การศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจนของหนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens* L.) และการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนของสูตรอาหารที่ใช้หนอนแมลงวันลายเป็นแหล่งโปรตีนสำหรับไก่โคราช

Determination of True Metabolizable Energy Corrected for Nitrogen (TMEn) of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) and Nutrient Digestibility and Nitrogen Utilization of Diets Containing Black Soldier Fly Larvae as a Protein Source for Korat Chickens

ธนทัต เทียบชิง[1] และสุทิศา เข็มผะกา[1*]
Thanatat Thiabching[1] and Sutisa Khempaka[1*]

Received date: 24 ก.ย. 68 Revised date: 7 ธ.ค. 68 Accepted date: 11 ธ.ค. 68
DOI: https://doi.org/10.55003/kmaj.2026.269156

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (nitrogen-corrected true metabolizable energy; TMEn) ของหนอนแมลงวันลาย (Black soldier fly larvae: BSFL) และประเมินผลการใช้ BSFL เป็นแหล่งโปรตีนต่อค่าการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนในไก่โคราช การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ประเมินค่า TMEn ของ BSFL ใช้ไก่โคราชคละเพศ อายุ 9 สัปดาห์ จำนวน 20 ตัว แบ่งเป็นกลุ่มควบคุม (อดอาหาร) และกลุ่มทดลอง (ป้อน BSFL 15 กรัม/ตัว) ผลการเก็บข้อมูลและคำนวณพบว่า BSFL มีค่า TMEn เท่ากับ 3,667 kcal/Kg (DM) ส่วนที่ 2 ใช้ไก่โคราชคละเพศ อายุ 6 สัปดาห์ จำนวน 35 ตัว แบ่งเป็น 5 กลุ่มการทดลอง ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ประกอบด้วย กลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ใช้ BSFL ระดับ 5 10 15 และ 20% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า BSFL สามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนได้สูงสุดถึงระดับ 20% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้ง เถ้า สารอินทรีย์ และไขมัน รวมถึงการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน (P>0.05) นอกจากนี้ การใช้ BSFL ระดับ 15% ยังช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนสูงกว่ากลุ่มควบคุม (P<0.05) โดยสรุป BSFL มีค่า TMEn เท่ากับ 3,667 kcal/Kg (DM) และสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนในสูตรอาหารไก่โคราชได้ถึงระดับ 20% โดยไม่ส่งผลลบต่อประสิทธิภาพการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษา BSFL ต่อยอดเพื่อประเมินผลด้านสมรรถนะการเจริญเติบโตและสุขภาพสัตว์ในระยะยาว

คำสำคัญ: หนอนแมลงวันลาย พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ การย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ ไก่โคราช

Abstract

This study aimed to determine the nitrogen-corrected true metabolizable energy (TMEn) of black soldier fly larvae (BSFL) and to evaluate the effects of incorporating BSFL as a protein source on nutrient digestibility and nitrogen utilization in Korat chickens. The experiment was divided into two parts. In part 1, the TMEn of BSFL was evaluated using 20 mixed-sex Korat chickens (9 weeks old). The birds were divided into 2 groups: a control group (fasted) and a treatment group (force-fed 15 g BSFL per bird). Based on excreta collection and calculation, BSFL had a TMEn value of 3,667 kcal/Kg (DM). In part 2, 35 mixed-sex Korat chickens (6 weeks old) were randomly distributed to 5 treatment groups in a CRD, a control diet and diets containing BSFL at 5, 10, 15, and 20%. The results showed that BSFL could be used as a protein source at inclusion levels up to 20% without negative effects on dry matter, ash, organic matter, and fat digestibility, as well as nitrogen utilization (P>0.05). Moreover, inclusion of BSFL at 15% significantly improved nutrient digestibility and nitrogen utilization compared to the control group (P<0.05). In conclusion, BSFL has a TMEn value of 3,667 kcal/Kg (DM) and can be incorporated as a protein source in Korat chicken diets up to 20% without adverse effects on nutrient digestibility and utilization. However, further studies are recommended to evaluate the effects of BSFL on growth performance and long-term animal health.

Keywords: black soldier fly larvae, metabolizable energy, nutrient digestibility and utilization, Korat chickens

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000
[1] School of Animal Technology and Innovation, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000
* Corresponding author: khampaka@sut.ac.th

คำนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตสัตว์ทั่วโลกมีการพัฒนาและขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับจำนวนประชากรและความต้องการอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น (Herrero and Thornton, 2013) องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) คาดการณ์ว่าภายในปี ค.ศ. 2050 ความต้องการบริโภคเนื้อสัตว์ของประชากรโลกจะขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นมากถึง 181 ล้านตัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มเนื้อสัตว์ปีก (Alexandratos and Bruinsma, 2012) สถานการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ความต้องการใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุดิบอาหารแหล่งโปรตีน เช่น กากถั่วเหลืองและปลาป่น ซึ่งมีแนวโน้มประสบปัญหาการขาดแคลนและราคาที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การศึกษาและวิจัยเพื่อหาแหล่งวัตถุดิบโปรตีนทางเลือกใหม่ที่ยั่งยืน และสามารถผลิตได้จากของเสียหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่มนุษย์ไม่ใช้แล้ว เช่น หนอนแมลงวันลาย (black soldier fly larvae, BSFL) จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา

แมลงวันลาย (*Hermetia illucens* L.) หรือที่รู้จักกันในชื่อ แมลงวันทหารดำ หรือ แมลงทหารเสือ เป็นแมลงที่พบได้ทั่วไปในเขตร้อนและเขตอบอุ่น เป็นแมลงที่ไม่เป็นพาหะนำโรคและไม่เป็นศัตรูพืช (Sheppard et al., 2002) ตัวหนอนมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรียวัตถุ และสามารถเปลี่ยนกากอินทรีย์หรือเศษอาหารให้เป็นชีวมวลที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วและใช้พื้นที่เลี้ยงน้อย จึงเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (Tomberlin and Sheppard, 2001) จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า BSFL มีระดับโปรตีนประมาณ 37–63% และไขมัน 7–47% (Abduh et al., 2017; Abduh et al., 2018; Sheppard et al., 2002; Zheng et al., 2012) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและชนิดของวัสดุเลี้ยง (Nguyen et al., 2015; Zheng et al., 2012) คุณค่าทางโภชนะดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับปลาป่นที่มีโปรตีนประมาณ 55–65% และสูงกว่ากากถั่วเหลืองซึ่งมีโปรตีนเฉลี่ยราว 44–48% (Feedipedia, 2020) ส่งผลให้ BSFL ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการพัฒนาเป็นวัตถุดิบโปรตีนทดแทนในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์หลากหลายชนิด เช่น สัตว์ปีก สุกร ปลาน้ำจืด และกุ้ง (Van Huis, 2018) อย่างไรก็ตาม ราคาของหนอนแมลงวันลายในเชิงอุตสาหกรรมยังค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนทั่วไป เนื่องจากต้นทุนการผลิต การแปรรูป การฆ่าเชื้อ และการทำให้แห้ง ตลอดจนการขยายกำลังการผลิตเชิงพาณิชย์ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น (Van Huis and Oonincx, 2017) แม้ราคาเฉลี่ยต่อหน่วยน้ำหนักอาจสูงกว่าปลาป่นและกากถั่วเหลืองในปัจจุบัน แต่ BSFL ถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับเกษตรกรรายย่อยหรือฟาร์มขนาดเล็ก หากสามารถผลิตภายในฟาร์มโดยใช้เศษอาหารหรือกากพืชผลทางการเกษตรที่หาได้ในท้องถิ่น ก็จะช่วยลดต้นทุนโปรตีนในระยะยาว ลดปริมาณขยะอินทรีย์ และเพิ่มมูลค่าเศษเหลือทิ้งให้กลายเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีคุณค่า ดังนั้นเพื่อการใช้ประโยชน์ BSFL ในสูตรอาหารสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องมีการประเมินคุณค่าทางโภชนะของ BSFL อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะค่าพลังงานที่สัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy, ME) รวมถึงค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนทั่วไปในอาหารสัตว์ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาสูตรอาหารสัตว์ที่แม่นยำ ตอบสนองความต้องการของสัตว์แต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม และช่วยกำหนดขีดจำกัดสูงสุดของการใช้ BSFL ในอาหารสัตว์อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

ไก่โคราชเป็นไก่ลูกผสมพื้นเมือง 50% ระหว่างพ่อพันธุ์เหลืองหางขาวและไก่แม่พันธุ์สังเคราะห์ที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อ “ไก่แม่พันธุ์ มทส.” ปัจจุบันการเลี้ยงไก่โคราชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตอบสนองต่อความต้องการของตลาดผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญต่อสุขภาพและคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อสัตว์ เนื้อไก่โคราชมีลักษณะเด่น คือ มีปริมาณโปรตีนสูง ไขมันต่ำ เจริญเติบโตเร็ว แข็งแรง ทนต่อโรคได้ดี และยังคงคุณลักษณะด้านรสชาติใกล้เคียงกับไก่พื้นเมือง จึงเป็นที่นิยมจากผู้บริโภคที่มองหาแหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่ อย่างไรก็ตาม การผลิตไก่โคราชในระดับฟาร์มยังคงประสบปัญหาสำคัญ คือต้นทุนอาหารสัตว์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดต้นทุนการผลิตโดยรวม การแสวงหาแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีศักยภาพ ผลิตได้ในท้องถิ่น และมีความยั่งยืน จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน จากการรวบรวมเอกสาร พบว่า BSFL มีศักยภาพในการใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ โดยสามารถใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารไก่เนื้อได้ในระดับ 8% (Attivi et al., 2020) โดยไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และคุณภาพซาก อีกทั้งยังสามารถทดแทนกากถั่วเหลืองได้ในระดับ 10–20% (Arango Gutiérrez, 2005; Cullere et al., 2016; Zhang et al., 2014) อย่างไรก็ตาม การใช้ BSFL เป็นแหล่งโปรตีนในสูตรอาหารไก่โคราชยังขาดข้อมูลการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาสูตรอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (nitrogen-corrected true metabolizable energy; TMEn) ของ BSFL และประเมินผลของการใช้ BSFL ในระดับต่าง ๆ ต่อค่าการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนในไก่โคราช

วิธีการศึกษา

1. การศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (nitrogen-corrected true metabolizable energy, TMEn) ของ BSFL

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (TMEn) ของ BSFL เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประกอบสูตรอาหารทดลอง ใช้ไก่โคราชคละเพศ อายุ 9 สัปดาห์ น้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ย 1,542±83 กรัม แบ่งเป็น 2 กลุ่มละ 10 ซ้ำ (replicates) ๆ ละ 1 ตัว ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มควบคุม (control): อดอาหาร ใช้คำนวณค่าการสูญเสียพลังงานภายในร่างกาย (endogenous energy loss) และกลุ่มที่ 2 กลุ่มป้อน BSFL (BSFL-fed): ป้อน BSFL โดยวิธีป้อนโดยตรง (force feeding) ไก่ทุกตัวเลี้ยงในกรงขังเดี่ยวแบบ metabolic cage ขนาด 25 x 40 x 40 เซนติเมตร ปรับสภาพให้คุ้นชินกับสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลา 4 วัน ก่อนเริ่มการเก็บข้อมูล ในวันที่ 5 ของการทดลอง ไก่ทั้งสองกลุ่มถูกอดอาหารเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ได้รับน้ำดื่มตามปกติ) เพื่อให้ขับถ่ายอาหารตกค้างออกจากระบบทางเดินอาหาร จากนั้นดำเนินการทดลองในแต่ละกลุ่มดังนี้ กลุ่มควบคุม (กลุ่มที่ 1): อดอาหารต่ออีก 24 ชั่วโมง เพื่อนำมูลไปใช้คำนวณการสูญเสียพลังงานภายในร่างกาย และกลุ่มป้อนอาหาร (กลุ่มที่ 2): ป้อน BSFL ปริมาณ 15 กรัม/ตัว โดยปริมาณดังกล่าวดัดแปลงจากวิธีของ Sibbald (1976) ซึ่งแนะนำให้ป้อนอาหารประมาณ 1% ของน้ำหนักตัว ในการทดลองนี้ ทำการป้อน BSFL โดยใช้กรวยพลาสติกต่อท่อยาวสอดผ่านช่องปากเข้าสู่หลอดอาหารไปจนถึงกระเพาะพัก และใช้แท่งพลาสติกค่อย ๆ ดัน BSFL ลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าไก่ได้รับตามปริมาณที่กำหนด (รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของ BSFL แสดงไว้ใน Table 1) จากนั้นนำไก่กลับเข้ากรงขังเดี่ยวซึ่งภายใต้กรงมีถาดรองรับมูล หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างมูลจากไก่ทั้งสองกลุ่ม แยกสิ่งปนเปื้อน เช่น ขน ออกก่อนทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นพ่นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5% ลงบนมูลเพื่อป้องกันการสูญเสียไนโตรเจน ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 55 ºC เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร นำตัวอย่างอาหารและมูลมาวิเคราะห์หาความชื้น โปรตีน และพลังงานรวม เพื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (apparent metabolizable energy; AME) พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (nitrogen-corrected apparent metabolization energy, AMEn) ตามสมการของ Dozier III et al. (2008) และพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน ตามสมการของ Parsons et al. (1982)

$$\text{AME (kcal/kg)} = \frac{[\text{FEf} - \text{EEf}]}{\text{FC}}$$

$$\text{AMEn (kcal/kg)} = \frac{[\text{FEf} - (\text{EEf} + 8.22 \times \text{Nf})]}{\text{FC}}$$

$$\text{TME (kcal/kg)} = \frac{[(\text{FEf} - \text{EEf}) + \text{EEu})]}{\text{FC}}$$

$$\text{TMEn (kcal/kg)} = \frac{\text{FEf} - [\text{EEf} + 8.22 \times \text{Nf}] + [\text{EEu} + 8.22 \times \text{Nu}]}{\text{FC}}$$

โดย

FEf = พลังงานรวมทั้งหมดในอาหารที่ป้อนให้ไก่ (gross energy of the total feed consumed)

EEf = พลังงานในมูลของไก่ที่ได้รับการป้อนอาหาร (energy in the excreta collected from the fed birds)

EEU = พลังงานในมูลของไก่ที่อดอาหาร (energy in the excreta collected from fasted birds)

Nf = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ขับออกมาในมูลของไก่ที่ได้รับการป้อนอาหาร (grams of nitrogen excreted by the fed birds)

Nu = ปริมาณไนโตรเจนที่ไก่อดอาหารสูญเสียในมูล (grams of nitrogen excreted by fasted birds)

FC = ปริมาณอาหารที่ป้อนให้ไก่ (feed consumed)

Table 1 Chemical composition of BSFL meal (as-fed basis)

Items	Black soldier fly larvae meal
Dry matter (%)	93.28
Crude protein (%)	44.78
Ether extract (%)	14.18
Crude fiber (%)	8.10
Ash (%)	21.02
Metabolizable energy (TMEn, kcal/kg)[1/]	3,422
Chitin (%)	7.12
Calcium (g/100g)	6.67
Phosphorus (g/100g)	1.13
Magnesium (g/100g)	0.45
Sodium (g/100g)	0.03
Potassium (g/100g)	1.18
Iron (mg/kg)	100
Manganese (mg/kg)	819
Selenium (mg/kg)	520

[1/] The TMEn values determined in Korat chickens were converted from 3,667 Kcal/Kg on a dry-matter basis to 3,422 Kcal/Kg on an as-fed basis.

2. การศึกษาการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนของ BSFL ในไก่โคราช

สัตว์ทดลอง

ใช้ไก่โคราชคละเพศ อายุ 6 สัปดาห์ ทั้งหมด 35 ตัว น้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ย 710±89 กรัม สุ่มจัดเข้ากลุ่มการทดลอง จำนวน 5 กลุ่ม ๆ ละ 7 ซ้ำ ๆ ละ 1 ตัว เลี้ยงบนกรงขังเดี่ยว ขนาด 25 x 40 x 40 เซนติเมตร ซึ่งมีถาดรองรับมูลอยู่ใต้กรง ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ไก่ทุกตัวได้รับอาหารและน้ำแบบเต็มที่ (*ad libitum*) ตลอดระยะเวลาทดลอง 10 วัน ไก่ทุกตัวได้รับวัคซีนป้องกันโรคนิวคาสเซิลและหลอดลมอักเสบที่อายุ 7 และ 21 วัน วัคซีนกัมโบโรที่อายุ 14 วัน และวัคซีนฝีดาษที่อายุ 28 วัน และเลี้ยงภายใต้โรงเรือนระบบเปิด ตามคำแนะนำและการควบคุมของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การดำเนินการทดลองนี้ได้รับอนุญาตให้ใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ ตามเอกสารอนุญาตเลขที่ SUT-IACUC-002/2023

อาหารทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาระดับที่เหมาะสมเบื้องต้นของการใช้ BSFL ในสูตรอาหารสำหรับไก่โคราช โดยอาหารทดลองทั้งหมดถูกคำนวณให้มีระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้และโปรตีนเท่ากัน ตามคำแนะนำของ Maliwan (2016) และมีองค์ประกอบของโภชนะเพียงพอกับความต้องการของสัตว์ ตามคำแนะนำของ National Research Council (1994) Table 2 อาหารทดลองแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม โดยมีการเติม BSFL ในระดับต่าง ๆ ดังนี้

กลุ่มที่ 1: กลุ่มควบคุม (control)
กลุ่มที่ 2: ใช้ BSFL ที่ระดับ 5% ของสูตรอาหาร
กลุ่มที่ 3: ใช้ BSFL ที่ระดับ 10% ของสูตรอาหาร
กลุ่มที่ 4: ใช้ BSFL ที่ระดับ 15% ของสูตรอาหาร
กลุ่มที่ 5: ใช้ BSFL ที่ระดับ 20% ของสูตรอาหาร

การเก็บข้อมูล และลักษณะต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา

ทำการบันทึกน้ำหนักไก่ก่อนและหลังการทดลอง รวมถึงบันทึกปริมาณอาหารที่กินทุกวันตลอดช่วงการทดลอง สำหรับการประเมินค่าการย่อยได้และใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ ใช้วิธีการเก็บมูลทั้งหมด (total collection) โดยรวบรวมมูลที่ไก่ขับถ่ายออกมาวันละ 1 ครั้ง ในช่วง 3 วันสุดท้ายของการทดลอง โดยใช้ถาดพลาสติกรองไว้ใต้กรง และเริ่มเก็บตัวอย่างหลังจากไก่ได้รับอาหารทดลองครบ 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน (รวม 3 วัน) ในขั้นตอนการเตรียมมูลเพื่อวิเคราะห์ ทำการคัดแยกสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น

เศษขน สะเก็ด และเศษอาหารออก จากนั้นสเปรย์มูลที่เก็บได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% เพื่อป้องกันการสูญเสียไนโตรเจน มูลจากแต่ละวันถูกนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 ºC จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างทางห้องปฏิบัติการ จากนั้นใส่ถุงพลาสติกซิปล็อค และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 ºC เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้ง การย่อยได้ของโภชนะ และการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\%\ \text{การย่อยได้ของสิ่งแห้ง (dry matter digestibility)} = \frac{(\text{น้ำหนักอาหารที่กิน} - \text{น้ำหนักมูล}) \times 100}{\text{น้ำหนักอาหารที่กิน}}$$

$$\%\ \text{การย่อยได้ของโภชนะ (nutrient digestibility): ใช้สำหรับไขมันและสารอินทรีย์} = \frac{[(\text{น้ำหนักอาหารที่กิน} \times \%\text{โภชนะในอาหาร}) - (\text{น้ำหนักมูล} \times \%\text{โภชนะในมูล})] \times 100}{(\text{น้ำหนักอาหารที่กิน} \times \%\text{โภชนะในอาหาร})}$$

$$\%\ \text{การใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน (nitrogen utilization)} = \frac{[(\text{น้ำหนักอาหารที่กิน} \times \%\text{ไนโตรเจนในอาหาร}) - (\text{น้ำหนักมูล} \times \%\text{ไนโตรเจนในมูล})] \times 100}{(\text{น้ำหนักอาหารที่กิน} \times \%\text{ไนโตรเจนในมูล})}$$

หมายเหตุ: ทั้งอาหารและมูลอยู่ในรูปน้ำหนักแห้ง (dry matter) เนื่องจากสัตว์ปีกขับถ่ายมูลและปัสสาวะออกมาร่วมกันในรูปมูลไก่ ทำให้ไนโตรเจนในมูลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ไม่ถูกย่อยและส่วนที่ถูกขับออกในรูปยูริก ดังนั้น ค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้ง เถ้า และไขมัน แสดงเป็น "การย่อยได้ (digestibility)" ส่วนไนโตรเจนแสดงเป็น "การใช้ประโยชน์ได้ utilization"

การวิเคราะห์ทางเคมี

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ BSFL อาหารทดลองและมูล ตามวิธีการของ Association of Official Analytical Chemists (1990; 2006) ซึ่งครอบคลุมความชื้น โปรตีน ไขมันรวม เยื่อใย เถ้า และค่าพลังงานรวม ดังรายละเอียดต่อไปนี้ ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ก่อนทำการวิเคราะห์ รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้ ความชื้น (moisture content) วิเคราะห์โดยการอบตัวอย่างในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 ºC เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ไขมันรวม (crude fat) วิเคราะห์ด้วยเครื่องสกัดไขมัน (Fat extraction system; FOSS, Soxtec™ 8000, Denmark) โดยใช้ตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) เยื่อใยรวม (crude fiber) วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber analyzer, FOSS, Fibertec™ 8000, Denmark) โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1.25% และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1.25% เถ้า (ash) วิเคราะห์โดยการเผาตัวอย่างในเตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace, Carbolite Gero Ltd., UK) ที่อุณหภูมิ 550 ºC เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พลังงานรวม (gross energy) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (IKA C6000 global standards, IKA-Werke, Germany) โปรตีนหยาบ (crude protein) วิเคราะห์โดยการวัดปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Dumas combustion technique ตามวิธีการของ Association of Official Analytical Chemists (2006) โดยใช้เครื่อง rapid MAX N exceed, N/protein analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) ใช้กรดแอสพาร์ติก (L-aspartic acid, Sigma-Aldrich, USA) เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบ แล้วคำนวณปริมาณโปรตีน คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด x 6.25 ส่วนไคติน (chitin) ดำเนินการวิเคราะห์โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Ghanem et al. (2004) ซึ่งมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดโปรตีน (deproteinization) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2.5 N การกำจัดแร่ธาตุ (demineralization) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1.7 N และการกำจัดเม็ดสี (pigment removal) โดยใช้เอทานอลความเข้มข้น 95%

วิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มการทดลองโดยวิธี Tukey's post hoc test โดยใช้โปรแกรมสถิติ SPSS เวอร์ชัน 16.0 (SPSS Inc, 2007)

Table 2 Nutrient composition of experimental diets for Korat chickens (6 weeks of age) (as-fed basis)

Items	Control	5% BSFL	10% BSFL	15% BSFL	20% BSFL
Ingredients					
Corn	64.02	67.00	69.36	69.38	69.41
Defatted rice bran	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Corn gluten meal	1.68	1.24	0.83	0.72	0.61
Soybean meal (44% CP)	25.00	20.00	15.00	10.00	5.00
BSFL[1/] meal	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00
Palm oil	4.45	2.81	1.38	0.72	0.06
L-Lysine HCl	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
DL-Methionine	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
L-Threonine	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15
L-Arginine	0.11	0.14	0.18	0.22	0.26
Monocalcium phosphate (P21)	1.06	0.91	0.95	1.67	2.38
Calcium carbonate ($CaCO_{3)}$	1.37	0.6	0.00	0.00	0.00
Sodium chloride (NaCl)	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Mineral-vitamin premix[2/]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Total (kg)	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**
Calculated composition, %					
Metabolizable energy (kcal/kg)	3,200	3,200	3,200	3,200	3,200
Protein	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Calcium	0.80	0.80	0.90	1.34	1.78
Available phosphorus	0.39	0.39	0.44	0.65	0.87
Digestible Methionine	0.43	0.44	0.46	0.47	0.48
Digestible Methionine + Cysteine	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Digestible Lysine	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Digestible Arginine	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
Digestible Threonine	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Analyzed composition, %					
Dry matter	89.73	90.52	90.65	91.01	91.39
Crude protein	17.05	17.86	18.04	18.07	18.28
Crude fiber	3.21	3.47	3.50	3.64	3.60
Ether extract	7.54	6.89	6.11	6.02	5.98
Ash	4.95	4.87	5.12	6.26	7.34
Chitin	0.00	0.19	0.68	1.64	1.79

[1/] BSFL = black soldier fly larvae.

[2/] Premix (0.5%) = provided the following (per kg of diet) : vitamin A, 15,000 IU; vitamin D3, 3,000 IU; vitamin E, 25 IU; vitamin K_3, 5 mg; vitamin B_1, 2 mg; vitamin B_2, 7 mg; vitamin B_6, 4 mg; vitamin B_{12}, 25 mg; pantothenic acid, 11.04 mg; nicotinic acid, 35 mg; folic acid, 1 mg; biotin, 15 µg; choline chloride, 250 mg; Cu, 1.6 mg; Mn, 60 mg; Zn, 45 mg; Fe, 80 mg; I, 0.4 mg; Se, 0.15 mg.

ผลการศึกษาและวิจารณ์

1. การศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่แท้จริงเมื่อปรับสมดุลไนโตรเจน (TMEn) ของ BSFL ในไก่โคราช

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าค่า TMEn ของ BSFL ในไก่โคราชมีค่าเท่ากับ 3,667 kcal/kg (DM) ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งต่ำกว่าที่รายงานในไก่ไข่เพศผู้สายพันธุ์เล็กฮอร์นขาวหงอนจักร (Single comb white leghorn) (3,990 kcal/kg DM, Matin et al., 2021) รวมถึงต่ำกว่าผลการศึกษาของ De Marco et al. (2015) ในไก่เนื้อที่รายงานค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้แบบประมาณ

(apparent metabolizable energy, AME) และ AMEn ค่าเท่ากับ 4,151 และ 3,965 kcal/kg (DM) ตามลำดับ นอกจากนี้ Uushona (2015) รายงานว่า BSFL ในรูปแบบสกัดน้ำมัน (defatted) และไม่สกัดน้ำมัน (full fat) มีค่า AME ในไก่เนื้อ อายุ 40 วัน เท่ากับ 4,025 และ 3,946 kcal/kg (as-fed basis) ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Schiavone et al. (2017) ที่พบว่า BSFL แบบสกัดน้ำมันบางส่วน (partially defatted) และแบบสกัดน้ำมันทั้งหมด (highly defatted) มีค่า AME เท่ากับ 3,881 และ 2,759 kcal/kg (DM) ตามลำดับ และค่า AMEn เท่ากับ 3,552 และ 2,357 kcal/kg (DM) ตามลำดับ นอกจากนี้ Ellawidana et al. (2023) รายงานว่า BSFL แบบไม่สกัดน้ำมัน (full fat) ในไก่เนื้อ ที่อายุ 25 วัน มีค่า AME เท่ากับ 3,740 kcal/kg (as-fed basis) ขณะที่ Cockcroft (2018) พบว่า BSFL ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดน้ำมัน (extrusion) แบบไม่สกัดน้ำมัน (full fat) และแบบเจียวแห้ง (dry rendering) มีค่า AME ในไก่เนื้อ อายุ 28 วัน เท่ากับ 3,771 3,960 และ 2,111 kcal/kg (DM) ตามลำดับ ส่วน Chobanova et al. (2023) รายงานว่า BSFL แบบสกัดน้ำมันโดยการอัดผ่านสกรู (screw press) และกากถั่วเหลือง มีค่า AMEn ในไก่เนื้อ ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 2,978 และ 3,169 kcal/kg (DM) ตามลำดับ ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับข้อมูลงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งระบุว่าความแปรผันขององค์ประกอบทางเคมีของ BSFL ส่งผลโดยตรงต่อค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ โดย BSFL ที่มีการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในงานวิจัยต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น มีระดับโปรตีน 37–63% ไขมัน 7–47% และไคติน 5–6% (Abduh et al., 2017; Abduh et al., 2018; Chobanova et al., 2023; Cockcroft, 2018; De Marco et al., 2015; Ellawidana et al., 2023; Matin et al., 2021; Schiavone et al., 2017; Sheppard et al., 2002; Uushona 2015; Zheng et al., 2012) ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับระบบการผลิต อาหารที่ใช้เลี้ยง ระยะการเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปวัตถุดิบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าพลังงานที่รายงานในการศึกษาต่าง ๆ แตกต่างกัน จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า BSFL มีค่าสิ่งแห้ง 93.28% โปรตีน 44.78% ไขมัน 14.18% และไคติน 7.12% ซึ่งยังอยู่ภายในช่วงที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามค่า TMEn ของ BSFL ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ยังคงสูงกว่ากากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนที่มีการใช้มากที่สุดในอาหารสัตว์ปีกทั่วโลก (Dozier and Hess, 2011; Ravindran et al., 2014) จากการรวบรวมเอกสารการศึกษาค่า TMEn ของกากถั่วเหลืองในไก่เนื้อ อยู่ในช่วง 2,659–3,162 kcal/kg (DM) (Baker et al., 2011; Bertechini et al., 2019; Cristobal et al., 2025) โดยภาพรวม สะท้อนให้เห็นว่า BSFL ยังคงเป็นแหล่งโปรตีนที่มีศักยภาพสูงด้านพลังงาน อย่างไรความผันแปรในค่า TMEn ที่พบในงานวิจัยต่าง ๆ ยังคงขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป ระดับไขมันและโปรตีน ปริมาณไคติน รวมถึงสายพันธุ์และอายุของสัตว์ปีกที่ใช้ในการทดสอบ

Table 3 Metabolizable energy values of Korat chickens (9 weeks of age), expressed on a dry matter basis

Items	Metabolizable energy (kcal/kg)
Apparent metabolizable energy (AME)	3,204
Nitrogen corrected apparent metabolizable energy (AMEn)	3,203
True metabolizable energy (TME)	3,703
Nitrogen corrected true metabolizable energy (TMEn)	3,667

2. การศึกษาการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนของ BSFL ในไก่โคราช

ผลของการใช้ BSFL ในอาหารที่ระดับ 0 5 10 15 และ 20% ต่อการย่อยได้ของโภชนะและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนแสดงใน Table 4 โดยพบว่าไก่โคราชสามารถใช้ BSFL เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารได้สูงถึงระดับ 20% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ ทั้งนี้ระดับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 15% ซึ่งให้ค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้ง สารอินทรีย์ และไขมัน และค่าการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน เท่ากับ 81.08 84.60 95.07% และ 72.43% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่มีค่า 78.02 81.62 92.32 และ 61.74% ตามลำดับ ($P<0.05$) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ de Souza Vilela et al. (2021) ที่พบว่าไก่เนื้อ (อายุ 21 และ 42 วัน) สามารถใช้ BSFL ได้ถึงระดับ 20% ในสูตรอาหาร โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของสิ่งแห้ง เถ้า และแคลเซียม รวมถึงการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน นอกจากนี้ Auza et al. (2023) รายงานว่าการใช้ BSFL ทดแทนโปรตีนจากปลาป่นในอาหารไก่พื้นเมือง อายุ 12 สัปดาห์ ที่ระดับ 25–100% (คิดเป็น 15% ในสูตรอาหาร) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการย่อยได้ของเยื่อใยและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yulianti et al. (2024) ซึ่งทดสอบการใช้ BSFL ในไก่ลูกผสมพื้นเมือง อายุ 5 สัปดาห์ ที่ระดับ 0 5 10 และ 15% ในสูตรอาหาร พบว่า BSFL สามารถใช้ได้ถึง 10% โดยไม่ส่งผลต่อค่าการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน สมรรถนะการผลิต ลักษณะซาก และคุณภาพซาก

นอกจากนี้ Chu et al. (2020) ศึกษาการใช้ BSFL แบบไม่สกัดน้ำมัน (full fat) ในไก่ไข่สายพันธุ์ Hy-Line Brown อายุ 6 สัปดาห์ ที่ระดับ 0 3 6 และ 9% ในสูตรอาหาร พบว่า สามารถใช้ได้ถึง 9% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของสิ่งแห้ง สารอินทรีย์ แคลเซียม และฟอสฟอรัส โดยที่ระดับ 3% พบว่าค่าการย่อยได้ของไขมันและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนสูงที่สุด (84.50 และ 73.00% ตามลำดับ) Van der Heide et al. (2021) เปรียบเทียบการใช้ BSFL (10%) กับหนอนด้วงกระเบื้อง (*Alphitobius diaperinus*) และหนอนนก (*Tenebrio molitor*) พบว่าความสามารถในการย่อยได้ของสิ่งแห้งและสารอินทรีย์ไม่แตกต่างกัน แต่ BSFL มีค่าการย่อยได้ของเถ้าและไขมันสูงที่สุดรวมทั้งมีการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือหนอนนกและหนอนด้วงกระเบื้อง ซึ่งสอดคล้องกับ De Marco et al. (2015) ที่พบว่าไก่เนื้อซึ่งได้รับ BSFL ระดับ 25% มีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้แบบประมาณ (apparent digestibility coefficients of the total tract, CTTAD) ของไขมันสูงกว่าหนอนนก ในขณะที่การย่อยได้ของสิ่งแห้ง สารอินทรีย์ และการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนไม่แตกต่างกัน ในสัตว์ปีกชนิดอื่น Cullere et al. (2016) รายงานว่าการใช้ BSFL ในสูตรอาหารนกกระทาเนื้อที่ระดับ 15% ไม่ส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของสิ่งแห้ง สารอินทรีย์ และการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน เช่นเดียวกับ Woods et al. (2019) รายงานว่าสามารถใช้ BSFL ได้ถึง 10% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของสิ่งแห้งและสารอินทรีย์ Schiavone et al. (2017) ศึกษา BSFL ทั้งในรูปแบบ สกัดน้ำมันบางส่วน (partially defatted) และสกัดน้ำมันทั้งหมด (highly defatted) ที่ระดับ 25% ในอาหารไก่เนื้อ อายุ 21 วัน พบว่ากลุ่มที่ได้รับ BSFL แบบสกัดน้ำมันบางส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของไขมันและพลังงานรวมสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับ BSFL แบบสกัดน้ำมันทั้งหมด (0.98 vs 0.93 และ 0.61 vs 0.50) ตามลำดับ แต่ไม่พบความแตกต่างในค่าการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน (0.62 เท่ากันทั้งสองกลุ่ม) แสดงให้เห็นว่าการสกัดน้ำมันบางส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยได้ ผลการศึกษาดังกล่าวยังสอดคล้องกับรายงานของ Uushona (2015) ที่พบว่า BSFL แบบสกัดน้ำมันมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของสิ่งแห้งและการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนอยู่ที่ 0.95 และ 0.97 ตามลำดับ ขณะที่ BSFL แบบไม่สกัดน้ำมันอยู่ที่ 0.91 และ 0.86 ตามลำดับ ส่วน Chobanova et al. (2023) รายงานว่า BSFL มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจนและค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้งและไขมันใน BSFL เท่ากับ 0.71 0.75 และ 0.92 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองที่มีค่า 0.68 0.78 และ 0.97 ตามลำดับ ในภาพรวม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไก่โคราชสามารถใช้ BSFL เป็นแหล่งโปรตีนได้สูงถึง 20% โดยไม่กระทบต่อค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานในไก่พื้นเมืองสายพันธุ์อื่นที่สามารถใช้ BSFL ได้ในระดับใกล้เคียงกัน (Auza et al., 2023; Yulianti et al., 2024) ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่า BSFL เป็นแหล่งโปรตีนที่เหมาะสมต่อระบบการผลิตไก่พื้นเมืองของไทย ช่วยลดการพึ่งพาโปรตีนจากปลาป่นหรือกากถั่วเหลือง และสนับสนุนการผลิตที่ยั่งยืนมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ระดับการใช้ BSFL ในสูตรอาหารสัตว์ควรพิจารณาปริมาณของไคตินร่วมด้วย เนื่องจากไคตินเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างภายนอกของ BSFL (De Marco et al., 2015) และเป็นสารประกอบโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ของสัตว์กระเพาะเดี่ยว โดยเฉพาะในสัตว์ปีกการมีปริมาณไคตินสูงในสูตรอาหารอาจส่งผลกระทบทางลบต่อความสามารถในการย่อยได้ของโภชนะ ทั้งนี้โครงสร้างของไคตินอาจขัดขวางการเข้าถึงของเอนไซม์ย่อยอาหาร ส่งผลให้การย่อยสารอาหารทำได้ยากขึ้น อีกทั้งไคตินยังสามารถจับกับเอนไซม์และสารอาหาร ทำให้การย่อยและการดูดซึมสารอาหารอื่นลดลง Marono et al. (2015) รายงานว่าไคตินเป็นปัจจัยสำคัญที่จำกัดการย่อยได้โปรตีนของ BSFL ในการทดลอง *in vitro* โดยพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างปริมาณไคตินและค่าการย่อยได้ของไนโตรเจน Muzzarelli (1977) และ Longvah et al. (2011) รายงานว่าไคตินในระดับความเข้มข้นสูงทำให้ความน่ากินของอาหารลดลง รวมถึงลดการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าไคตินสามารถยับยั้งการดูดซึมสารอาหารภายในระบบทางเดินอาหารโดยเฉพาะไขมันและโปรตีนในสัตว์ปีก (Bovera et al., 2016; Khempaka et al., 2011; Razdan and Pettersson, 1994; Vidanarachchi et al., 2010) ทั้งนี้ Chobanova et al. (2023) พบว่าการใช้ BSFL ทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 16% ส่งผลให้ค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะลดลง ซึ่งผลกระทบดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับปริมาณไคตินที่เพิ่มขึ้นในสูตรอาหาร

แม้ว่าไคตินจะถือเป็นข้อจำกัดสำคัญในการใช้ BSFL ในอาหารสัตว์ เนื่องจากไม่สามารถย่อยได้และอาจรบกวนการย่อยและดูดซึมสารอาหาร (Razdan and Pettersson, 1994; Bovera et al., 2016) แต่ไคตินยังมีศักยภาพในการส่งเสริมสุขภาพของสัตว์ ไคตินเป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบมากเป็นอันดับสองในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส โดยมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ต่างกันที่ไคตินมีหมู่อะซิตาไมด์ (acetamide) ที่ตำแหน่ง C-2 จึงถือเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส (Rinaudo, 2006) นอกจากนี้ไคตินยังเป็นองค์ประกอบหลักของโครงกระดูกภายนอกของแมลง ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างแข็งแรงเพื่อป้องกันอันตรายจากสิ่งแวดล้อม (Lee et al., 2008) และในธรรมชาติมักพบไคตินในรูปแบบเมทริกซ์ที่ประกอบร่วมกับโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุ (Józefiak et al., 2016) เอนไซม์ไคติเนส (chitinase) สามารถย่อยไคตินให้กลายเป็นอนุพันธ์ เช่น ไคโตซาน (chitosan) ซึ่งมีประจุบวก (cationic) และสามารถทำหน้าที่เป็นสารคีเลตจับโลหะหนักได้ (Rinaudo, 2006) อย่างไรก็ตาม สัตว์ส่วนใหญ่รวมทั้งสัตว์ปีกไม่สามารถผลิตเอนไซม์ไคติเนสในระบบ

ทางเดินอาหารได้ (Shahidi and Abuzaytoun, 2005) จึงทำให้ไคตินถูกจัดเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่สามารถย่อยได้ (Tabata et al., 2017) อย่างไรก็ตาม มีการรายงานว่าไก่อาจสามารถย่อยไคตินได้บางส่วนเนื่องจากมีการตรวจพบการแสดงออกของ mRNA ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอนไซม์ไคติเนสในกระเพาะอาหารของไก่ (Suzuki et al., 2002; Tabata et al., 2017) นอกจากนี้ ไคตินและอนุพันธ์ เช่น ไคโตซานโอลิโกแซ็กคาไรด์ (chitosan oligosaccharides - COS) ยังมีผลเชิงบวกต่อระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์ โดยมีรายงานว่าเมื่อเสริม COS ในอาหารไก่เนื้อสามารถเพิ่มน้ำหนักของอวัยวะที่เกี่ยวข้องกับภูมิคุ้มกัน ได้แก่ ม้าม เบอร์ซา และต่อมไทมัส (Chi et al., 2017) รวมทั้งช่วยเพิ่มระดับ IgM และการแสดงออกของไซโตไคน์ที่กระตุ้นการอักเสบ (Deng et al., 2008) อีกทั้งอนุพันธ์ของไคตินยังสามารถทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติก โดยเป็นแหล่งอาหารสำหรับแบคทีเรียในซีคัมของไก่ ส่งผลต่อองค์ประกอบของจุลินทรีย์ในลำไส้ และมีผลทางอ้อมต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน (Li et al., 2007) ดังนั้นการใช้แมลงที่มีไคตินเป็นส่วนประกอบในสูตรอาหารจึงอาจช่วยส่งเสริมสุขภาพของสัตว์ปีกได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของไคตินในแมลงมีความหลากหลายและแตกต่างกันตามชนิดของแมลง (Kaya et al., 2015) อีกทั้งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและลักษณะทางกายภาพของไคติน (Lee et al., 2008) จึงเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาอย่างรอบด้านเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในสูตรในอาหารสัตว์ แม้ BSFL จะมีไคตินซึ่งมีบทบาทในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน และในทางทฤษฎีการกระตุ้นภูมิคุ้มกันอาจลดประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมโภชนะได้เนื่องจากมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของเยื่อบุลำไส้ (Klasing, 2007) แต่ผลการทดลองนี้ไม่พบความผิดปกติของค่าการย่อยได้หรือพลังงานที่ใช้ประโยชน์ของไก่ ซึ่งสอดคล้องกับ Biasato et al. (2020) ที่รายงานว่าการใช้ BSFL ในระดับปานกลางไม่ทำให้เกิดผลลบต่อระบบทางเดินอาหารและการย่อยโภชนะในสัตว์ปีก ดังนั้นจึงคาดว่าปริมาณไคตินใน BSFL ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ยังอยู่ในระดับต่ำ ไม่เพียงพอที่จะรบกวนการย่อยและการใช้ประโยชน์ของโภชนะ

นอกจากนี้ BSFL ยังประกอบด้วยกรดลอริก (lauric acid) (C12:0) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของกรดไขมันสายกลาง (medium-chain fatty acids, MCFA) ที่มีคุณสมบัติต่อต้านแบคทีเรีย (Skrivanova et al., 2006) แมลง เช่น BSFL และแมลงวันบ้าน เป็นแหล่งที่มีปริมาณไขมันค่อนข้างสูง (Veldkamp et al., 2012) โดยเฉพาะไขมันจาก BSFL ซึ่งมีสัดส่วนของกรดไขมันกลุ่ม MCFA สูง โดยเฉพาะกรดลอริก (Gasco et al., 2018; Cullere et al., 2019) แม้ว่ากลไกการออกฤทธิ์ของ MCFA ต่อเชื้อแบคทีเรียจะยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ผลการศึกษาใน *in vitro* พบว่า MCFA สามารถแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย (Skrivanova et al., 2006; Kim and Rhee, 2013) ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไป และอาจเอื้อต่อการแทรกซึมของสารต้านจุลชีพอื่น ๆ เข้าสู่เซลล์ ทำให้สามารถทำลายแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Kim and Rhee, 2013) นอกจากนี้ BSFL และแมลงวันบ้านยังสามารถผลิตเปปไทด์ต้านจุลชีพ (antimicrobial peptides, AMPs) เช่น ดีเฟนซิน (defensin) ซึ่งมีความสามารถในการทำลายแบคทีเรียแกรมบวก (Dang et al., 2010; Andoh et al., 2018) โดยมีรายงานการค้นพบเปปไทด์ defensin-like peptide 4 (DLP4) ใน BSFL ซึ่งสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกรวมถึงเชื้อดื้อยา เช่น Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) (Park et al., 2015) บทบาทของ MCFA ในไขมันจาก BSFL โดยเฉพาะกรดลอริก ยังถูกระบุว่ามีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและอาจส่งผลต่อองค์ประกอบจุลินทรีย์ในลำไส้ (Spranghers et al., 2017) อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่พบผลกระทบด้านลบต่อการย่อยได้ของโภชนะ ซึ่งอาจเป็นเพราะระดับการเสริม BSFL อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลจุลินทรีย์ในลำไส้ ทำให้กระบวนการย่อยและการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะยังดำเนินได้อย่างปกติ

Table 4 Effects of different inclusion levels of BSFL in diets on apparent nutrient digestibility and utilization in Korat chickens (6 weeks of age)

Apparent nutrient digestibility (%)	Control	Black soldier fly larvae				P-value	Pooled SEM[1/]
		5%	10%	15%	20%		
Digestibility							
Dry matter	78.02[b]	79.84[ab]	79.68[ab]	81.08[a]	78.95[ab]	0.059	0.355
Organic matter	81.62[b]	82.83[ab]	82.39[ab]	84.60[a]	83.29[ab]	0.010	0.291
Crude fat	92.32[b]	93.15[ab]	92.24[b]	95.07[a]	94.58[ab]	0.009	0.339
Utilization[2/]							
Nitrogen	61.74[b]	64.18[ab]	64.56[ab]	72.34[a]	69.46[ab]	0.012	1.166

[a,b] Means within each row with different superscripts are significantly different (P<0.05).

[1/] SEM=standard error of the mean.

[2/] Because feces and urine are excreted together in poultry, nitrogen values are expressed as 'nitrogen utilization' instead of 'nitrogen digestibility'.

สรุปผลการศึกษา

BSFL มีค่า TMEn ในไก่โคราชเท่ากับ 3,667 Kcal/Kg (DM) และสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสำหรับไก่โคราชได้ระดับสูงสุดถึง 20% โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อค่าการย่อยได้ของสิ่งแห้ง ไขมัน และสารอินทรีย์ รวมถึงการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน ทั้งนี้การใช้ BSFL ที่ระดับ 15% ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยส่งผลให้ค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะสูงกว่ากลุ่มควบคุม

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณงานสัตว์ปีก ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการทดลอง และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการโภชนศาสตร์สัตว์กระเพาะเดี่ยวและวิทยาศาสตร์อาหารสัตว์ (Laboratory of Monogastric Animal Nutrition and Feed Science, SUT) สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินการทดลองและเก็บตัวอย่าง รวมถึงขอขอบคุณทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การมีส่วนร่วมในการเขียนบทความของผู้เขียน

ความคิดริเริ่มและสมมติฐาน กำหนดวัตถุประสงค์ ออกแบบการทดลอง รวบรวมข้อมูลเอกสารงานวิจัย ปฏิบัติการทดลอง เก็บตัวอย่างการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูล การแปรผล การวิจารณ์ผลการทดลอง และการเขียนต้นฉบับบทความ: ธนทัต เทียบชิง, สุทิศา เข็มผะกา.

เอกสารอ้างอิง

Abduh, M. Y., Jamilah, M., Istiandari, P., Manurung, S., & Manurung, R. (2017). Bioconversion of rubber seeds to produce protein and oil-rich biomass using black soldier fly larva assisted by microbes. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, 5(4), 591–597.

Abduh, M. Y., Nadia, M. H., Manurung, R., & Putra, R. E. (2018). Factors affecting the bioconversion of Philippine tung seed by black soldier fly larvae for the production of protein and oil-rich biomass. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, 21(1), 836–842. https://doi.org/10.1016/j.aspen.2018.06.007.

Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). **World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision.** Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Andoh, M., Ueno, T., & Kawasaki, K. (2018). Tissue-dependent induction of antimicrobial peptide genes after body wall injury in house fly (*Musca domestica*) larvae. **Drug Discoveries & Therapeutics**, 12(6), 355–362. https://doi.org/10.5582/ddt.2018.01063.

Arango Gutiérrez, G. P. (2005). **Aportes nutricionales de la biomasa de *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae) enla cría de pollos de engorde.** Master's Thesis. Universidad Nacional de Colombia.

Association of Official Analytical Chemists. (1990). **Official Methods of Analysis.** 15th Ed. Association of Official Analytical Chemists.

Association of Official Analytical Chemists. (2006). **Official Methods of Analysis.** 18th Ed. Association of Official Analytical Chemists.

Attivi, K., Agboka, K., Mlaga, G. K., Oke, O. E., Teteh, A., Onagbesan, O., & Tona, K. (2020). Effect of black soldier fly (*Hermetia Illucens*) maggots meal as a substitute for fish meal on growth performance, biochemical parameters and digestibility of broiler chickens. **International Journal of Poultry Science**, 19(2), 75–80. https://doi.org/10.3923/ijps.2020.75.80.

Auza, F. A., Purwanti, S., Syamsu, J. A., Natsir, A., Badaruddin, R., Zulkarnain, D., & Munadi, L. O. M. (2023). Effects of using black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens* L) as a source of protein on boosting performance, carcass quality, and nutrient digestibility of village chicken. **Journal of Animal Health and Production**, 11(2), 193–198. https://doi.org/10.17582/journal.jahp/2023/11.2.193.198.

Baker, K. M., Utterback, P. L., Parsons, C. M., & Stein, H. H. (2011). Nutritional value of soybean meal produced from conventional, high-protein, or low-oligosaccharide varieties of soybeans and fed to broiler chicks. **Poultry Science**, 90(2), 390–395. https://doi.org/10.3382/ps.2010-00978.

Bertechini, A. G., Kato, R. K., Freitas, L. F. V. B. D., Castro, R. T. D. C., & Mazzuco, H. (2019). Metabolizable energy values of soybean meals and soybean oil for broilers at different ages. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, 41(1), 44540 https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.44540.

Biasato, I., Ferrocino, I., Dabbou, S., Evangelista, R., Gai, F., Gasco, L., Cocolin, L., Capucchio, M. T., & Schiavone, A. (2020). Black soldier fly and gut health in broiler chickens: insights into the relationship between cecal microbiota and intestinal mucin composition. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, 11(1), 11. https://doi.org/10.1186/s40104-019-0413-y.

Bovera, F., Loponte, R., Marono, S., Piccolo, G., Parisi, G., Iaconisi, V., Gasco, L., & Nizza, A. (2016). Use of *Tenebrio molitor* larvae meal as protein source in broiler diet: effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits. **Journal of Animal Science**, 94(2), 639–647. https://doi.org/10.2527/jas.2015-9201.

Chi, X., Ding, X., Peng, X., Li, X., & Fang, J. (2017). Effects of chitosan oligosaccharides supplementation on the cell cycle of immune organs in broilers. **Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi**, 23(6), 1003–1006. https://doi.org/10.9775/kvfd.2017.17997.

Chobanova, S., Karkelanov, N., Mansbridge, S. C., Whiting, I. M., Simic, A., Rose, S. P., & Pirgozliev, V. R. (2023). Defatted black soldier fly larvae meal as an alternative to soybean meal for broiler chickens. **Poultry**, 2(3), 430–441. https://doi.org/10.3390/poultry2030032.

Chu, X., Li, M., Wang, G., Wang, K., Shang, R., Wang, Z., & Li, L. (2020). Evaluation of the low inclusion of full-fatted *Hermetia illucens* larvae meal for layer chickens: Growth performance, nutrient digestibility, and gut health. **Frontiers in Veterinary Science**, 7(1), 585843. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.585843.

Cockcroft, B. L. (2018). **An Evaluation of Defatted Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*) Larvae as a Protein Source for Broiler Chicken Diets.** Master's Thesis. Stellenbosch University.

Cristobal, M., Utterback, P. L., Stein, H. H., & Parsons, C. M. (2025). True metabolizable energy, standardized amino acid digestibility, and digestibility of phosphorus in soybean expellers produced from conventional or high-oil varieties of soybeans fed to chickens. **Poultry Science**, 104(9), 105386. https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105386.

Cullere, M., Schiavone, A., Dabbou, S., Gasco, L., & Dalle Zotte, A. (2019). Meat quality and sensory traits of finisher broiler chickens fed with black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae fat as alternative fat source. **Animals**, 9(4), 140. https://doi.org/10.3390/ani9040140.

Cullere, M., Tasoniero, G., Giaccone, V., Miotti-Scapin, R., Claeys, E., De Smet, S., & Dalle Zotte, A. (2016). Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. **Animal**, 10(12), 1923–1930. https://doi.org/10.1017/S1751731116001270.

Dang, X. L., Wang, Y. S., Huang, Y. D., Yu, X. Q., & Zhang, W. Q. (2010). Purification And Characterization of An Antimicrobial Peptide, Insect Defensin, From Immunized House Fly (Diptera: Muscidae). **Journal of Medical Entomology**, 47(6), 1141–1145. https://doi.org/10.1603/ME10016.

De Marco, M., Martinez, S., Hernandez, F., Madrid, J., Gai, F., Rotolo, L., Belforti, M., Bergero, D., Katz, H., Dabbou, S., Kovitvadhi, A., Zoccarato, I., Gasco, L., & Schiavone, A. (2015). Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. **Animal Feed Science and Technology**, 209(1), 211–218. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.08.006.

de Souza Vilela, J., Andronicos, N. M., Kolakshyapati, M., Hilliar, M., Sibanda, T. Z., Andrew, N. R., Swick, R. A., Wilkinson, S., & Ruhnke, I. (2021). Black soldier fly larvae in broiler diets improve broiler performance and modulate the immune system. **Animal Nutrition**, 7(3), 695–706. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.08.014.

Deng, X., Li, X., Liu, P., Yuan, S., Zang, J., Li, S., & Piao, X. (2008). Effect of chito-oligosaccharide supplementation on immunity in broiler chickens. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, 21(11), 1651–1658. https://doi.org/10.5713/ajas.2008.80056.

Dozier III, W. A., Kerr, B. J., Corzo, A., Kidd, M. T., Weber, T. E., & Bregendahl, K. (2008). Apparent metabolizable energy of glycerin for broiler chickens. **Poultry Science**, 87(2), 317–322. https://doi.org/10.3382/ps.2007-00309.

Dozier, W. A., & Hess, J. B. (2011). **Soybean Meal Quality and Analytical Techniques**. InTech.

Ellawidana, E. W. D. M., Mutucumarana, R. K., Ruwandeepika, H. A. D., & Magamage, M. P. S. (2023). Nutritional composition and apparent metabolizable energy (AME) value of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) full-fat meal for broiler chickens. **Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology**, 11(10), 1825–1833. https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i10.1825-1833.5992.

Feedipedia. (2020). **Black Soldier Fly Larvae Meal.** Retrieved from: https://www.feedipedia.org/node/16388.

Gasco, L., Finke, M., & Van Huis, A. (2018). Can diets containing insects promote animal health?. **Journal of Insects as Food and Feed**, 4(1), 1–4. https://doi.org/10.3920/JIFF2018.x001.

Ghanem, A., Ghaly, A. E., & Chaulk, M. (2004). Effect of shrimp processing procedures on the quality and quantity of extracted chitin from the shells of northern shrimp *Pandalus borealis*. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, 12(4), 63–79. https://doi.org/10.1300/J030v12n04_05.

Herrero, M., & Thornton, P. K. (2013). Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 110(52), 20878–20881. https://doi.org/10.1073/pnas.1321844111.

Józefiak, D., Józefiak, A., Kieroń czyk, B., Rawski, M., Świątkiewicz, S., Długosz, J., & Engberg, R. M. (2016). Insects – A Natural Nutrient Source for Poultry – A Review. **Annals of Animal Science**, 16(2), 297–313. https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0010.

Kaya, M., Erdogan, S., Mol, A., & Baran, T. (2015). Comparison of chitin structures isolated from seven Orthoptera species. **International Journal of Biological Macromolecules**, 72(1), 797–805. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.09.034.

Khempaka, S., Chitsatchapong, C., & Molee, W. (2011). Effect of chitin and protein constituents in shrimp head meal on growth performance, nutrient digestibility, intestinal microbial populations, volatile fatty acids, and ammonia production in broilers. **Journal of Applied Poultry Research**, 20(1), 1–11. https://doi.org/10.3382/japr.2010-00162.

Kim, S. A., & Rhee, M. S. (2013). Marked synergistic bactericidal effects and mode of action of medium-chain fatty acids in combination with organic acids against *Escherichia coli* O157: H7. **Applied and Environmental Microbiology**, 79(21) , 6552–6560. https://doi.org/10.1128/aem.02164-13.

Klasing, K. C. (2007). Nutrition and the immune system. **British Poultry Science**, 48(5), 525–537. https://doi.org/10.1080/00071660701671336.

Lee, C. G., Da Silva, C. A., Lee, J. Y., Hartl, D., & Elias, J. A. (2008). Chitin regulation of immune responses: an old molecule with new roles. **Current Opinion in Immunology**, 20(6), 684–689. https://doi.org/10.1016/j.coi.2008.10.002.

Li, X. J., Piao, X. S., Kim, S. W., Liu, P., Wang, L., Shen, Y. B., Jung, S. C., & Lee, H. S. (2007). Effects of Chito-Oligosaccharide Supplementation on Performance, Nutrient Digestibility, and Serum Composition in Broiler Chickens. **Poultry Science**, 86(6) , 1107–1114. https://doi.org/10.1093/ps/86.6.1107.

Longvah, T., Mangthya, K., & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. **Food Chemistry**, 128(2), 400–403. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.041.

Maliwan, P. (2016). **Energy and Protein Requirements of Korat Chickens from 0 to 12 Weeks of Age.** Doctoral Thesis. Suranaree University of Technology.

Marono, S., Piccolo, G., Loponte, R., Meo, C. D., Attia, Y. A., Nizza, A., & Bovera, F. (2015). In vitro crude protein digestibility of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* insect meals and its correlation with chemical composition traits. **Italian Journal of Animal Science**, 14(3), 338–343. https://doi.org/10.4081/ijas.2015.3889.

Matin, N., Utterback, P., & Parsons, C. M. (2021). True metabolizable energy and amino acid digestibility in black soldier fly larvae meals, cricket meal, and mealworms using a precision-fed rooster assay. **Poultry Science**, 100(7), 101146. https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101146.

Muzzarelli, R. A. A. (1977). **Chitin.** Pergamon Press.

National Research Council. (1994). **Nutrient Requirements of Poultry.** 9th Ed. National Academy Press.

Nguyen, T. T., Tomberlin, J. K., & Vanlaerhoven, S. (2015). Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. **Environmental Entomology**, 44(2), 406–410. https://doi.org/10.1093/ee/nvv002.

Park, S. I., Kim, J. W., & Yoe, S. M. (2015). Purification and characterization of a novel antibacterial peptide from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. **Developmental and Comparative Immunology**, 52(1), 98–106. https://doi.org/10.1016/j.dci.2015.04.018.

Parsons, C. M., Potter, L. M., & Bliss, B. A. (1982). True Metabolizable Energy Corrected to Nitrogen Equilibrium. **Poultry Science**, 61(11), 2241–2246. https://doi.org/10.3382/ps.0612241.

Ravindran, V., Abdollahi, M. R., & Bootwalla, S. M. (2014). Nutrient analysis, metabolizable energy, and digestible amino acids of soybean meals of different origins for broilers. **Poultry Science**, 93(10), 2567–2577. https://doi.org/10.3382/ps.2014-04068.

Razdan, A., & Pettersson, D. (1994). Effect of chitin and chitosan on nutrient digestibility and plasma lipid concentrations in broiler chickens. **British Journal of Nutrition**, 72(2), 277–288. https://doi.org/10.1079/bjn19940029.

Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: properties and applications. **Progress in Polymer Science**, 31(7) , 603–632. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001.

Schiavone, A., De Marco, M., Martínez, S., Dabbou, S., Renna, M., Madrid, J., Hernandez, F., Rotolo, L., Costa, P., Gai, F., & Gasco, L. (2017). Nutritional value of a partially defatted and a highly defatted black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) meal for broiler chickens: apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, 8(5), 897–905. https://doi.org/10.1186/s40104-017-0181-5.

Shahidi, F., & Abuzaytoun, R. (2005). Chitin, chitosan, and co-products: chemistry, production, applications, and health effects. **Advances in Food and Nutrition Research**, 49(1), 93–135. https://doi.org/10.1016/S1043-4526(05)49003-8.

Sheppard, D. C., Tomberlin, J. K., Joyce, J. A., Kiser, B. C., & Sumner, S. M. (2002). Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). **Journal of Medical Entomology**, 39(4), 695–698. https://doi.org/10.1603/0022-2585-39.4.695.

Sibbald, I. R. (1976). A bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs. **Poultry Science**, 55(1), 303–308. https://doi.org/10.3382/ps.0550303.

Skrivanova, E., Marounek, M., Benda, V., & Brezina, P. (2006). Susceptibility of *Escherichia coli*, *Salmonella* sp. and *Clostridium perfringens* to organic acids and monolaurin. **Veterinarni Medicina**, 51(3), 81–88. https://doi.org/10.17221/5524-vetmed

Spranghers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Ovyn, A., Deboosere, S., Meulenaer, B. D., Michiels, J., Eeckhout, M., Clercq, P. D., & Smet, S. D. (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. https://doi.org/10.1002/jsfa.8081.

SPSS Inc. (2007). **SPSS for Windows, Version 16.0.** Retrieved from: http://www.unimuenster.de/imperia/md/content/ziv/service/software/spss/handbuecher/englisch/spss_brief_guide_16.0.pdf.

Suzuki, M., Fujimoto, W., Goto, M., Morimatsu, M., Syuto, B., & Iwanaga, T. (2002). Cellular expression of gut chitinase mRNA in the gastrointestinal tract of mice and chickens. **Journal of Histochemistry & Cytochemistry**, 50(8) , 1081–1089. https://doi.org/10.1177/002215540205000810.

Tabata, E., Kashimura, A., Wakita, S., Ohno, M., Sakaguchi, M., Sugahara, Y., Kino, Y., Matoska, V., Bauer, P. O., & Oyama, F. (2017). Gastric and intestinal proteases resistance of chicken acidic chitinase nominates chitin-containing organisms for alternative whole edible diets for poultry. **Scientific Reports**, 7(1), 6662. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07146-3.

Tomberlin, J. K., & Sheppard, D. C. (2001). Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). **Florida Entomologist**, 84(4), 729–730. https://doi.org/10.2307/3496413.

Uushona, T. (2015). **Black Soldier Fly (*Hermetia illucens)* Pre-pupae as a Protein Source for Broiler Production.** Master's Thesis. Stellenbosch University.

Van der Heide, M. E., Nørgaard, J. V., & Engberg, R. M. (2021). Performance, nutrient digestibility and selected gut health parameters of broilers fed with black soldier fly, lesser mealworm and yellow mealworm. **Journal of Insects as Food and Feed**, 7(6), 1011–1022. https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0150.

Van Huis, A. (2018). **Insects as Human Food.** Academic Press.

Van Huis, A., & Oonincx, D. G. A. B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed - A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 37(5), 43. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0452-8.

Veldkamp, T., Van Duinkerken, G., Van Huis, A., Lakemond, C. M. M., Ottevanger, E., Bosch, G., & Van Boekel, M. A. J. S. (2012). **Insects as a Sustainable Feed Ingredient in Pig and Poultry Diets – A Feasibility Study.** Wageningen UR Livestock Research. Retrieved from: https://edepot.wur.nl/234247.

Vidanarachchi, J. K., Kurukulasuriya, M. S., & Kim, S. K. (2010). **Chitin, Chitosan and Their Oligosaccharides in Food Industry.** CRC Press.

Woods, M. J., Cullere, M., Van Emmenes, L., Vincenzi, S., Pieterse, E., Hoffman, L. C., & Zotte, A. D. (2019). *Hermetia illucens* larvae reared on different substrates in broiler quail diets: Effect on apparent digestibility, feed-choice and growth performance. **Journal of Insects as Food and Feed**, 5(2), 89–98. https://doi.org/10.3920/JIFF2018.0027.

Yulianti, D. L., Sjofjan, O., Firmansyah, A., Ahzami, A., & Aini, B. W. R. (2024). Effect of black soldier fly larva meal on energy, protein digestibility, performance, and carcass quality in local crossbred chickens. **Jurnal Ilmu Peternakan Terapan**, 8(1), 46–56.

Zhang, J., Zheng, L., Jin, P., Zhang, D., & Yu, Z. (2014). Kitchen waste converted by black soldier fly and partly substituting soymeal in chicken feed. In **1st International Conference Insects to Feed the World**, pp. 152. Wageningen University and Research Centre and Food and Agriculture Organization.

Zheng, L., Hou, Y., Li, W., Yang, S., Li, Q., & Yu, Z. (2012). Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes. **Energy**, 47(1), 225–229. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.006.