิส (SDS-PAGE) ในโปรตีนหนอนนก

การวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนด้วย SDS-PAGE ใช้ 12 % Gel acrylamide ในการวิเคราะห์ขนาดโปรตีน โดยเทียบกับโปรตีนมาตรฐาน (Spectra Multicolor Low Range Protein Ladder, Thermo Fisher Scientific) ให้ความต่างศักย์ 100 โวลต์กับเจล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเจลออกมาย้อมสีในสารละลาย Coomassie brilliant blue R250 และล้างเจลด้วยสารละลาย 10 % กรดอะซิติกใน 50 % เมทานอล จนเห็นแถบโปรตีน แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลกับโปรตีนมาตรฐาน

6. การวิเคราะห์องค์ประกอบของโปรตีนด้วยการใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันถูกดำเนินการโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ FTIR รุ่น Nicolet™ iS50 จาก Thermo Scientific, USA สำหรับการวิเคราะห์นี้ ใช้หนอนนกในแต่ละระยะการเจริญเติบโต จำนวน 2-5 มิลลิกรัม ผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 1:100 แล้วบดผสมให้เป็นเนื้อเดียว จากนั้นนำผงผสมไปอัดในเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อสร้างแผ่นตัวอย่างบางๆ (Pellet) จากนั้นทำการบันทึกสเปกตรัม FTIR ในช่วงความถี่ 4000 ถึง 400 cm^{-1} โดยมีความละเอียด 4 cm^{-1} และทำการสแกนแต่ละตัวอย่างจำนวน 64 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ

7. การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ถูกดำเนินการบนข้อมูลสเปกตรัมในช่วง 400-1800 cm^{-1} ของการวิเคราะห์ FTIR โดยใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ Unscramble X การแปลงข้อมูลทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงนี้ช่วยให้สามารถเปิดเผยความแตกต่างในโครงสร้างและความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างโปรตีนได้อย่างละเอียด ซึ่งอาจไม่สามารถมองเห็นได้จากข้อมูลสเปกตรัมดิบโดยตรง

8. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มทดลองโดย Analysis of variance (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มทดลองโดยวิธี Turkey's multiple range test โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS 25.0 (IBM CO., Chicago, IL)

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณค่าทางโภชนาการในหนอนนกในแต่ละระยะของหนอนนก ดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าหนอนนกระยะดักแด้มีปริมาณโปรตีน (54.38 %) และเถ้า (5.68 %) สูงกว่าตัวอ่อนและตัวเต็มวัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการสะสมโปรตีนและแร่ธาตุในระยะดักแด้เพื่อใช้สำหรับการพัฒนาไปสู่ตัวเต็มวัย ในส่วนของปริมาณไขมัน พบว่าระยะตัวอ่อน (24.01 %) และดักแด้ (21.85 %) สูงกว่าตัวเต็มวัย (10.41 %) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ตัวเต็มวัยมีของแข็ง (48.44 %) เยื่อใยหยาบ (16.04 %) และไคติน (23.26 %) ซึ่งสูงกว่าระยะตัวอ่อนและดักแด้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเปลือกนอกของแมลงเป็นแหล่งของไคติน ซึ่งเป็นโพลีแซ็กคาไรด์

หนอนนกมีปริมาณโปรตีนคิดเป็น 45–60 % ของน้ำหนักแห้ง โดยสามารถเทียบได้กับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ทั่วไป เช่น เนื้อไก่หรือปลา ทั้งนี้ปริมาณโปรตีนในแมลงอาจมีความผันแปรตามชนิดแมลง วัยของแมลง อาหารที่ใช้เลี้ยง รวมถึงกรรมวิธีแปรรูป

ISSN 2821 – 9880 (Online)

เช่น การอบ การบด หรือการสกัด (Van Huis *et al*., 2013) เมื่อเปรียบเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น เช่น จิ้งหรีดบ้าน (*Acheta domesticus*) หรือ ตั๊กแตนทะเลทราย (*Locusta migratoria*) (Bawa *et al*., 2020) พบว่าทั้งสองชนิดมีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 55–65 % ในขณะที่หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) มีโปรตีนต่ำกว่า คือ ประมาณ 40–45 % ซึ่งมักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์มากกว่าการบริโภคของมนุษย์โดยตรง (Makkar *et al*., 2014) ในด้านไขมัน หนอนนกมีปริมาณไขมัน 25–35 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าจิ้งหรีดและตั๊กแตนที่มีไขมัน 10–20 % แต่ต่ำกว่าหนอนแมลงวันลาย ซึ่งบางครั้งอาจมีไขมันสูงถึง 35 % (Belluco *et al*., 2013) นอกจากนี้ หนอนนกยังมีปริมาณไคติน (Chitin) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตโครงสร้างที่พบในเปลือกของแมลงอยู่ในช่วง 6–10 % ของน้ำหนักแห้ง โดยปริมาณนี้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับจิ้งหรีดบ้านและต่ำกว่าด้วงบางชนิด (Finke *et al*., 2007) อย่างไรก็ตาม หนอนนกมีเปลือกที่ประกอบด้วยไคติน ซึ่งอาจลดค่าการย่อยโปรตีนในบางรูปแบบการบริโภคโดยเฉพาะเมื่อรับประทานทั้งตัวโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปหรือสกัด ทั้งนี้การลดไคตินหรือแยกโปรตีนบริสุทธิ์สามารถช่วยเพิ่มค่าการดูดซึมของโปรตีนได้ (Zieliństka *et al*., 2015) ดังนั้น หนอนนก (*T. molitor*) จึงเป็นแมลงที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งอาหารทางเลือกในอนาคต โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมทั้งในด้านโปรตีนและไขมัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของหนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโต

องค์ประกอบทางเคมี	ตัวอ่อน	ดักแด้	ตัวเต็มวัย
วัตถุแห้ง (%, น้ำหนักเปียก)	33.07 ± 0.58^{b}	20.59 ± 0.65^{c}	48.44 ± 1.19^{a}
โปรตีน (%, น้ำหนักแห้ง)	49.71 ± 0.56^{b}	54.38 ± 0.83^{a}	47.25 ± 0.84^{c}
ไขมัน (%, น้ำหนักแห้ง)	24.01 ± 0.04^{a}	21.85 ± 3.16^{a}	10.41 ± 1.08^{b}
เถ้า (%, น้ำหนักแห้ง)	3.48 ± 0.08^{b}	5.68 ± 0.02^{a}	3.04 ± 0.16^{c}
เยื่อใย (%, น้ำหนักแห้ง)	9.56 ± 1.25^{b}	9.97 ± 0.62^{b}	16.04 ± 1.05^{a}
ไคติน (%, น้ำหนักแห้ง)	13.24 ± 2.75^{b}	8.11 ± 1.39^{c}	23.26 ± 0.47^{a}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตัวอักษรแตกต่างกันในแถวซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุในแต่ละระยะของหนอนนก จากตารางที่ 2 พบว่า หนอนนกในระยะตัวอ่อนมีปริมาณของแร่ธาตุหลายชนิดสูงกว่าระยะอื่น เช่น แมกนีเซียม (5.31 %) โพแทสเซียม (34.69 %) แคลเซียม (5.26 %) เหล็ก (0.97 %) และสังกะสี (1.46 %) ซึ่งล้วนเป็นแร่ธาตุสำคัญที่มีบทบาทต่อการทำงานของระบบประสาท กล้ามเนื้อ ภูมิคุ้มกัน และการสร้างเม็ดเลือดแดง (Rumpold *et al*., 2013) โดยเฉพาะแคลเซียมและแมกนีเซียมในระยะตัวอ่อนที่อยู่ในระดับสูงกว่าระยะดักแด้และตัวเต็มวัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของแร่ธาตุดังกล่าวในกระบวนการเติบโตและพัฒนาการของหนอนนกช่วงต้น ในระยะดักแด้ มีการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบแร่ธาตุบางชนิด เช่น ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นจากระยะตัวอ่อน โดยเฉพาะฟอสฟอรัส (35.34 %) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาผลาญพลังงานและการสังเคราะห์โปรตีน (Ghosh *et al*., 2017) อย่างไรก็ตาม แร่ธาตุหลายชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม แคลเซียม และสังกะสี มีปริมาณลดลง

ISSN 2821 – 9880 (Online)

ซึ่งอาจเป็นผลจากการปรับเปลี่ยนกระบวนการภายในของดักแด้ที่เน้นการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าการสะสมสารอาหาร สำหรับระยะตัวเต็มวัย พบว่าปริมาณฟอสฟอรัส (36.47 %) และซัลเฟอร์ (26.72 %) มีค่าสูงที่สุดในทั้งสามระยะ สอดคล้องกับบทบาทของซัลเฟอร์ในกรดอะมิโนจำเป็นบางชนิด เช่น เมไทโอนีน และซีสเทอีน ซึ่งมีความสำคัญในโครงสร้างของโปรตีนและเอนไซม์ในแมลงโตเต็มวัย อย่างไรก็ตาม แร่ธาตุอื่น เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี กลับลดลงอย่างชัดเจนในระยะนี้ (Zieli**ń**ska *et al*., 2015) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการใช้พลังงานสะสมไปในช่วงก่อนเข้าดักแด้ หรือการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาในระยะหลังสุดของชีวิต

ตารางที่ 2 ปริมาณแร่ธาตุของหนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโต

ปริมาณแร่ธาตุ (%)	ตัวอ่อน	ดักแด้	ตัวเต็มวัย
แมกนีเซียม	5.31 ± 0.01^{a}	4.72 ± 0.01^{b}	3.04 ± 0.03^{c}
ฟอสฟอรัส	32.55 ± 0.21^{c}	35.34 ± 0.05^{b}	36.47 ± 0.12^{a}
ซัลเฟอร์	19.76 ± 0.15^{c}	21.14 ± 0.17^{b}	26.72 ± 0.03^{a}
โพแทสเซียม	34.69 ± 0.01^{a}	32.32 ± 0.13^{b}	29.77 ± 0.03^{c}
แคลเซียม	5.26 ± 0.04^{a}	4.82 ± 0.01^{b}	2.80 ± 0.09^{c}
เหล็ก	0.97 ± 0.02^{a}	0.95 ± 0.04^{a}	0.73 ± 0.07^{b}
สังกะสี	1.46 ± 0.03^{a}	0.72 ± 0.02^{b}	0.48 ± 0.02^{c}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตัวอักษรแตกต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของหนอนนก แสดงรูปแบบที่แตกต่างกันในแต่ละระยะ (ตารางที่ 3) องค์ประกอบของกรดไขมันในหนอนนก (*T. molitor*) เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามระยะการเจริญเติบโต ซึ่งสะท้อนถึงการปรับสภาพการสะสมไขมันเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานหรือองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ในแต่ละช่วงชีวิต โดยกรดไขมันชนิดหลักที่พบได้ในทุกระยะ ได้แก่ กรดปาล์มิติก (C16:0), กรดโอเลอิก (C18:1n9c) และกรดไลโนเลอิก (C18:2n6c) ซึ่งมีบทบาทสำคัญทั้งในด้านโภชนาการและการเผาผลาญพลังงานในร่างกาย ในระยะตัวอ่อน ซึ่งเป็นระยะที่มีการสะสมพลังงาน พบว่า เนื้อเยื่อประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูง โดยเฉพาะกรดโอเลอิก (49.54 %) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีประโยชน์ต่อหัวใจและระบบหลอดเลือด (Rumpold *et al*., 2013) กรดปาล์มิติก (C16:0) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวชนิดหลัก ในตัวอ่อนมีอยู่ในปริมาณ 18.97 % ขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนอย่างกรดไลโนเลอิกมีสัดส่วน 19.84 % ในระยะดักแด้ พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของกรดไลโนเลอิก (23.44 %) และกรดไขมันอิ่มตัวบางชนิด เช่น กรดสเตียริก (C18:0) เพิ่มขึ้นจากระยะตัวอ่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทางเมตาบอลิซึมเพื่อเตรียมเข้าสู่ระยะตัวเต็มวัย (Van Broekhoven *et al*., 2015) กรดไขมันบางชนิด เช่น C20:1 และ C18:3n6 ก็ปรากฏในระดับที่สูงขึ้นกว่าระยะก่อนหน้า ในระยะตัวเต็มวัย แม้สัดส่วนกรดโอเลอิกยังคงสูง (48.82 %) แต่พบว่ากรดไขมันอิ่มตัวชนิด C14:0 (Myristic acid) และ C12:0 (Lauric acid) มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับระยะก่อนหน้า ซึ่งอาจสะท้อนถึงการลดการใช้พลังงานสะสมหรือการเปลี่ยนองค์ประกอบของไขมันไปตามความจำเป็น

ISSN 2821 – 9880 (Online)

ในการดำรงชีวิตของแมลงโตเต็มวัยที่มีการเคลื่อนไหวน้อยลง (Zieliński *et al*., 2015) ดังนั้น องค์ประกอบของกรดไขมันในหนอนนกอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์ โดยเฉพาะกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีสัดส่วนสูง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางโภชนาการ เพื่อสุขภาพ เช่น อัตราส่วนไขมันไม่อิ่มตัวต่ออิ่มตัวที่สูง และการมีกรดไขมันโอเมก้า-6 และโอเมก้า-3 ในระดับที่สมดุล นอกจากนี้ หนอนนกยังมีกรดไขมันจำเป็นบางชนิดที่แม้จะพบในปริมาณน้อยแต่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น C18:3n3 (Alpha-linolenic acid) และ C20:4n6 (Arachidonic acid)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของกรดไขมันของหนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโต

Fatty acids	ตัวอ่อน	ดักแด้	ตัวเต็มวัย
C12:0	0.50 ± 0.01^{a}	0.49 ± 0.15^{a}	0.16 ± 0.03^{b}
C14:0	4.47 ± 0.03^{a}	4.10 ± 0.13^{a}	2.97 ± 0.10^{b}
C16:0	18.97 ± 0.11^{a}	17.71 ± 0.02^{b}	17.12 ± 0.03^{b}
C16:1	2.09 ± 0.11^{a}	1.64 ± 0.07^{b}	-
C18:0	3.39 ± 0.47^{b}	5.41 ± 0.17^{a}	5.51 ± 0.01^{a}
C18:1n9c	49.54 ± 0.06^{a}	46.28 ± 0.11^{b}	48.82 ± 0.25^{a}
C18:2n6c	19.84 ± 0.06^{b}	23.44 ± 1.07^{a}	24.86 ± 0.05^{a}
C20:0	0.13 ± 0.02^{b}	0.16 ± 0.01^{b}	0.33 ± 0.03^{a}
C20:1	0.04 ± 0.01^{c}	0.29 ± 0.05^{a}	0.25 ± 0.01^{b}
C18:3n6	0.11 ± 0.02^{b}	0.48 ± 0.02^{a}	-
C18:3n3	0.65 ± 0.05^{a}	-	-
C20:2	0.05 ± 0.02^{a}	-	-
C22:0	0.04 ± 0.01^{a}	-	-
C20:3n6	0.06 ± 0.03^{a}	-	-
C22:1n9	0.05 ± 0.01^{a}	-	-
C20:4n6	0.09 ± 0.01^{a}	-	-

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตัวอักษรแตกต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$); - คือ ตรวจไม่พบ

ผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของหนอนนกในแต่ละระยะ (ตารางที่ 4) พบว่า ระยะตัวอ่อน มีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นรวมสูงที่สุด (43.84 %) โดยกรดอะมิโนที่พบในปริมาณมาก ได้แก่ ลิวซีน (9.46 %), ไลซีน (6.88 %), วาลีน (6.39 %) และทรีโอนีน (5.81 %) ซึ่งกรดอะมิโนเหล่านี้ล้วนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสร้างโปรตีนของกล้ามเนื้อและการควบคุมเมตาบอลิซึมของร่างกาย (Yi *et al*., 2013) นอกจากนี้ยังพบว่าทริปโตเฟน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่มักมีปริมาณน้อยในโปรตีนจากพืช มีอยู่ในระดับสูงกว่าในระยะอื่น (0.63 กรัม) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของหนอนนกในการเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง สำหรับระยะดักแด้แม้จะมีปริมาณกรดอะมิโนบางชนิด เช่น ไลซีน และฮิสทิดีน สูงกว่าระยะตัวอ่อนเล็กน้อย แต่ปริมาณรวมของกรดอะมิโนจำเป็น

ISSN 2821 – 9880 (Online)

กลับต่ำที่สุด (39.46 %) ซึ่งอาจสะท้อนถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเมตาบอลิซึมภายในตัวแมลงในช่วงระยะเปลี่ยนผ่าน โดยพบว่าทริปโตเฟนลดลงเหลือเพียง 0.18 % และกรดอะมิโนอื่น ๆ ส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง ในส่วนระยะตัวเต็มวัย ปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นรวมกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 42.09 % โดยกรดอะมิโนหลักยังคงประกอบด้วยลิวซีน วาลีน และไอโซลิวซีน ซึ่งมีความสำคัญต่อการซ่อมแซมเนื้อเยื่อและเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณทริปโตเฟนในระยะนี้ต่ำที่สุด (0.03 %) ซึ่งอาจจำกัดคุณภาพของโปรตีนหากใช้เป็นแหล่งเดียวในอาหาร (Rumpold *et al*., 2013)

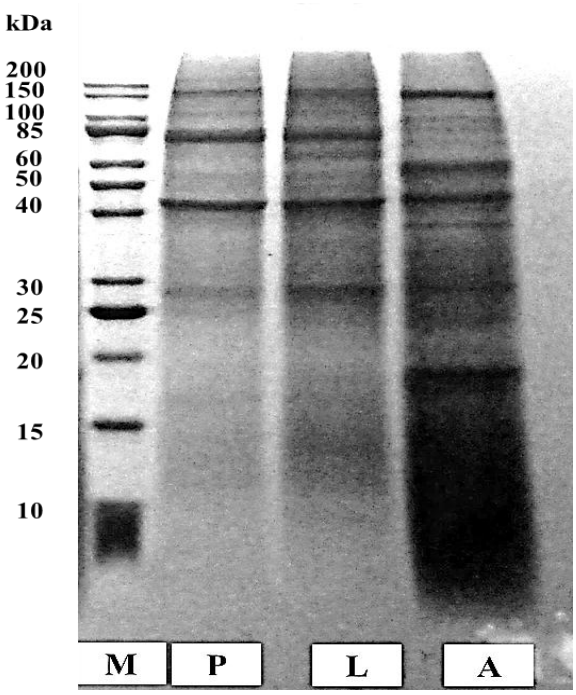
ตารางที่ 4 ปริมาณกรดอะมิโน (กรัมต่อ 100 กรัม โปรตีน) ของหนอนนกในแต่ละระยะการเจริญเติบโต

กรดอะมิโน	ตัวอ่อน	ดักแด้	ตัวเต็มวัย
กรดอะมิโนจำเป็น			
ลิวซีน	9.46 ± 0.32^{a}	7.77 ± 0.32^{b}	9.56 ± 0.26^{a}
ไลซีน	6.88 ± 0.08^{b}	7.24 ± 0.07^{a}	6.69 ± 0.22^{b}
วาลีน	6.39 ± 0.06^{a}	5.70 ± 0.05^{b}	6.85 ± 0.26^{a}
ไอโซลิวซีน	5.82 ± 0.18	5.71 ± 0.12	5.95 ± 0.15
ทรีโอนีน	5.81 ± 0.07^{a}	4.66 ± 0.16^{b}	5.29 ± 0.27^{a}
ไทโรซีน	5.51 ± 0.09^{a}	4.97 ± 0.08^{b}	4.64 ± 0.12^{b}
ฮิสทิดีน	2.58 ± 0.10^{b}	2.73 ± 0.04^{a}	2.58 ± 0.10^{b}
ฟีนิลอะลานีน	0.77 ± 0.02^{a}	0.50 ± 0.02^{b}	0.52 ± 0.03^{b}
ทริปโตฟาน	0.63 ± 0.74^{a}	0.18 ± 0.03^{b}	0.03 ± 0.00^{c}
รวม	43.84 ± 2.95^{a}	39.46 ± 2.72^{b}	42.09 ± 3.12^{a}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตัวอักษรแตกต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของหนอนนก ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค SDS-PAGE (Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis) เพื่อวิเคราะห์โปรไฟล์โปรตีนในแต่ละระยะ โดยใช้เจลโพลีอะคริลาไมด์ความเข้มข้น 12 % และย้อมด้วยสี Coomassie Brilliant Blue R-250 เพื่อแสดงแถบโปรตีนแสดงให้เห็นถึงโปรไฟล์ของโปรตีนที่แตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของ *T. molitor* ดังที่แสดงในภาพที่ 2 โดยพบโปรตีนในช่วงน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 10-200 kDa โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ (150-200 kDa) พบได้ชัดในทุกระยะ โดยเด่นชัดที่สุดในดักแด้และตัวอ่อน สำหรับโปรตีนในช่วงน้ำหนักโมเลกุลขนาดปานกลาง (40-85 kDa) พบการกระจายที่คล้ายกันในทุกระยะ แต่มีความเข้มที่แตกต่างกัน ระยะตัวเต็มวัยมีการสะสมโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็ก (10-20 kDa) ที่เด่นชัดที่สุด

ISSN 2821 – 9880 (Online)

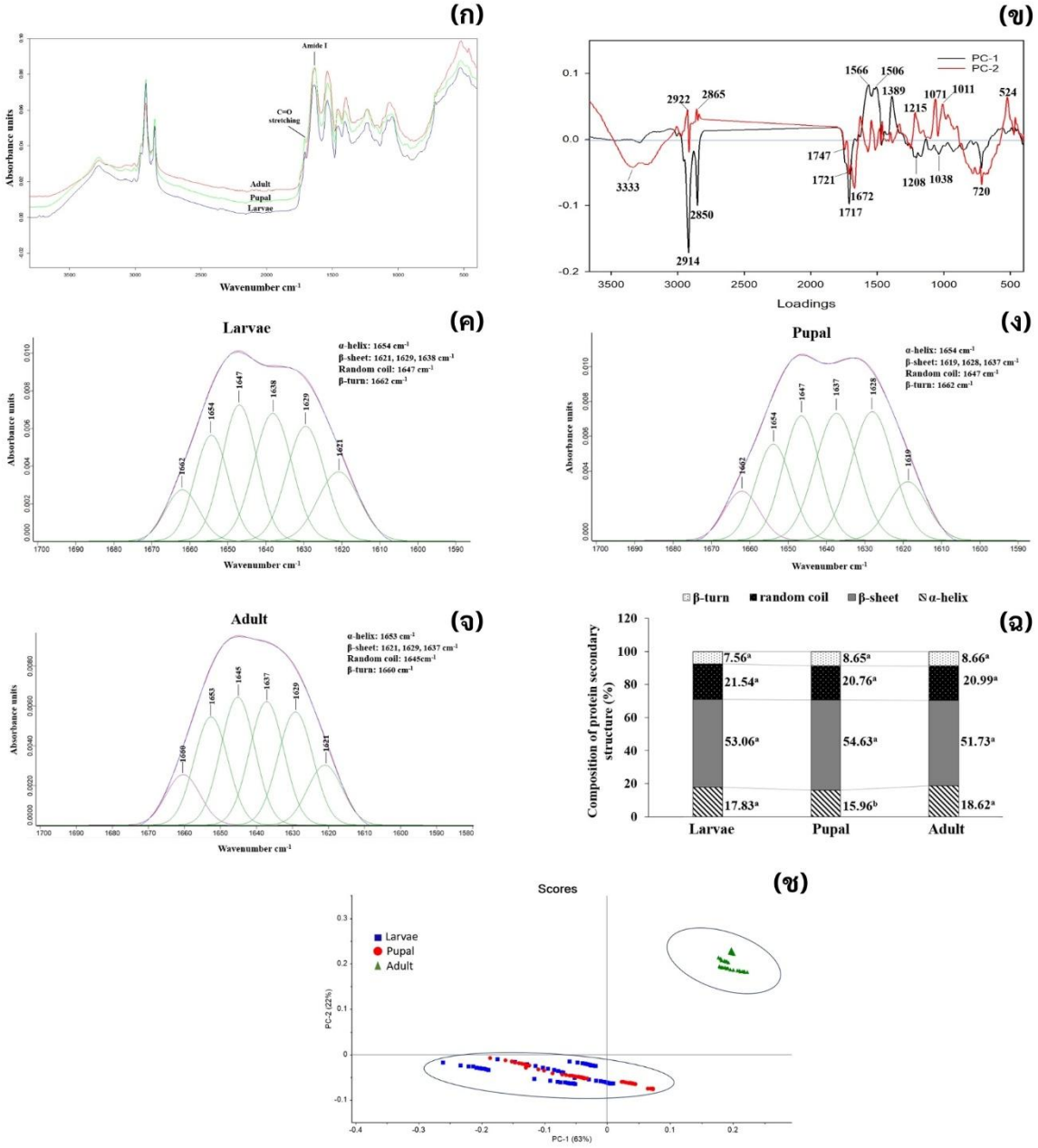


ภาพที่ 2 โปรไฟล์โปรตีน SDS-PAGE ของหนอนนก (*T. molitor*) ในแต่ละระยะพัฒนา
M = ตัวบ่งชี้น้ำหนักโมเลกุล (10-200 kDa); P = ระยะดักแด้; L = ระยะตัวหนอน; A = ระยะตัวเต็มวัย
โปรตีนถูกแยกบนเจลโพลีอะคริลาไมด์ความเข้มข้น 12 % และย้อมสีด้วย Coomassie Brilliant Blue R250

ผลการศึกษาสเปกตรัม FTIR ของหนอนนกในระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ (ตัวหนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย) ดังแสดงในภาพที่ 3 มีลักษณะโครงสร้างโปรตีนที่เด่น เช่น แถบ Amide I ที่ประมาณ 1650 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของพันธะคาร์บอนิล (C=O) การจัดตำแหน่งของจุดพีกและความเข้มที่ค่อนข้างคงที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโปรตีนพื้นฐานยังคงอยู่ในทุกระยะการพัฒนา แต่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในสัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังมีการดูดกลืนในช่วง 3000-2800 cm^{-1} ในสเปกตรัม FTIR เป็นบริเวณที่สำคัญมากสำหรับการตรวจสอบการดูดกลืนของพันธะโควาเลนต์ (C–H) ในกลุ่มอัลเคน (Alkane) โดยเฉพาะในไขมันและน้ำมัน

การวิเคราะห์โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนในรูปแบบ β-sheet พบว่า β -sheet เป็นโครงสร้างที่มีปริมาณสูงสุด (51-55 %) รองลงมาคือ Random coil (20-22 %) **α**-helix **(**16-19 %) และ β-turn (7.5-8.7 %) การเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในปริมาณ **α**-helix พบในตัวดักแด้ (15.96 %) ซึ่งแตกต่างจากตัวหนอน (17.83 %) และตัวเต็มวัย (18.62 %) การรักษาโครงสร้างทุติยภูมิให้คงที่ในระยะการพัฒนาแต่ละช่วงจะช่วยให้โปรตีนสามารถรักษาฟังก์ชันในสภาวะแวดล้อมหรือการประมวลผลต่าง ๆ ได้ดี

การวิเคราะห์ PCA ของสเปกตรา FTIR แสดงรูปแบบการแยกกลุ่มที่ชัดเจนระหว่างระยะการพัฒนาต่าง ๆ โดยระยะตัวเต็มวัยจะมีการแยกกลุ่มที่ชัดเจนจากตัวหนอนและตัวดักแด้



ภาพที่ 3 สเปกตรัม FTIR ของหนอนนกในแต่ละระยะการเจริญเติบโต (ก); กราฟโหลดแสดงบริเวณสเปกตรัมหลัก (500 cm^{-1} และ 3500 cm^{-1}) ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (ข); องค์ประกอบของโครงสร้างโปรตีนทุติยภูมิ ซึ่งประกอบด้วย β-turn, Random coil, β-sheet และ **α**-helix ของตัวอย่างระยะดักแด้ (ค), ระยะตัวหนอน (ง), และระยะตัวเต็มวัย (จ); กราฟแท่งแสดงสัดส่วนของโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) (ฉ), และกราฟคะแนน (Scores Plot) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของค่าโครงสร้างทุติยภูมิระหว่างตัวอย่างทั้งสามระยะ

ISSN 2821 – 9880 (Online)

อภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโปรตีนของหนอนนกแต่ละระยะการเจริญเติบโต เพื่อการพัฒนาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกในอนาคต โดยเฉพาะในด้านคุณค่าทางโภชนาการ โปรตีน และไขมันที่สำคัญต่อสุขภาพมนุษย์ ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของหนอนนก พบว่า องค์ประกอบทางเคมีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการปรับตัวทางสรีรวิทยาในแต่ละช่วงชีวิต โดยระยะดักแด้มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (54.38 %) ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งโปรตีนเข้มข้นในอาหารมนุษย์ เช่น โปรตีนบาร์ ผงโปรตีน หรือผลิตภัณฑ์เนื้อจำลอง (Meat analogues) ได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์ (Yi *et al*., 2013) ตามด้วยระยะตัวอ่อน (49.71 %) และระยะตัวเต็มวัย (47.25 %) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yu *et al*. (2021) ซึ่งอธิบายว่า เกิดจากการปรับโครงสร้างเนื้อเยื่อและการกระจายโปรตีนใหม่ระหว่างการพัฒนาของวงจรชีวิต และตรวจพบโปรตีนกล้ามเนื้อหลัก เช่น Tropomyosin, Troponin และ Actin ซึ่งสอดคล้องกับช่วงพัฒนากล้ามเนื้อและแสดงศักยภาพในการเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง (Kim *et al*., 2019) เมื่อเปรียบเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น เช่น จิ้งหรีดบ้าน (*Acheta domesticus*) หรือ ตั๊กแตนทะเลทราย (*Locusta migratoria*) (Bawa *et al*., 2020) พบว่าทั้งสองชนิดมีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 55-65 % ในขณะที่หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) มีโปรตีนต่ำกว่า คือประมาณ 40-45 % ซึ่งมักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์มากกว่าการบริโภคของมนุษย์โดยตรง (Makkar *et al*., 2014) ในส่วนของปริมาณไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากระยะตัวอ่อน (24.01 %) สู่ระยะตัวเต็มวัย (10.41 %) แสดงให้เห็นว่าไขมันสะสมเพิ่มขึ้นในช่วงการพัฒนาของวงจรชีวิตและถึงจุดสูงสุดในระยะดักแด้ ก่อนจะลดลงในระยะตัวเต็มวัย รูปแบบการสะสมและการใช้ไขมันนี้สอดคล้องกับกระบวนการแปรสภาพร่างกาย (metamorphosis) ในแมลงแบบสมบูรณ์ ซึ่งระยะดักแด้ทำหน้าที่เป็นช่วงสำคัญในการสะสมพลังงาน ในช่วงนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบไขมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการสะสมของกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น กรดไลโนเลอิก (C18:2n6c) และ กรดสเตียริก (C18:0) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในเยื่อหุ้มเซลล์ การส่งสัญญาณ และการคงความเสถียรของโครงสร้างภายในระหว่างกระบวนการแปรรูปทางสัณฐานวิทยา (Morphogenesis) ที่ซับซ้อน (Zhao *et al*., 2016) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สอดคล้องกับกลไกทางชีวภาพที่พบในแมลงชนิดอื่น เช่น แมลงวันผลไม้ (Drosophila melanogaster) และผีเสื้อกลางคืน ที่แสดงให้เห็นว่าระยะดักแด้จะมีการรีดิสทริบิวต์พลังงานจากไขมันและไกลโคเจนไปยังเนื้อเยื่อที่กำลังสร้างใหม่ ซึ่งรวมถึงกล้ามเนื้อ ปีก และระบบสืบพันธุ์ (Arrese & Soulages, 2010) ดังนั้น ปริมาณไขมันที่พบในระยะดักแด้ของหนอนนกจึงไม่เพียงแต่มีบทบาทเชิงสรีรวิทยา แต่ยังสะท้อนถึงกลไกการบริหารจัดการพลังงานที่อาจใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดระยะที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยววัตถุดิบเพื่อผลิตอาหารที่เน้นพลังงานสูง ไขมันดี หรืออาหารเสริมสุขภาพเฉพาะกลุ่ม ในระยะตัวเต็มวัยของหนอนนก พบว่า มีปริมาณไคตินสูงที่สุด (23.26 %) ซึ่งสะท้อนถึงการสะสมของโครงสร้างเปลือกแข็งภายนอกที่สมบูรณ์สมตามธรรมชาติของแมลงโตเต็มวัย ไคตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงโครงสร้างที่สำคัญ มีบทบาทไม่เพียงแต่ในการป้องกันแมลงแต่ยังแสดงคุณสมบัติที่โดดเด่น เมื่อประยุกต์ใช้ในอาหารและโภชนาการมนุษย์ โดยไคตินจัดเป็นใยอาหารไม่ละลายน้ำ (Insoluble fiber) ที่สามารถกระตุ้น การเคลื่อนไหวของลำไส้ ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด และยังมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ เช่น การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน ต้านจุลชีพ และการดูดซับไขมันส่วนเกินในลำไส้ (Stull & Weir, 2023; Azagoh *et al*., 2023) นอกจากนี้ ไคตินยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง ด้วยคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และควบคุมระดับคอเลสเตอรอล (Merzendorfer & Zimoch, 2003) เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนทั่วไป เช่น ถั่วเหลืองหรือเวย์โปรตีน ซึ่งแม้จะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่ไม่มีใยอาหารชนิดนี้

ISSN 2821 – 9880 (Online)

หนอนนกจึงมีความได้เปรียบในเชิงฟังก์ชันเพราะให้ทั้งโปรตีนคุณภาพสูงและใยอาหารชนิดไคตินในสัดส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมสุขภาพลำไส้ ภูมิคุ้มกัน และสมดุลระบบเผาผลาญได้พร้อมกัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นอาหารฟังก์ชันหรือผลิตภัณฑ์เสริมใยอาหารที่ตอบโจทย์การบริโภคในยุคปัจจุบันที่ให้ความสำคัญกับอาหารเพื่อสุขภาพอย่างรอบด้าน เมื่อเปรียบเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น พบว่า ในระยะตัวเต็มวัยมีไคตินสูงกว่าแมลงหลายชนิดโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับแมลงปีกแข็งขนาดเล็ก เช่น ตั๊กแตน (*Locusta migratoria*), จิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) และหนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) โดยงานวิจัยของ Zieliǹska *et al*. (2015) รายงานว่าแมลงเหล่านี้มีปริมาณไคตินเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5–15 % ของน้ำหนักแห้ง ขึ้นกับชนิดและระยะการเจริญเติบโต

องค์ประกอบของแร่ธาตุในแต่ละระยะการพัฒนาของหนอนนกแสดงให้เห็นรูปแบบที่แตกต่างของการกระจายและการใช้แร่ธาตุ โดยพบว่า ฟอสฟอรัสและกำมะถันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากระยะตัวอ่อนถึงระยะตัวเต็มวัย ฟอสฟอรัส 32.550 % เป็น 36.465 % กำมะถัน 19.762 % เป็น 26.716 % ในทางกลับกัน แร่ธาตุที่จำเป็นบางชนิดแสดงแนวโน้มลดลงจากระยะตัวอ่อนถึงระยะตัวเต็มวัย ได้แก่ แมกนีเซียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จาก 5.305 % เป็น 3.038 %, แคลเซียมจาก 5.259 % เป็น 2.796 % และสังกะสีจาก 1.458 % เป็น 0.483 % ปริมาณเหล็กที่คงที่ระหว่างระยะตัวอ่อนและระยะดักแด้ (0.969 % และ 0.954 % ตามลำดับ) ก่อนลดลงในระยะตัวเต็มวัย (0.732 %) บ่งชี้ถึงบทบาทสำคัญของเหล็กในการสนับสนุนกระบวนการเมแทบอลิซึมพื้นฐานในระหว่างการพัฒนาในแต่ละระยะของหนอนนก นอกจากนี้ ปริมาณโพแทสเซียมที่สูงในระยะตัวอ่อน (34.692 %) เมื่อเทียบกับระยะตัวเต็มวัย (29.770 %) แสดงถึงความสำคัญของโพแทสเซียมในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาวงจรชีวิต ความสัมพันธ์ระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัสกับการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์ไคตินแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของแร่ธาตุเหล่านี้ในกระบวนการพัฒนาของหนอนนก การเชื่อมโยงระหว่างปริมาณไคตินกับองค์ประกอบแร่ธาตุ โดยเฉพาะแคลเซียมและฟอสฟอรัส สะท้อนถึงความซับซ้อนในการพัฒนาของโครงสร้างในหนอนนก (Barker *et al*., 1998) ไคตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างภายนอกของแมลง ก่อให้เกิดโครงสร้างร่วมกับแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของโครงสร้างผิวหนังในระหว่างการพัฒนา ความสัมพันธ์แบบผกผันที่พบระหว่างระดับไคตินและแคลเซียมชี้ให้เห็นถึงการใช้แคลเซียมในกระบวนการสร้างโครงสร้างร่วมของไคตินและแร่ธาตุ ขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสสอดคล้องกับการสังเคราะห์ไคตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญในการสร้างพันธะข้ามระหว่างเส้นใยไคตินและโปรตีนในโครงสร้างภายนอก (Rong *et al*., 2019) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแมลงชนิดอื่น เช่น จิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) ตั๊กแตน (*Locusta migratoria*) และหนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) พบว่า หนอนนกมีปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสสูงกว่า ในขณะที่แคลเซียมในแมลงบางชนิดอาจมากกว่า เช่น หนอนแมลงวันลาย ซึ่งมีเปลือกที่แข็งและมีการสะสมแคลเซียมคาร์บอเนต แต่แคลเซียมจากแหล่งนั้น มักอยู่ในรูปอนินทรีย์ซึ่งดูดซึมได้น้อย (Finke, 2007; EFSA, 2021) อีกทั้งหนอนนกยังมีปริมาณสังกะสีและเหล็กในระดับที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของร่างกาย โดยเฉพาะในกลุ่มผู้บริโภคที่มีความเสี่ยงต่อภาวะขาดแร่ธาตุ เช่น ผู้หญิงวัยเจริญพันธุ์ ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่รับประทานอาหารจากพืชเป็นหลัก (Stull, 2021) โดยแร่ธาตุจากแมลงมักอยู่ในรูปที่มี Bioavailability สูง เช่น Zinc-chelate หรือ Iron-peptide complexes ซึ่งร่างกายสามารถดูดซึมได้ดีกว่าแร่ธาตุสังเคราะห์ทั่วไป (Finke, 2013) ในมุมของการพัฒนาอาหารทางเลือก หนอนนกสามารถเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมแร่ธาตุ อาหารฟังก์ชัน หรือสูตรอาหารสำหรับกลุ่มเฉพาะ เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และนักกีฬา โดยการออกแบบสูตรอาหาร

ISSN 2821 – 9880 (Online)

สามารถเลือกใช้หนอนนกในระยะที่มีแร่ธาตุเป้าหมายสูงเพื่อเสริมคุณค่าเฉพาะด้าน เช่น ใช้ระยะตัวอ่อนสำหรับสูตรอาหารเสริมโพแทสเซียม และใช้ระยะตัวเต็มวัยสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการฟอสฟอรัสและสังกะสี

องค์ประกอบกรดไขมันของหนอนนกแสดงรูปแบบที่ชัดเจนในแต่ละระยะการพัฒนา โดยพบว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีสัดส่วนมากที่สุดในองค์ประกอบทั้งหมด โดยกรดโอเลอิก (C18:1n9c) เป็นกรดไขมันหลักที่พบในสัดส่วน 49.54 %, 46.28 %, และ 48.82 % ในระยะตัวอ่อน ระยะดักแด้ และระยะตัวเต็มวัย ตามลำดับ รองลงมาคือกรดไลโนเลอิก (C18:2n6c) ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากระยะตัวอ่อน (19.84 %) ไปยังระยะตัวเต็มวัย (24.86 %) และกรดปาล์มิติก (C16:0) ที่คงระดับค่อนข้างคงที่ในทุกระยะ (17.12-18.97 %) รูปแบบการกระจายตัวนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Noyens *et al*. (2023) ซึ่งรายงานถึงการพบกรดโอเลอิก กรดไลโนเลอิก และกรดปาล์มิติกในแมลงที่สามารถบริโภคได้ กรดไขมันสายยาวแสดงความแตกต่างเฉพาะระยะของวงจรชีวิต โดยกรดไขมันบางชนิด เช่น C18:3n3 (0.65 %) และ C20:4n6 (0.085 %) พบเฉพาะในระยะตัวอ่อน ในขณะที่ระยะตัวเต็มวัย มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่เรียบง่ายขึ้น โดยมีจำนวนสารประกอบที่ตรวจพบน้อยลงแต่ยังคงมีสัดส่วนของกรดไขมันจำเป็น โดยเฉพาะ C18:2n6c ในระดับสูง ความแตกต่างขององค์ประกอบกรดไขมันในแต่ละระยะนี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทาง เมแทบอลิซึมระหว่างกระบวนการเมตะมอร์โฟซิส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tzompa-Sosa *et al*. (2014) ที่ทำการวิเคราะห์โปรไฟล์ไขมันของแมลงอย่างละเอียด สัดส่วนที่สูงของกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะกรดไขมันโอเมก้า-6 และโอเมก้า-9 ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการเป็นประโยชน์ด้านโภชนาการสำหรับการบริโภคของมนุษย์ องค์ประกอบกรดไขมันกลุ่มโอเมก้าในหนอนนกมีความโดดเด่นเมื่อเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น โดยเฉพาะในกลุ่มกรดไขมันไลโนเลอิก (C18:2n6c) ซึ่งจัดเป็นกรดไขมันจำเป็นกลุ่มโอเมก้า-6 ที่พบในปริมาณสูงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษานี้พบว่าหนอนนกมีกรดไลโนเลอิกในช่วง 19.84–24.86 % ของกรดไขมันทั้งหมด ซึ่งสูงกว่าจิ้งหรีด ตั๊กแตน และหนอนแมลงวันลายที่มีค่าอยู่ระหว่าง 5-12 % (Tzompa-Sosa *et al*., 2014; Zieli**ń**ska *et al*., 2015) ปริมาณโอเมก้า-6 ที่สูงนี้มีบทบาทสำคัญต่อระบบประสาท การสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ และกระบวนการอักเสบที่จำเป็นของร่างกาย นอกจากนี้หนอนนกยังเป็นหนึ่งในไม่กี่ชนิดของแมลงกินได้ที่มีการตรวจพบกรดไขมันโอเมก้า-3 คือ alpha-linolenic acid (C18:3n3) ในระดับที่วัดได้ (ประมาณ 0.65 % ในระยะตัวอ่อน) ในขณะที่แมลงชนิดอื่น เช่น *Acheta domesticus*, *Locusta migratoria* และ *Hermetia illucens* มักพบในระดับต่ำมากหรือไม่พบเลย (Spranghers *et al*., 2017) แม้ปริมาณโอเมก้า-3 ในหนอนนกจะอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับปลาและพืชน้ำมัน แต่ก็ช่วยเพิ่มความสมดุลของอัตราส่วนกรดไขมันโอเมก้า-6 และโอเมก้า-9 ให้ใกล้เคียงกับเกณฑ์โภชนาการที่แนะนำมากขึ้น (Simopoulos, 2002)

กรดอะมิโนจำเป็นที่สำคัญ เช่น ลิวซีน (Leucine) ไลซีน (Lysine) วาลีน (Valine) และทรีโอนีน (Threonine) มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างแต่ละระยะการพัฒนา ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างในลักษณะทางชีวภาพและการเจริญเติบโตของหนอนนกในแต่ละระยะ การเปลี่ยนแปลงปริมาณลิวซีนแสดงให้เห็นว่าในตัวเต็มวัยและตัวอ่อนมีปริมาณลิวซีนสูงสุด ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่มีบทบาทในการกระตุ้นการสังเคราะห์โปรตีนและกระบวนการการเจริญเติบโตของเซลล์ ขณะที่ดักแด้แสดงค่าลิวซีนต่ำกว่าชัดเจน ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในระหว่างกระบวนการดักแด้ที่ลดการเติบโตเพื่อเตรียมตัวสำหรับการเปลี่ยนแปลงเป็นตัวเต็มวัย (Yi *et al*., 2013; Zieli**ń**ska *et al*., 2015) โดยลิวซีนมีบทบาทในการกระตุ้นการสังเคราะห์โปรตีนและการเจริญเติบโตของเซลล์ (BCAAs) พบว่า มีปริมาณสูงที่สุดในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัย โดยเฉพาะในระยะตัวเต็มวัย ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเตรียมพร้อมด้านการเคลื่อนไหวและการสืบพันธุ์ ในขณะที่ระยะดักแด้มีปริมาณลิวซีนต่ำกว่าชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลจากการหยุดการเจริญเติบโตชั่วคราวและมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเพื่อเข้าสู่ระยะตัวเต็มวัย (Kim *et al*., 2019)

ISSN 2821 – 9880 (Online)

สำหรับ ไลซีน ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์โปรตีนและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต พบว่ามีปริมาณสูงสุดในระยะดักแด้ ซึ่งอาจสะท้อนถึงความจำเป็นในการสร้างโปรตีนโครงสร้างใหม่ที่จำเป็นต่อกระบวนการแปรสภาพร่างกาย (metamorphosis) ขณะที่ในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัยมีปริมาณต่ำกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไลซีนถูกนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อที่สำคัญในช่วงต้นของการเจริญเติบโตแล้ว (Finke, 2002) วาลีนมีบทบาทในการสร้างกล้ามเนื้อ พบในปริมาณสูงสุดในระยะตัวเต็มวัย ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการพลังงานและการใช้กล้ามเนื้อในช่วงที่มีการเคลื่อนไหวและการสืบพันธุ์มากที่สุด ระยะตัวอ่อนมีวาลีนมากกว่าดักแด้ ซึ่งสนับสนุนแนวคิดว่าระยะต้นของการเจริญเติบโตเป็นช่วงที่มีการใช้โปรตีนในการพัฒนาอย่างรวดเร็ว (Van Broekhoven *et al*., 2015) ทรีโอนีนมีความจำเป็นต่อการสร้างโปรตีนและการรักษาสมดุลของระบบย่อยอาหาร พบว่า ลดลงอย่างชัดเจนในระยะดักแด้ ซึ่งอาจเป็นผลจากการลดลงของกิจกรรมทางเมแทบอลิซึมในช่วงที่แมลงหยุดกินอาหารและเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Zielińska *et al*., 2015) ในส่วนของไทโรซีน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารสื่อประสาท พบว่า มีแนวโน้มลดลงในตัวเต็มวัย แสดงให้เห็นถึงการลดความต้องการสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบประสาทในระยะสุดท้ายของชีวิตแมลง (Bulet *et al*., 1999) ขณะที่ฮิสทิดีน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะดักแด้ สอดคล้องกับบทบาทในการรักษาสมดุลภายในเซลล์และการควบคุมภาวะออกซิเดชันในช่วงที่แมลงต้องเผชิญกับความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างรวดเร็ว (Feder & Hofmann, 1999) ฟีนิลอะลานีนและทริปโตฟาน พบในปริมาณสูงในระยะตัวอ่อน และลดลงในระยะดักแด้และตัวเต็มวัย ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทของกรดอะมิโนเหล่านี้ในกระบวนการพัฒนาระบบประสาท และการสร้างโครงสร้างเซลล์ในระยะเจริญเติบโตต้น (Stull & Weir, 2023) ในการเปรียบเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น เช่น จิ้งหรีดบ้าน (*Acheta domesticus*), ตั๊กแตน (*Locusta migratoria*) และด้วง Zophobas (*Zophobas morio*) พบว่า หนอนนกมีปริมาณไลซีนเฉลี่ยสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 5.5–6.2 % ของกรดอะมิโนทั้งหมด ในขณะที่จิ้งหรีดมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.2 % และตั๊กแตนประมาณ 4.5 % (Belluco *et al*., 2013; Yi *et al*., 2013) ซึ่งกรดอะมิโนไลซีนมีความสำคัญเป็นพิเศษในอาหารที่มีฐานคาร์โบไฮเดรตสูง เช่น ข้าวหรือข้าวโพด ซึ่งมักขาดไลซีนทำให้โปรตีนจากหนอนนกสามารถเสริมคุณค่าทางโภชนาการได้ดีกว่า ในส่วนของกรดอะมิโนเมทไธโอนีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำกัดอันดับแรกในโปรตีนจากพืชหลายชนิด พบว่า หนอนนกมีปริมาณเฉลี่ยที่ 1.2–1.5 % สูงกว่าจิ้งหรีด (ประมาณ 1.0 %) และตั๊กแตน (ประมาณ 0.9 %) (Rumpold & Schlüter, 2013) การมีปริมาณกรดอะมิโนเมทไธโอนีนในระดับสูงของหนอนนกจึงช่วยเพิ่มสมดุลของกรดอะมิโนโดยรวม และเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นอาหารฟังก์ชัน เมื่อพิจารณาสัดส่วนของกรดอะมิโนจำเป็นต่อกรดอะมิโนทั้งหมด (EAA/TAA) พบว่า หนอนนกมีค่าสัดส่วนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 47–50 % ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของโปรตีนคุณภาพสูงจากสัตว์ เช่น ไข่ (ประมาณ 50–55 %) และสูงกว่าค่าของแมลงชนิดอื่น เช่น จิ้งหรีด (~42 %) หรือหนอนไหม (*Bombyx mori*; ~38 %) (Zielińska *et al*., 2015) แสดงให้เห็นว่าหนอนนกมีโปรตีนที่มีคุณภาพสูงและเหมาะสมกับการย่อยดูดซึมในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าหนอนนกสามารถผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น การอบแห้งหรือการไฮโดรไลซ์ เพื่อให้ได้โปรตีน ที่มีค่าการย่อยได้สูง โดยมีค่า Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score (PDCAAS) มากกว่า 0.85 ซึ่งสูงกว่าค่าที่รายงานในแมลงบางชนิด เช่น แมลงสาบ (*Blaptica dubia*) (Poelaert *et al*., 2017) ดังนั้น โปรตีนจากหนอนนกจึงมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารฟังก์ชันหรืออาหารเสริมทางโภชนาการ

การวิเคราะห์โปรตีนของหนอนนกในแต่ระยะการเจริญเติบโต ด้วยเทคนิค SDS-PAGE พบแถบโปรตีนที่หลากหลายช่วงน้ำหนักโมเลกุล โดยครอบคลุมช่วง 10–200 kDa ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างด้านการแสดงออกของโปรตีนตามหน้าที่ชีวภาพในแต่ละช่วงพัฒนา โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ 150–200 kDa ปรากฏเด่นชัดในทุกระยะ โดยเฉพาะในระยะตัวอ่อนและดักแด้ ซึ่งอาจ

ISSN 2821 – 9880 (Online)

เกี่ยวข้องกับ โปรตีนโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น Titin-like proteins Cuticular proteins หรือโปรตีนที่มีบทบาทในการพัฒนาโครงสร้างร่างกาย เช่น ปีก แขนขา และเปลือกนอกของแมลงในระยะเปลี่ยนผ่าน (Zieliństka *et al*., 2015; Kim *et al*., 2019) โปรตีนขนาดใหญ่นี้ยังอาจทำหน้าที่เป็น scaffolding หรือแพลตฟอร์มสำหรับการจัดระเบียบของโปรตีนตัวอื่นในกระบวนการพัฒนาระบบกล้ามเนื้อและโครงสร้างภายใน โปรตีนในช่วงน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (40–85 kDa) ตรวจพบในทุกระยะเช่นกัน โดยมีการกระจายตัวคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันในด้านความเข้มของแถบ ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณโปรตีนที่ไม่เท่ากัน โปรตีนในช่วงนี้ส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับเอนไซม์เมตาบอลิซึม เช่น Enolase Aldolase และ ATP synthase รวมถึง โปรตีนโครงสร้าง อย่าง Actin Tropomyosin และ Troponin ซึ่งมีบทบาทในระบบกล้ามเนื้อและการเคลื่อนไหวของแมลง (Feder & Hofmann, 1999) ในส่วนของระยะตัวเต็มวัย แสดงการสะสมของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (10–20 kDa) อย่างเด่นชัด ซึ่งอาจเป็นกลุ่มโปรตีนภูมิคุ้มกันขนาดเล็ก เช่น Defensin Lysozyme หรือ Antimicrobial peptides (AMPs) ที่มีบทบาทในการป้องกันการติดเชื้อและการรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ภายในร่างกาย โดยเฉพาะในระยะที่แมลงต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อสูง (Bulet *et al*., 1999; Stull & Weir, 2023) การจัดจำแนกโปรตีนตามช่วงน้ำหนักโมเลกุลเช่นนี้ไม่เพียงแต่ช่วยระบุชนิดของโปรตีนเท่านั้น แต่ยังมีความสำคัญเชิงประยุกต์ เช่น การคัดเลือกช่วงน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนเป้าหมายสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนเข้มข้น อาหารฟังก์ชัน หรือแม้แต่การผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้จากแมลง ซึ่งส่งเสริมให้หนอนนกเป็นทางเลือกใหม่ของแหล่งโปรตีนที่มีศักยภาพทั้งด้านโภชนาการและสุขภาพ

สเปกตรัม FTIR ของหนอนนกในแต่ระยะการเจริญเติบโต พบว่า β-sheet เป็นโครงสร้างหลักของโปรตีนหนอนนก (51–55 %) ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรต่อการย่อยและการทนความร้อน ทำให้เหมาะสำหรับนำไปพัฒนาเป็น functional ingredients ในอาหารเสริมสุขภาพหรือโปรตีนบาร์ (Azagoh *et al*., 2016) การวิเคราะห์ด้วย PCA สามารถแยกแยะโปรตีนจากแต่ละระยะได้อย่างชัดเจน สะท้อนถึงความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโปรตีนตามช่วงชีวิตของแมลง ซึ่งสามารถใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์โปรตีนเฉพาะกลุ่ม เช่น ผลิตภัณฑ์เสริมสร้างกล้ามเนื้อจากโปรตีนระยะดักแด้ หรือผลิตภัณฑ์เสริมภูมิคุ้มกันจากโปรตีนในตัวเต็มวัย

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติของหนอนนกในแต่ละระยะการเจริญเติบโตได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในองค์ประกอบทางเคมีและโภชนาการของหนอนนกในระหว่างการพัฒนาในแต่ละระยะ โดยมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน ไขมัน ไคติน แร่ธาตุ กรดไขมัน และกรดอะมิโนซึ่งมีผลกระทบต่อการพัฒนาและการใช้ประโยชน์ทางโภชนาการของหนอนนกในแต่ละระยะ ระยะดักแด้มีปริมาณโปรตีนสูงสุด (54.38 %) ซึ่งลดลงในระยะตัวอ่อน (49.71 %) และระยะตัวเต็มวัย (47.25 %) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการปรับโครงสร้างเนื้อเยื่อในระหว่างการพัฒนา ไขมันลดลงจากตัวอ่อน (24.01 %) ไปยังตัวเต็มวัย (10.41 %) ในขณะที่ไคตินเพิ่มขึ้นในตัวเต็มวัย (23.26 %) การสะสมไขมันเกิดขึ้นในช่วงดักแด้เพื่อใช้พลังงานในการสร้างโครงสร้างภายนอก (cuticle) ฟอสฟอรัสและกำมะถันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากตัวอ่อนถึงตัวเต็มวัย ในขณะที่แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสีมีแนวโน้มลดลง กรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกและกรดไลโนเลอิกมีสัดส่วนสูงในทุกระยะ และมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างกรดอะมิโน กรดอะมิโนจำเป็น เช่น ลิวซีน ไลซีน และวาลีนมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละระยะ ซึ่งสะท้อนถึงการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วน

ของ β-sheet, α-helix และ Random coil ในแต่ละระยะ การศึกษานี้ไม่เพียงช่วยให้เราเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารในระหว่างการพัฒนาแต่ละระยะ แต่ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการใช้สารอาหารในกระบวนการเติบโต ซึ่งมีประโยชน์ในการกำหนดช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหรือโปรตีนในอนาคต

การอนุญาตวิจัยในสัตว์

การทดลองนี้ได้ผ่านการพิจารณา อนุมัติ และปฏิบัติตามกฎระเบียบที่คณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินงานต่อสัตว์ทดลองทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUTIACUC-005/2023)

เอกสารอ้างอิง

ณัฏฐา วิศิษฎ์ยากร และธนศักดิ์ พื้นไธสงค์. 2548. หนอนนกทางเลือกสำหรับอาหารสัตว์. *ศูนย์บริการวิชาการ*, *3*(2), 9-15.

อภินันท์ สุวรรณรักษ์. (2543). หนอนนก อาหารสุขภาพสัตว์. *เทคโนโลยีชาวบ้าน*, *12*(29), 63–65.

AOAC International. (2016). Official Methods of Analysis of AOAC International. (AOAC: Washington, DC, USA, 2016; ISBN 0935584870. Available online: https://www.techstreet.com/standards/official-methods-of-analysis-of-aoac-international-20th-edition-2016?product_id=1937367 (accessed on 25 January 2024)

Arrese, E.L., Soulages, J.L. (2010). Insect fat body: energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology*, *55*, 207-25. doi : 10.1146/annurev-ento-112408-085356

Azagoh, C., Ducept, F., Garcia, R., Rakotozafy, L., Cuvelier, M.-E., Keller, S., Lewandowski, R., & Mezdour, S. (2016). Extraction and physicochemical characterization of *Tenebrio molitor* proteins. *Food Research International, 88*, 24-31. doi : 10.1016/j.foodres.2016.06.010

Barker, D., Fitzpatrick, M.P., & Dierenfeld, E.S. (1998). Nutrient composition of selected whole invertebrates. *Zoo Biology: Published in affiliation with the American Zoo and Aquarium Association, 17*(2), 123-134. doi : 10.1002/(SICI)1098-2361(1998)17:2<123::AID-ZOO7>3.0.CO;2-B

Bawa, M., Songsermpong, S., Kaewtapee, C., Chanput, W. (2020). Effect of diet on the growth performance, feed conversion, and nutrient content of the house cricket. *Journal of Insect Science*, *20*, 1-10. doi : 10.1093/jisesa/ieaa014

Belluco, S., Losasso, C., Maggioletti, M., Alonzi, C.C., Paoletti, M.G., Ricci, A. (2013). Edible insects in a food safety and nutritional perspective: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12*(3), 296–313. doi : 10.1111/1541-4337.12014

Bulet, P., Hetru, C., Dimarcq, J.L., Hoffmann, D. (1999). Antimicrobial peptides in insects; structure and function. *Developmental and Comparative Immunology,* (*4-5*), 329-44. doi : 10.1016/s0145-305x(99)00015-4

EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2021). Safety of dried yellow mealworm (Tenebrio molitor larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, *19*(1), 6343. doi : 10.2903/j.efsa.2021.6343

Fadlaoui, S., El Asri, O., Mohammed, L., Sihame, A., Omari, A., Melhaoui, M. (2019). Isolation and characterization of chitin from shells of the freshwater crab *Potamon algeriense*. *Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives,* (*24*), 23-35. doi : 10.15259/PCACD.24.002

Feder, M.E., Hofmann, G.E. (1999). Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecological physiology. *Annual Review of Physiology*, *61*, 243-82. doi : 10.1146/annurev. physiol.61.1.243

Feng, Y., Chen, X.M., Zhao, M., He, Z., Sun, L., Wang, C.Y., Ding, W.F. (2018). Edible insects in China: Utilization and prospects. *Insect Science* , *25*(2), 184-198. doi : 10.1111/1744-7917.12449

Finke, M.D. (2013). Complete nutrient content of four species of feeder insects. *Zoo Biology*, *32*(1), 27-36. doi: 10.1002/zoo.21012

Finke, M.D. (2013). Estimate of chitin in raw whole insects. *Zoo Biology, 26*(2), 105–115. doi : 10.1002/zoo.20123

Folch, J., Lees, M., Sloane Stanley, G.H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry, 226*(1), 497-509. doi : 10.1016/S0021-9258(18) 64849-5

Ghosh, S., Lee, S.M., Jung, C., Meyer-Rochow, V.B. (2017). Nutritional composition of five commercial edible insects in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, *20*, 686–694. doi : 10.1016/j.aspen.2017.04.003

Jayanthi, K., Lamichhane, T.N., Roy, V., Zhao, F., Navrotsky, A., Moyer, B.A., Paranthaman, M.P. (2023). Integrated circular economy model system for direct lithium extraction: from minerals to batteries utilizing aluminum hydroxide. *ACS Applied Materials & Interfaces, 15*(50), 58984-58993. doi : 10.1021/ acsami.3c12070

Jongema, Y. (2017). List of edible insects of the world. Wageningen University & Research. https://www.wur.nl/ en/Research-Results/Chair-groups/Plant-Sciences/Laboratory-of-Entomology/Edible-insects/Worldwide-species-list.htm (accessed 29 April 2025)

ISSN 2821 – 9880 (Online)

Kim, T.K., Yong, H.I., Kim, Y.B., Kim, H.W., Choi, Y.S. (2019). Edible Insects as a Protein Source: A Review of Public Perception, Processing Technology, and Research Trends. *Food Science of Animal Resources*, *39*(4), 521-540. doi : 10.5851/kosfa.2019.e53

Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, *197*, 1-33. doi : 10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008

Megido, R.C., Sablon, L., Geuens, M., Brostaux, Y., Alabi, T., Blecker, C., Drugmand, D., Haubruge, E. and Francis, F. (2014). Edible insects acceptance by Belgium consumers: promising attitude for entomophagy development. *Journal of Sensory Studies, 29*, 14-20. doi : 10.1111/joss.12077

Merzendorfer, H., & Zimoch, L. (2003). Chitin metabolism in insects: structure, function and regulation of chitin synthases and chitinases. *Journal of Experimental Biology, 206*(24), 4393-4412. doi : 10.1242/jeb.00709

Mopuri, R., Kalyesubula, M., Rosov, A., Edery, N., Moallem, U., & Dvir, H. (2021). Improved Folch method for liver-fat quantification. *Frontiers in Veterinary Science, 7*, 594853. doi : 10.3389/fvets.2020.594853

Morrison, W.R., & Smith, L.M. (1964). Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride–methanol. *Journal of Lipid Research, 5*(4), 600-608. doi : 10.1016/S0022-2275(20)40190-7

Noyens, I., Schoeters, F., Van Peer, M., Berrens, S., Goossens, S., & Van Miert, S. (2023). The nutritional profile, mineral content and heavy metal uptake of yellow mealworm reared with supplementation of agricultural sidestreams. *Scientific Reports, 13*(1), 11604. doi : 10.1038/s41598-023-38747-w

Oonincx, D.G., de Boer, I.J. (2012). Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans - a life cycle assessment. *PLOS ONE*, *7*(12), e51145. doi : 10.1371/journal.pone.0051145

Oonincx, D.G., van Itterbeeck, J., Heetkamp, M.J.W., van den Brand, H., van Loon, J.J.A., van Huis, A. (2010). An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *PLOS ONE*, *5*(12), e14445. doi : 10.1371/journal.pone.0014445.

Poelaert, C., Francis, F., Alabi, T., Megido, R.C., Crahay, B., Bindelle, J., & Beckers, Y. (2018). Protein value of two insects, subjected to various heat treatments, using growing rats and the protein digestibility-corrected amino acid score. *Journal of Insects as Food and Feed*, *4*(2), 77-87. doi : 10.3920/JIFF2017.0003

Rong, J., Lin, Y., Sui, Z., Wang, S., Wei, X., Xiao, J., & Huang, D. (2019). Amorphous calcium phosphate in the pupal cuticle of Bactrocera dorsalis Hendel (Diptera: Tephritidae): A new discovery for reconsidering the mineralization of the insect cuticle. *Journal of Insect Physiology, 119*, 103964. doi : 10.1016/j.jinsphys.2019.103964

Rumpold, B.A., Oliver, K.S. (2013). Nutritional Composition and Safety Aspects of Edible Insects. *Molecular Nutrition & Food Research, 57*(5), 802–23. doi : 10.1002/mnfr.201200735

Simopoulos, A.P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomed Pharmacother*, *56*(8), 365-79. doi : 10.1016/s0753-3322(02)00253-6

Spranghers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Ovyn, A., Deboosere, S., De Meulenaer, B., Michiels, J., Eeckhout, M., De Clercq, P., De Smet, S. (2017). Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *97*(8), 2594-2600. doi : 10.1002/jsfa.8081

Stull, V.J. (2021). Impacts of Insect Consumption on Human Health. *Journal of Insects as Food and Feed*, *7*, 695–713. doi : 10.3920/JIFF2020.0115

Stull, V.J., Weir, T.L. (2023). Chitin and omega-3 fatty acids in edible insects have underexplored benefits for the gut microbiome and human health. *Nature Food, 4*(4), 283-287. doi : 10.1038/s43016-023-00728-7.

Tan, H.S.G., Fischer, A.R.H., Tinchan, P., Stieger, M., Steenbekkers, L.P.A., van Trijp, H.C.M. (2015). Insects as food: Exploring cultural exposure and individual experience as determinants of acceptance. *Food Quality and Preference*, *42*, 78–89. doi : 10.1016/j.foodqual.2015.01.013

Tan, T., Zimmermann, M., Reichert, A.S. (2016). Controlling quality and amount of mitochondria by mitophagy: insights into the role of ubiquitination and deubiquitination. *Journal of Biological Chemistry*, *397*(7), 637-47. doi : 10.1515/hsz-2016-0125

Tzompa-Sosa, D.A., Yi, L., van Valenberg, H.J., van Boekel, M.A., Lakemond, C.M. (2014). Insect lipid profile: aqueous versus organic solvent-based extraction methods. *Food Research International, 62*, 1087-1094. doi : 10.1016/j.foodres.2014.05.052

van Broekhoven, S., Oonincx, D.G., van Huis, A., van Loon, J.J. (2015). Growth performance and feed conversion efficiency of three edible mealworm species (Coleoptera: Tenebrionidae) on diets composed of organic by-products. *Journal of Insect Physiology*, *73*, 1-10. doi : 10.1016/j.jinsphys.2014.12.005

van Huis, A. Potential of insects as food and feed in assuring food security. (2013). *Annual Review of Entomology*, *58*, 563-83. doi : 10.1146/annurev-ento-120811-153704

Van Huis, A., Dicke, M., van Loon, J.J.A. (2015). Insects to Feed the World. *Journal of Insects as Food and Feed*, *1*, 3-5. doi : /10.3920/JIFF2015.x002

Vorland, C.J., Stremke, E.R., Moorthi, R.N., Hill Gallant, K.M. (2017). Effects of Excessive Dietary Phosphorus Intake on Bone Health. *Current Osteoporosis Reports*, *15*(5), 473-482. doi : 10.1007/s11914-017-0398-4.

Yi, L., Lakemond, C.M., Sagis, L.M., Eisner-Schadler, V., van Huis, A., van Boekel, M.A. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, *141*(4), 3341-3348. doi : 10.1016/j.foodchem.2013.05.115

Yu, X., He, Q., & Wang, D. (2021). Dynamic analysis of major components in the different developmental stages of *Tenebrio molitor*. *Frontiers in Nutrition, 8*, 689746. doi : 10.3389/fnut.2021.689746

Zhao, X., Vázquez-Gutiérrez, J.L., Johansson, D.P., Landberg, R., Langton, M. (2016). Yellow Mealworm Protein for Food Purposes - Extraction and Functional Properties. *PLOS ONE*, *11*(2), 147791. doi : 10.1371/ journal.pone.0147791

Zieliński, E., Baraniak, B., Karaś, M., Rybczyńska, K., & Jakubczyk, A. (2015). Selected species of edible insects as a source of nutrient composition and in vitro cytotoxicity evaluation. *Food Research International*, *77*, 460–466. doi : 10.1016/j.foodres.2015.09.008