Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj

การประเมินสูตรอาหารที่เหมาะสมและการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม

Evaluation of suitable diets and a feasibility study of the black soldier fly production at an industrial scale

รัตนากร พรสุวรรณ[1] และ ยุพา หาญบุญทรง[1]*

Rattanakorn Pornsuwan[1] and Yupa Hanboonsong[1]*

[1]สาขาวิชากีฏวิทยาและโรคพืชวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000
[1]Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

บทคัดย่อ: ทั่วโลกมีการแนะนำการใช้ประโยชน์จากแมลงโปรตีนหรือแมลงวันลาย (black soldier fly; *Hermetia illucens* L.) เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกแทนปลาป่นหรือกากถั่วเหลือง ในอาหารปลา สัตว์ปีก และสุกร หนอนแมลงโปรตีนกินขยะอินทรีย์หลากชนิดในชุมชนและผลพลอยได้จากการแปรรูปอุตสาหกรรมการเกษตรเปลี่ยนเป็นชีวมวล แหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพสูงเหมาะสมที่จะเป็นอาหารสัตว์ในเศรษฐกิจหมุนเวียนที่ยั่งยืน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประเมินสูตรอาหารที่เหมาะสม โดยเน้นการนำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเกษตรในท้องถิ่นมาผลิตแมลงโปรตีน เพื่อเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ และการทดสอบความเป็นไปได้ของการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม การศึกษาประกอบด้วยสองการทดลอง คือ การทดลองที่ 1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) มี 9 กรรมวิธี (สูตรอาหาร) คือ 1) กากเต้าหู้ผสมอาหารไก่ อัตราส่วน 1:1 2) และ 3) เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสงผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ 4) และ 5) เศษเนื้อหมูตัดแต่งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ 6) ส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อหมูตัดแต่ง และเศษอาหาร อัตราส่วน 1:1:1:1 7) ถึง 9) กากเบียร์แห้งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ ระยะก่อนเข้าดักแด้ (prepupa) จากอาหารทุกสูตรที่ทดสอบมีโปรตีน 44.55 – 56.64% สามารถนำมาใช้ผลิตแมลงโปรตีนเป็นวัตถุดิบทางเลือกในอาหารสัตว์ และสูตรอาหารกรรมวิธีที่ 6 เป็นสูตรที่เหมาะสมมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากการเจริญเติบโตของตัวหนอน น้ำหนักลำตัวของระยะก่อนเข้าดักแด้ ผลผลิตรวม การรอดชีวิต อาหารที่กิน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และต้นทุนค่าอาหาร สำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการทดสอบการผลิตระดับอุตสาหกรรม โดยเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนอายุ 5 วัน จำนวน 25,000 ตัว/กระบะ ด้วยสูตรอาหารกรรมวิธีที่ 6 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองที่ 1 พบว่า ได้ผลผลิตของระยะก่อนเข้าดักแด้เฉลี่ย 4.15 $\pm$ 0.15 กก. การผลิตขนาดใหญ่ที่เหมาะสมทำให้ต้นทุนถูกกว่าการเลี้ยงระดับห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: แมลงวันลาย; ขยะอินทรีย์; ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตร; อาหารสัตว์; ขยะเหลือศูนย์

ABSTRACT: The utilization of black soldier fly; BSF (*Hermetia illucens* L.) as an alternative protein to fishmeal or soybean meal in fish, poultry, and pig feeds has been recommended worldwide. In sustainable circular economy, BSF larvae feed on a wide variety of organic wastes in the community and by-products from the agro-industrial manufacturing process then turn bio-wastes into a high-quality protein source proper for animal feed. The objectives of this research were to evaluate suitable diets from local agro-industrial by-products for

* Corresponding author: yupa_han@kku.ac.th
Received: date; August 1, 2022 Accepted: date; September 26, 2022 Published: date; January 10, 2023

BSF production as a protein source in animal feed and to test the feasibility of BSF production at an industrial scale. Two experiments were carried out; in the first experiment, completely randomized design was laid out with nine treatments (diets), and five replications. Treatments were 1) a mixture of tofu waste and chicken feed in ratio 1:1, 2) and 3) a mixture of peanut seed coat and fruit waste in ratio 1:1 and 1:2, 4) and 5) a mixture of slaughterhouse waste and fruit waste in ratio 1:1 and 1:2, 6) a mixture of peanut seed coat, fruit waste, slaughterhouse waste and food waste in ratio 1:1:1:1, and 7)-9) a mixture of brewer's grain and fruit waste in ratio 1:1, 1:2 and 2:1, respectively. All diets tested were able to rear BSF larvae for production as a protein source in animal feed with crude protein ranging from 44.55-56.64%. Treatment diet 6 was the most suitable diet in terms of larval growth, prepupal weight and yield, survival rate, feed consumed, feed conversion ratio, and feed cost. The large-scale production was evaluated in the second experiment, a release of 25,000 5-day-old larvae/container using diet treatment 6 from the first experiment yielded an average of 4.15 ± 0.15 kg prepupae. This large-scale optimization made the production cost cheaper than that of the laboratory scale.
Keywords: *Hermetia illucens*; organic waste; agro-industrial by-products; animal feed; zero waste

บทนำ

ปัญหาอาหารสัตว์ราคาแพงสามารถแก้ไขได้โดยการใช้แมลงโปรตีนหรือแมลงวันลาย (Black soldier fly) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Hermetia illucens* L. จัดอยู่ในวงศ์ Stratiomyidae อันดับ Diptera พบได้ทั่วไปในเขตร้อนชื้นและเขตอบอุ่นของเส้นศูนย์สูตร เป็นแมลงที่ไม่รบกวนมนุษย์ ไม่เป็นพาหะนำเชื้อโรค และเป็นแมลงที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Sheppard et al., 2002) ตัวหนอนกินขยะอินทรีย์หลากหลาย เช่น เศษอาหารจากครัวเรือน (Zheng et al., 2012) ผลพลอยได้ (by-product) จากอุตสาหกรรมการแปรรูป เช่น กากเบียร์ (Jucker et al., 2019) เศษและเปลือกผลไม้ (Nguyen et al., 2015) ฟางข้าว (Banks et al., 2014) กากตะกอน (Green and Popa, 2012) เครื่องในสัตว์ ของเสียที่ได้จากมูลสัตว์ (Lalander et al., 2013) และเปลี่ยนผลพลอยได้เหล่านี้ให้เป็นชีวมวล (biomass) ที่มีคุณค่าทางโภชนะ แมลงโปรตีนเลี้ยงได้ง่าย วงจรชีวิตสั้น ระยะก่อนเข้าดักแด้ (prepupa) มีองค์ประกอบของโปรตีน 42-50% ไขมัน 29-35% พลังงาน 2,900 กิโลแคลอรี่/กก. มีกรดอะมิโน และแร่ธาตุอาหาร (Sheppard et al., 2002; Wang and Shelomi, 2017) มีงานวิจัยการใช้แมลงโปรตีนเป็นส่วนประกอบของอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์ปีก (Hale, 1973) เลี้ยงสุกร (Newton et al., 1977) และปลาหลายชนิดที่เลี้ยงเชิงพาณิชย์ (St-Hilaire et al., 2007) พบว่า มีการเจริญเติบโตดี สุขภาพสัตว์ดี และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดี นอกจากนี้แมลงโปรตีนมีกรดไขมันลอริก (lauric acid) เพปไทด์ต้านจุลชีพ (antimicrobial peptides) และไคติน (chitin) ซึ่งมีคุณสมบัติในการกระตุ้นภูมิต้านทาน จากผลงานวิจัยของ Schiavone et al. (2017) ที่ทดลองการใช้น้ำมันจากแมลงโปรตีนทดแทนน้ำมันกากถั่วเหลือง 100% ในอาหารไก่เนื้อ พบว่าน้ำหนักตัวและคุณภาพซากเพิ่มขึ้น และไม่กระทบต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ นอกจากนี้ Marono et al. (2017) รายงานผลของการตรวจเลือดไก่เพื่อเป็นดัชนีชี้วัดสุขภาพของสัตว์ พบว่า เลือดไก่ที่เลี้ยงด้วยแมลงโปรตีนมีระดับของโกลบูลิน (globulin) สูง ส่วนอัตราของอัลบูมินต่อโกลบูลิน (albumin/globulin ratio) ต่ำ แสดงถึงความต้านทานต่อเชื้อโรคและการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันที่ดี (Griminger and Scanes, 1986) ดังนั้นแมลงโปรตีนจึงเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นอาหารสัตว์ ตั้งแต่ปี 2543 มีบริษัทที่ผลิตแมลงโปรตีนทั่วโลก เช่น สหรัฐอเมริกา แคนนาดา จีน แอฟริกา และยุโรป มีการผลิตแมลงโปรตีนสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์รวมประมาณ 10,000 ตัน ในปี 2564 และคาดว่าในปี 2573 จะมีการผลิตแมลงโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 500,000 ตัน แต่ปัจจุบันการผลิตแมลงโปรตีนยังมีราคาแพงมากประมาณ 153,000-218,000 บาท/ตัน ซึ่งมีราคาแพงกว่าโปรตีนอื่น เช่นปลาป่น หรือกากถั่วเหลือง ที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ (Feed navigator, 2021)

โรงเรือนต้นแบบวิจัยและผลิตแมลงอุตสาหกรรม หมวดแมลงอุตสาหกรรม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีการผลิตแมลงโปรตีน โดยใช้ส่วนผสมของกากเต้าหู้และอาหารไก่ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูง จึงได้มีการศึกษาหาแหล่งวัตถุดิบ

อาหารสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนจากวัตถุดิบที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปในท้องถิ่น เช่น กากเบียร์ที่เป็นผลพลอยได้จากโรงผลิตเบียร์ เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสงจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว เนยถั่ว นอกจากนี้มีเศษอาหารเปลือกผลไม้ ซึ่งสามารถนำมาเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนได้ตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ความยั่งยืน (sustainable) และไม่มีขยะเหลือทิ้ง (zero waste) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อประเมินสูตรอาหารที่เหมาะสมโดยเน้นการนำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรในท้องถิ่นมาผลิตแมลงโปรตีนเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ และการทดสอบความเป็นไปได้ของการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม

วิธีการศึกษา

การทดสอบสูตรอาหารที่เหมาะสมในการเลี้ยงแมลงโปรตีน

การเลี้ยงแมลงโปรตีน

แมลงโปรตีน (*Hermetia illucens* L.) ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงเรือนต้นแบบวิจัยและผลิตแมลงอุตสาหกรรม หมวดแมลงอุตสาหกรรม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยการเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนด้วยส่วนผสมของกากเต้าหู้และอาหารไก่พื้นเมืองเบทาโกร 215 ที่มีโปรตีน 14% อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 28 $\pm$ 2 °ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% ช่วงแสง L:D 12:12 เมื่อหนอนเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ (prepupa) อายุ 18 วัน นำมาบ่มในห้องมืด อุณหภูมิ 32 $\pm$ 2 °ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ 70-80% เมื่อดักแด้เริ่มออกเป็นตัวเต็มวัย ย้ายเข้ากรงตาข่ายไนลอน ขนาด 3x5x2.5 ม. ที่อยู่ภายนอกอาคารเพื่อให้แมลงผสมพันธุ์และวางไข่ โดยปล่อยตัวเต็มวัยเพศผู้และเพศเมีย สัดส่วนเพศ 1:1 เป็นจำนวน 25,000 ตัว/วัน เก็บไข่ทุกวัน นำกลุ่มไข่มาฟักโดยวางบนกระดาษกรองในภาชนะเลี้ยงที่มีอาหาร ที่อุณหภูมิห้อง 32 $\pm$ 2 °ซ. ความชื้นความสัมพัทธ์ 70-80% อนุบาลหนอนจนอายุ 5 วัน จึงนำมาใช้ในการทดลอง

การเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีน

วัตถุดิบอาหารที่ใช้มุ่งเน้นเศษอาหารและเศษเหลือใช้ที่เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารในท้องถิ่นได้แก่ 1) กากเต้าหู้ (tofu waste) จากโรงงานการผลิตเต้าหู้ก้อน 2) เศษผลไม้ (fruit waste) ส่วนใหญ่เป็นเปลือกและผลไม้ที่ถูกคัดทิ้ง เช่น เปลือกมะละกอสุก มะม่วง แตงโม สับปะรด และแคนตาลูป จากร้านขายผลไม้ในมหาวิทยาลัยขอนแก่น 3) เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง (peanut seed coat) ลักษณะผิวบางสีน้ำตาลแดง น้ำหนักเบา จากอุตสาหกรรมแปรรูปขนมขบเคี้ยวและอาหารที่ใช้เมล็ดถั่วลิสงที่ผ่านกระบวนการปอกเยื่อหุ้มเมล็ดออก 4) เศษอาหาร (food waste) จากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นเศษข้าวและเศษอาหารประเภทเส้นประมาณ 80% ที่เหลือเป็นเศษเนื้อสัตว์ ไข่ และผัก ส่วนของน้ำซุปหรือน้ำแกงไม่ได้ใช้ 5) เศษเนื้อหมูตัดแต่ง (slaughterhouse waste) เป็นเศษเนื้อหมูคัดทิ้งจากโรงงานแปรรูปสุกรในจังหวัดขอนแก่น แยกเป็นเศษเนื้อหมู เนื้อติดไขมัน และเครื่องในหมู 30 50 และ 20% ตามลำดับ 6) กากเบียร์แห้ง (brewers' grain) จากอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ซึ่งมีผลพลอยได้ 4 ชนิด ได้แก่ brewer spent grain, trub, residual yeast, และ diatomaceous earth โดยมี brewers' spent grain เป็นตัวหลัก คิดเป็น 85% ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด (Mathias et al., 2014) ซึ่งมีความชื้นสัมพันธ์ 80% และมีจุลินทรีย์มากทำให้มีอายุการเก็บรักษาเพียง 48 ชั่วโมง (Malakhova et al., 2015) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้กากเบียร์แห้ง (brewers' grain) ซึ่งเป็นส่วนผสมของ brewers' spent grain และ trub โดยอาหารที่มีขนาดใหญ่และแข็งได้แก่ กากเบียร์แห้ง เศษเนื้อหมูคัดทิ้งและเศษผลไม้ นำมาบดให้ละเอียดก่อนที่จะนำไปผสม เพื่อให้หนอนกินและย่อยได้ง่าย สูตรอาหาร 9 สูตร มีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ดังนี้

สูตรที่ 1 : กากเต้าหู้ผสมกับอาหารไก่พื้นเมืองเบทาโกร 215 ที่มีโปรตีน 14% อัตราส่วน 1:1 (สูตรอาหารควบคุม)

สูตรที่ 2 : เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสงผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2

สูตรที่ 3 : เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสงผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 2:1

สูตรที่ 4 : เศษเนื้อหมูตัดแต่งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2

สูตรที่ 5 : เศษเนื้อหมูตัดแต่งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 2:1

สูตรที่ 6 : ส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อหมูตัดแต่ง และเศษอาหาร อัตราส่วน 1:1:1:1

สูตรที่ 7 : กากเบียร์แห้งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:1

สูตรที่ 8 : กากเบียร์แห้งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2

สูตรที่ 9 : กากเบียร์แห้งผสมกับเศษผลไม้ อัตราส่วน 2:1

การทดสอบผลของอาหารต่อการเจริญเติบโตของแมลงโปรตีน

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) แบ่งเป็น 9 กรรมวิธี (สูตรอาหาร) ดังรายละเอียดในข้อ 1.2 กรรมวิธีละจำนวน 5 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้หนอนอายุ 5 วัน จำนวน 200 ตัว ชั่งน้ำหนักหนอนเริ่มต้นก่อนใส่หนอนในกล่องพลาสติกขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 20 x 31 x 8 ซม. ที่มีอาหารทดสอบแต่ละสูตรเลี้ยงปริมาณเริ่มต้น 100 กรัม เติมน้ำปรับอาหารให้มีความชื้น 70% สวมกล่องเลี้ยงด้วยถุงผ้าใยบัวเพื่อป้องกันการรบกวนของแมลงชนิดอื่น เติมอาหารทุก 2-3 วัน เมื่อหนอนอายุ 18 วัน จะข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ สังเกตจากสีของตัวหนอนที่เปลี่ยนจากสีครีมเป็นสีเทาปนดำ บันทึกวันที่เข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ทุกวัน ทดลองช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม 2564 ที่อุณหภูมิ 32 $\pm$ 3 °ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ 80-90% ช่วงแสง L:D เท่ากับ 12:12 ชั่วโมง เมื่อหนอนทั้งหมดเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ ชั่งน้ำหนักอาหารที่เหลือ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °ซ. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การบันทึกข้อมูลระยะหนอน (larval period) นับจากอายุหนอนวันที่เริ่มทดลองจนถึงวันที่เข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ ผลผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ (prepupal yield) เป็นน้ำหนักสดของระยะก่อนเข้าดักแด้ทั้งหมด อัตราการรอดชีวิต (survival rate) นับจากจำนวนหนอนที่เริ่มทดลองจนถึงวันที่เข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ ปริมาณอาหารที่กิน (feed consumed) คิดเป็นน้ำหนักแห้ง (โดยชั่งน้ำหนักสดของอาหารแต่ละสูตรจำนวน 50 ก. จำนวน 3 ซ้ำ อบที่อุณหภูมิ 100 °ซ. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้งสำหรับคำนวณปริมาณอาหารที่กิน) ต้นทุนค่าอาหาร (feed cost) เป็นจำนวนเงินค่าอาหารที่ต้องซื้อในการผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ สด 1 กก. และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio: FCR) สูตรการคำนวณตัวชี้วัดต่าง ๆ มีดังนี้

$$1)\ \text{อัตราการรอดชีวิต (\%)} = \frac{\text{จำนวนตัวหนอนเริ่มต้นการทดลอง} - \text{จำนวนระยะก่อนเข้าดักแด้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนตัวหนอนเริ่มต้นการทดลอง}} \times 100$$

$$2)\ \text{ปริมาณอาหารที่กิน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่ให้} - \text{ปริมาณอาหารที่เหลือ}}{\text{ปริมาณอาหารที่ให้}} \times 100$$

$$3)\ \text{อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น}}$$

ตัวชี้วัดในข้อ 2 และข้อ 3 คำนวณจากน้ำหนักแห้ง ส่วนการทดสอบในระดับอุตสาหกรรมคำนวณจากน้ำหนักสด

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนะโดยวิธีประมาณ (Proximate Analysis)

นำสูตรอาหารสดจำนวน 9 ตัวอย่าง และระยะก่อนเข้าดักแด้ที่ได้จากสูตรอาหารต่าง ๆ จำนวน 9 ตัวอย่าง (ข้อ 1.3) รวมจำนวนทั้งหมด 18 ตัวอย่างๆ ละ 400 ก. เข้าตู้อบอุณหภูมิ 60 °ซ. เป็นเวลา 72 ชม. เมื่อน้ำหนักแห้งคงที่บดตัวอย่างให้ละเอียดบรรจุใส่ถุงเก็บตัวอย่างละ 50 ก. ก่อนนำส่งวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนะโดยวิธีประมาณ ประกอบด้วย ค่าความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต แคลเซียมและฟอสฟอรัส วัดค่าพลังงานรวม (Gross energy) ตามวิธีของ A.O.A.C (2000) โดยใช้เครื่อง Ballistic bomb calorimeter ที่ศูนย์ศึกษาค้นคว้าวิจัยและห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลตัวชี้วัดต่าง ๆ ในข้อ 1.3 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's honesty significant difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) โดยใช้โปรแกรม R (R Development core team, 2008)

การทดสอบการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม

นำสูตรอาหารที่เหมาะสมในการเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนจากการทดลองข้อ 1 มาทดสอบในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้ตัวหนอนอายุ 5 วัน จำนวน 25,000 ตัว จากการสุ่มชั่งน้ำหนักหนอน 100 ตัว จำนวน 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักหนอนต่อตัวก่อนคูณด้วย 25,000 ตัว คิดได้น้ำหนัก 375 ก. เป็นความหนาแน่นของตัวหนอน 4.20 ตัว/ซม.^{2} ของพื้นที่ผิว ใส่ในกระบะเลี้ยงขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 93 x 63 x 17 ซม. ที่มีอาหารเริ่มต้น 16 กก. ทำจำนวน 3 ซ้ำ เติมอาหารทุก 3 วัน เมื่อหนอนเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ อายุ 18 วัน สังเกตจากการเปลี่ยนสีของตัวหนอนที่เปลี่ยนจากสีครีมเป็นสีเทาปนดำ จากนั้นทำการสุ่มน้ำหนักระยะก่อนเข้าดักแด้ 100 ตัว จำนวน 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักต่อตัวก่อนคูณด้วย 25,000 ตัว เพื่อหาค่าการผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ต่อกระบะเลี้ยง โดยการเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2564 ที่อุณหภูมิ 30 $\pm$ 2 °ซ. ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ช่วงแสง L:D 12:12 เติมน้ำรักษาความชื้นของอาหารไม่ต่ำกว่า 70% เมื่อหนอนเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ประมาณ 80% นำมาร่อนแยกมูลออก โดยใช้เครื่องร่อนไฟฟ้าที่มีรูตะแกรงขนาด 5 มม. จากนั้นนำ หนอนไปทำความสะอาดก่อนเข้าตู้แช่อุณหภูมิ -20 °ซ. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลปริมาณอาหารที่กิน ผลผลิตรวมของระยะก่อนเข้าดักแด้ น้ำหนักมูล คำนวณอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และต้นทุนค่าอาหารในการผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ 1 กก. ทุกตัวชี้วัดเป็นน้ำหนักสด

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การทดสอบสูตรอาหารที่เหมาะสมในการเลี้ยงแมลงโปรตีน

หนอนที่เลี้ยงด้วยส่วนผสมของกากเต้าหู้และอาหารไก่ในกรรมวิธีที่ 1 (Control) มีการเจริญเติบโตเร็วที่สุดเริ่มเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ ตั้งแต่อายุ 13 วัน ค่าเฉลี่ย 15.68 วัน แตกต่างจากอาหารสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) **(Table 1)** เนื่องจากอาหารไก่ที่ใช้เป็นอาหารสำเร็จรูปมีคุณค่าทางอาหารสมดุล แร่ธาตุวิตามินครบถ้วน การผสมกับกากเต้าหู้อัตราส่วน 1:1 ทำให้มีโปรตีน 19.26% **(Table 3)** รองลงมาคือกรรมวิธีที่ 6 ระยะหนอน 17.81 วัน เนื่องจากอาหารมีส่วนประกอบหลากหลาย ได้แก่ เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อหมูตัดแต่ง และเศษอาหาร โปรตีนรวม 23.93% คาร์โบไฮเดรต 26.19% คิดเป็นอัตราส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรต ใกล้เคียงกับงานทดลองของ Cammack and Tombelin (2017) ที่ทดลองโดยใช้หนอนอายุ 8 วัน พบว่า อาหารที่สมดุล คือ มีโปรตีน 21% ต่อคาร์โบไฮเดรต 21% ความชื้นของอาหาร 70% ทำให้หนอนโตเร็ว กินอาหารน้อย มีการรอดชีวิตสูง กรรมวิธีที่ 3 และกรรมวิธีที่ 2 เป็นส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสงและเศษผลไม้ อัตรา 2:1 และ 1:2 ระยะหนอนนานที่สุด 23.22 วัน และ 21.14 วัน ตามลำดับ เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง มีเยื่อใยมาก อาหารแห้งเร็วต้องเติมน้ำเพื่อไม่ให้ความชื้นต่ำกว่า 70% อย่างไรก็ตามหนอนที่เลี้ยงด้วยส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง และ

เศษผลไม้ อัตราส่วน 2:1 ให้น้ำหนัก ระยะก่อนเข้าดักแด้ มากที่สุด 135 มก./ตัว แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับกรรมวิธีที่ 6 (น้ำหนัก 130 มก./ตัว) และกรรมวิธีที่ 1 (น้ำหนัก 125 มก./ตัว) และยังให้ผลผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ มากที่สุด 26.24 ก. **(Table 1)**

อัตราการรอดชีวิตของหนอนที่เลี้ยงด้วยอาหารทุกสูตร ตั้งแต่ 80.10–99.80% หนอนที่เลี้ยงด้วยอาหารทุกกรรมวิธียกเว้นกรรมวิธีที่ 5 มีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากรรมวิธีที่ 4 อย่าง อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) **(Table 1)** และการที่กรรมวิธีที่ 4 มีการรอดชีวิตต่ำสุด 80.10% เนื่องจากเป็นเศษเนื้อหมูตัดแต่งจากโรงงานแปรรูปสุกร ในอาหารมีไขมันสูง 45.10% ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโต สอดคล้องกับงานทดลองของ Oonincx et al. (2015) ที่เลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนด้วยอาหารมีโปรตีนต่ำ 12.9% ไขมันสูง 14.6% หนอนรอดชีวิตต่ำสุด 72% เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารอื่นที่ทดลอง Gobbi et al. (2013) เลี้ยงหนอนโปรตีนแรกฟักด้วยเนื้อสัตว์อย่างเดียว การรอดชีวิตของหนอนและดักแด้เท่ากับ 40 และ 20% ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพ เนื้ออาหารหนา อาหารแห้งเร็ว หนอนกินได้น้อย มีผลต่อการเจริญเติบโตและการรอดชีวิต สำหรับปริมาณอาหารที่กิน พบว่า หนอนที่เลี้ยงด้วยส่วนผสมของกากเบียร์แห้งและเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:2 ในกรรมวิธีที่ 8 กินอาหารมากที่สุด 63.41% แตกต่างจากอาหารอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) **(Table 2)** เนื่องจากเศษผลไม้ทำให้เนื้ออาหารนิ่มหนอนกินได้ง่าย เปรียบเทียบกับสูตรอาหารที่มีส่วนผสมของกากเบียร์แห้งและเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:1 ในกรรมวิธีที่ 7 ปริมาณอาหารอาหารที่กิน 35.32% และเมื่อเพิ่มอัตราของกากเบียร์ต่อเศษผลไม้เป็น 2:1 ในกรรมวิธีที่ 9 หนอนกินอาหารเพิ่มขึ้นเป็น 49.07% ผลการทดลองสอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของกรรมวิธีที่ 7 ซึ่งมีค่าต่ำสุด 2.180 แสดงว่า ส่วนผสมของกากเบียร์แห้งและเศษผลไม้ อัตราส่วน 1:1 เหมาะสมที่สุด มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด และต้นทุนค่าอาหารต่ำกว่า ถึงแม้ว่าน้ำหนักต่อตัวและผลผลิต จะต่ำกว่ากรรมวิธีที่ 8 และกรรมวิธีที่ 9 เล็กน้อย นอกจากนี้ระยะหนอนมีอายุ 19.08 วัน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jucker et al. (2019) ที่ใช้แต่กากเบียร์ ระยะหนอน 18.7 วัน ระยะก่อนเข้าดักแด้จากกรรมวิธีที่ 7 มีโปรตีน 53.97% ไขมัน 23.33% ใกล้เคียงกับงานทดลองของ Bava et al. (2019) ที่ใช้แต่กากเบียร์เลี้ยงได้หนอนระยะก่อนเข้าดักแด้มีโปรตีน 54.1% ไขมัน 23.2% น้ำหนักตัว 98 มก./ตัว (มากกว่าของงานทดลองครั้งนี้ 85 มก./ตัว) ส่วนหนอนที่เลี้ยงด้วยส่วนผสมของเศษเนื้อหมูตัดแต่ง และเศษผลไม้ อัตราส่วน 2:1 ในกรรมวิธีที่ 5 กินอาหารน้อยที่สุด 12.04% เนื่องจากเศษเนื้อสัตว์มีไขมันสูง 43.03% และมีพังผืดที่หนอนไม่กิน

อาหารที่ทดลองทุกสูตรให้ระยะก่อนเข้าดักแด้ที่มีโภชนสารสูง คือ มีโปรตีน 44.55 – 56.64% ไขมัน 19.53 – 39.49% **(Table 4)** ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Spranghers et al. (2017) และ Bava et al. (2019) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากระยะหนอน น้ำหนักและผลผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ อัตราการรอดชีวิต ปริมาณอาหารที่กิน ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และที่สำคัญคือ ต้นทุนค่าอาหารต่ำ สูตรอาหารกรรมวิธีที่ 6 มีส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อหมูตัดแต่ง และเศษอาหาร มีความเหมาะสมที่สุด เพราะระยะก่อนเข้าดักแด้ ที่ได้มีโปรตีน 44.86% ไขมัน 34.78%

ข้อเสนอแนะสำหรับงานทดลองในระดับห้องปฏิบัติการครั้งนี้คือการรักษาความสม่ำเสมอของคุณภาพวัตถุดิบที่นำมาเป็นอาหารเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีน โดยเฉพาะเศษอาหารต้องมีไขมันไม่มากเกินไป และอาจจะลดการใช้เศษเนื้อหมูตัดแต่งลง 50% จากสูตรอาหารที่ใช้เพื่อลดต้นทุนค่าอาหาร

Table 1 Larval period, prepupal weight, prepupal yield, and survival rate of black soldier fly reared on different diets (n=200/treatment)

Rearing diets	Larval period (day)		Prepupal weight (mg/individual)	Prepupal yield (g)	Survival rate (%)
	Mean	Range			
1. Tofu waste + chicken feed 1:1 (Control)	15.68 [e1]	13 - 22	125 [ab]	24.43 [a]	98.00 [a]
2. Peanut seed coat + fruit waste 1:2	21.19 [b]	17 - 27	110 [c]	20.95 [bc]	95.00 [ab]
3. Peanut seed coat + fruit waste 2:1	23.22 [a]	18 - 31	135 [a]	26.24 [a]	97.40 [a]
4. Slaughterhouse waste + fruit waste 1:2	19.08 [c]	15 -26	121 [b]	19.42 [bc]	80.10 [c]
5. Slaughterhouse waste + fruit waste 2:1	19.04 [c]	15 - 24	122 [b]	21.35 [b]	87.60 [bc]
6. A mixture of peanut seed coat, fruit waste, slaughterhouse waste and food waste 1:1:1:1	17.81 [d]	15 -24	130 [ab]	25.17 [a]	96.90 [a]
7. Brewers' grain + fruit waste 1:1	19.08 [c]	15 - 24	85 [e]	16.10 [d]	99.80 [a]
8. Brewers' grain + fruit waste 1:2	19.91 [c]	16 - 27	98 [d]	18.77 [cd]	95.90 [b]
9. Brewers' grain + fruit waste 2:1	18.11 [d]	16 - 27	99 [d]	19.76 [bc]	99.60 [a]
SEM	0.19	-	2.2	0.5	1.81
F-test	**	-	**	**	**
C.V. (%)	2.21	-	4.32	5.18	4.27

[1]Mean values with the same letter within a column are not significantly different at P≥0.05 by Tukey's HSD test, ns non-significant, *significant at P<0.05, **very significant at P<0.01

Table 2 Feed consumed, feed conversion ratio and feed cost of black soldier fly reared on different diets (n=200/treatment)

Rearing diets	Feed consumed (%)	Feed Conversion Ratio (FCR)	Feed cost of 1 kg prepupa (Baht)
1. Tofu waste + chicken feed 1:1 (Control)	48.25 [bc1]	4.71 [a]	73.33 [a]
2. Peanut seed coat + fruit waste 1:2	41.88 [c]	4.68 [a]	9.91 [e]
3. Peanut seed coat + fruit waste 2:1	21.56 [e]	2.10 [cd]	32.25 [c]
4. Slaughterhouse waste + fruit waste 1:2	20.63 [e]	1.56 [de]	16.07 [d]
5. Slaughterhouse waste + fruit waste 2:1	12.04 [f]	0.10 [e]	33.19 [c]
6. A mixture of peanut seed coat, fruit waste, slaughterhouse waste and food waste 1:1:1:1	35.15 [d]	2.43 [c]	9.92 [e]
7. Brewers' grain + fruit waste 1:1	35.32 [d]	2.18 [c]	16.67 [d]
8. Brewers' grain + fruit waste 1:2	63.41 [a]	4.57 [a]	16.82 [d]
9. Brewers' grain + fruit waste 2:1	49.07 [bc]	3.16 [b]	43.12 [b]
SEM	1.38	0.13	0.7
F-test	**	**	**
C.V. (%)	8.46	9.53	5.64

[1]Mean values with the same letter within a column are not significantly different at P≥0.05 by Tukey's HSD test, ns non-significant, *significant at P<0.05, **very significant at P<0.01

Table 3 Proximate composition of different diets used for rearing black soldier fly larvae

Rearing diets	Moisture (%)	Crude protein (%)	Ether extract (%)	Crude fiber (%)	Ash (%)	Carbohydrate (%)	Gross energy (kcal/kg)
1. Tofu waste + chicken feed 1:1 (Control)	3.93	19.26	3.43	9.11	7.38	56.89	3997.56
2. Peanut seed coat + fruit waste 1:2	7.13	20.35	24.98	10.44	3.61	33.49	5192.51
3. Peanut seed coat + fruit waste 2:1	6.64	22.1	25.99	10.24	4.06	30.98	5268.46
4. Slaughterhouse waste + fruit waste 1:2	6.29	28.96	45.1	5.22	4.63	9.8	5978.55
5. Slaughterhouse waste + fruit waste 2:1	5.93	34.4	43.03	3.72	3.33	9.59	6257.05
6. A mixture of peanut seed coat, fruit waste, slaughterhouse waste and food waste 1:1:1:1	5.28	23.93	32.35	7.64	4.6	26.19	5632.94
7. Brewers' grain + fruit waste 1:1	6.91	30.5	6.67	12.01	7.79	36.12	4453.76
8. Brewers' grain + fruit waste 1:2	6.65	33.94	6.48	10.12	7.64	35.17	4714.82
9. Brewers' grain + fruit waste 2:1	6.66	33.57	5.92	10.2	5.87	37.78	4661.08

Table 4 Proximate composition of black soldier fly prepupae reared on different diets

Rearing diets	Moisture (%)	Crude protein (%)	Ether extract (%)	Crude fiber (%)	Ash (%)	Gross energy (kcal/kg)
1. Tofu waste + chicken feed 1:1 (Control)	6.06	46.48	28.73	7.00	11.74	8019.01
2. Peanut seed coat + fruit waste 1:2	7.3	49.09	27.51	9.02	7.07	5728.96
3. Peanut seed coat + fruit waste 2:1	10.18	47.78	28.36	7.93	5.75	5965.89
4. Slaughterhouse waste + fruit waste 1:2	9.38	44.55	34.31	5.95	5.81	6221.46
5. Slaughterhouse waste+ fruit waste 2:1	2.19	46.2	39.49	7.65	4.46	6294.07
6. A mixture of peanut seed coat, fruit waste, slaughterhouse waste and food waste 1:1:1:1	6.1	44.86	34.78	7.64	6.62	6083.88
7. Brewers' grain + fruit waste 1:1	3.01	53.97	23.73	9.96	9.34	5464.56
8. Brewers' grain + fruit waste 1:2	5.4	53.64	20.56	10.36	10.04	5345.61
9. Brewers' grain + fruit waste 2:1	4.45	56.64	19.53	10.52	8.85	5395.05

การทดสอบการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม

การทดสอบทำโดยใส่ส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อหมูคัดทิ้งและเศษอาหาร (กรรมวิธีที่ 6) ซึ่งเป็นอาหารที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อที่ 1 พบว่า สามารถผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ได้เฉลี่ย 4.15 กก./กระบะ **(Table 5)** ปริมาณอาหารที่กิน 84.31% การเก็บผลผลิตเมื่อหนอนอายุ 15 วัน เข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ประมาณ 80% โดยการใช้เครื่องร่อนไฟฟ้าที่สามารถแยกกากหรือมูลของหนอนออกได้รวดเร็ว ใช้เวลาในการร่อน 15 นาที/กระบะ เร็วกว่าการใช้มือร่อนผ่านตะแกรงที่ใช้เวลา 45-60 นาที ได้มูล 5.30 กก. ลักษณะมูลหนอนเป็นเม็ดเล็กคล้ายดินร่วน สีน้ำตาลเข้ม มีความชื้นเล็กน้อย สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ส่วนของพังผืดที่ติดกับเศษเนื้อคัดทิ้งจากโรงงานแปรรูปสุกรที่หนอนไม่กินหรือกินน้อยแต่ย่อยไม่ได้จะเหลือเป็นกากแห้งแข็ง การอบแห้งหนอนระยะก่อนเข้าดักแด้ ใช้อุณหภูมิ 55 °ซ. นาน 72 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร เช่น โปรตีน ไขมัน และวิตามิน หลังจากการอบแห้ง หนอนเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม และมีกลิ่นหอมคล้ายปลาป่น ต้นทุนค่าอาหารสำหรับการผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้สด เฉลี่ย กก.ละ 5.93 บาท ถูกกว่าการเลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการของการทดลองที่หนึ่ง (9.92 บาท) 40.22% เนื่องจากผู้วิจัยได้ปรับปริมาณอาหารให้เหมาะสมกับจำนวนหนอนให้พอดี จากผลการศึกษาทำให้เห็นศักยภาพการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรมที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าการเลี้ยงระดับห้องปฏิบัติการคือ ระยะหนอนสั้นกว่า การเลี้ยงใช้เวลา 15 วัน เก็บผลผลิตครั้งเดียว ได้น้ำหนักเฉลี่ยของระยะก่อนเข้าดักแด้ 170 มก./ตัว สูงกว่าน้ำหนัก 130 มก./ตัว ที่เลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีการตรวจนับการเข้าระยะก่อนเข้าดักแด้ทุกวัน ทำให้หนอนถูกรบกวน นอกจากนี้สภาพอากาศมีความแปรปรวนอุณหภูมิไม่คงที่ โดยสรุปผลจากการทดสอบครั้งนี้สอดคล้องกับงานของ Scala et al. (2020) ที่พบว่าการเลี้ยงระดับอุตสาหกรรมหนอนใช้เวลาเป็นระยะก่อนเข้าดักแด้เร็วขึ้น ให้น้ำหนักระยะก่อนเข้าดักแด้มากกว่า โดยอธิบายว่า การเลี้ยงหนอนจำนวนมากจะผลิตความร้อน ซึ่งมีผลทางบวกกับการเจริญเติบโตของแมลงโปรตีน อย่างไรก็ตาม ต้องหมั่นกลับอาหารเพื่อลดความร้อนในกระบะเลี้ยง มีงานวิจัยหลายงานที่แสดงว่าการเลี้ยงหนอนแบบเดี่ยว หรือเลี้ยงกลุ่มเล็ก ๆ หนอนจะมีการเจริญเติบโตช้ากว่าการเลี้ยงเป็นกลุ่มใหญ่ Bonelli et al. (2019) กล่าวว่าความร้อนภายนอกมีผลต่อการควบคุมน้ำย่อยในทางเดินอาหารของแมลงโปรตีนชักนำให้การย่อยโปรตีนเร็วขึ้น อุณหภูมิของน้ำย่อยที่เหมาะสมคือ 45 °ซ.

ข้อเสนอแนะจากงานทดลองนี้ควรทดสอบการเพิ่มปริมาณจำนวนตัวหนอนต่อกระบะให้มากขึ้น และเพิ่มอาหารตามสัดส่วนที่เหมาะสมเช่นการเพิ่มจำนวนหนอนต่อกระบะจาก 25,000 ตัว ความหนาแน่นของตัวหนอน 4.20 ตัว/ซม.^{2} เป็น 35,000 ตัว ความหนาแน่นของตัวหนอน 5.88 ตัว/ซม.^{2} จากการศึกษาของParra Paz et al. (2015) พบว่าความหนาแน่นของหนอนจำนวน 5 ตัว/ซม.^{2} ไม่ส่งผลเสียต่อระยะหนอนและน้ำหนักแห้งของหนอน เมื่อให้อาหารไม่ต่ำกว่า 1.7 ก./ตัว (น้ำหนักแห้ง)

Table 5 Number of larvae, feed consumed, prepupal yield, and weight, feed conversion ratio, frass, and feed cost of black soldier fly (Mean ± SD)

No. of larvae (individual)	Feed consumed (%)	Prepupal yield (kg)	Prepupal weight (mg/individual)	Feed Conversion Ratio (FCR)	Frass (kg)	Feed cost of 1 kg prepupa (Bath)
25,000	84.31 ± 1.59	4.15 ± 0.15	170 ± 10	3.90 ± 0.43	5.30 ± 0.26	5.93 ± 0.51

สรุป

สูตรอาหารที่เหมาะสมกับการผลิตแมลงโปรตีนเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ คือ สูตรอาหารที่มีส่วนผสมของเยื่อหุ้มเมล็ดถั่วลิสง เศษผลไม้ เศษเนื้อตัดแต่ง และเศษอาหาร อัตราส่วน 1:1:1:1 โดยน้ำหนัก ตัวหนอนมีการเจริญเติบโตดี ใช้ระยะเวลาสั้น การรอดชีวิตสูง ได้น้ำหนักของระยะก่อนเข้าดักแด้และผลผลิตรวมมากที่สุด มีต้นทุนค่าอาหารเลี้ยงหนอนต่ำ และวัตถุดิบเลี้ยงหนอนหา

ได้ง่าย ส่วนการทดสอบการผลิตแมลงโปรตีนระดับอุตสาหกรรม พบว่า การเลี้ยงหนอนแมลงโปรตีนอายุ 5 วัน จำนวน 25,000 ตัว/กระบะ โดยใช้สูตรอาหารดังกล่าว ได้ผลผลิตระยะก่อนเข้าดักแด้ 4.15 กก./กระบะ และมีน้ำหนักตัวของระยะก่อนเข้าดักแด้สูงกว่าที่เลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการและมีต้นทุนค่าอาหารถูกกว่า

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2564 และขอขอบคุณโรงเรือนต้นแบบวิจัยและผลิตแมลงอุตสาหกรรม หมวดแมลงอุตสาหกรรม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์หนอนแมลงโปรตีน และโรงงานแปรรูปสุกรขอนแก่น บริษัท เบทาโกรเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างเศษเนื้อหมูตัดแต่งสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

A.O.A.C (Association of Official Analytical Chemists). 2000. Official Methods of Analysis. Arlington, VA, USA.

Banks, I.J., W.T. Gibson, and M.M. Cameron. 2014. Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human feces and their implication for improving sanitation. Tropical Medicine and International Health. 19: 14–22.

Bava, L., C. Jucker, G. Gislon, D. Lupi, S. Savoldelli, M. Zucali, and S. Colombini. 2019. Rearing of *Hermetia illucens* on different organic by-products: Influence on growth, waste reduction, and environmental impact. Animals. 9 (6): 289.

Bonelli, M., D. Bruno, S. Caccia, G. Sgambetterra, S. Cappellozza, C. Jucker, and M. Casartelli. 2019. Structural and functional characterization of *Hermetia illucens* larval midgut. Frontiers in Physiology. 10: 204.

Cammack, J.A., and J.K. Tomberlin. 2017. The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae). Insects. 8 (2): 56.

Feed navigator. 2021. Available online: https://www.feednavigator.com/Article/2021/02/24/Demand-for-insect-protein-could-hit-500-000-tons-by-2030 (accessed on 29 July 2022).

Gobbi, P., A.S. Martinez-Sanchez, and S. Rojo. 2013. The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). European Journal of Entomology. 110(3): 461.

Green, T.R., and R. Popa. 2012. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. Applied Biochemistry and Biotechnology. 166 (6): 1381-1387.

Griminger, P., and C.G. Scanes. 1986. Protein metabolism. PP 326–345 *In:* Avian Physiology, 4th edn. P.D. Sturkie, Ed. Springer Verlag, New York.

Hale, O.M., 1973. Dried *Hermetia illucens* larvae (Diptera: Stratiomyidae) as a feed additive for poultry. Journal of the Georgia Entomological Society. 8: 16–20.

Jucker, C., D. Erba, M.G. Leonardi, D. Lupi, and S. Savoldelli. 2019. Assessment of vegetable and fruit substrates as potential rearing media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. Environmental Entomology. 46 (6): 1415-1423.

Lalander, C., S. Diener, M.E. Magri, C. Zurbrugg, A. Lindstrom, and B. Vinneras. 2013. Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly *(Hermetia illucens)*-from a hygiene aspect. Science of the Total Environment. 458: 312–318.

Malakhova, D.V., M.A. Egorova, L.I. Prokudina, A.I. Netrusov, and E.A. Tsavkelova. 2015. The biotransformation of brewer's spent grain into biogas by anaerobic microbial communities. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 31(12): 2015-2023.

Marono, S., R. Loponte, P. Lombardi, G. Vassalotti, M.E. Pero, F. Russo, L. Gasco, G. Parisi, G. Piccolo, S. Nizza, C. Di Meo, Y.A. Attia, and F. Bovera. 2017. Productive performance and blood profiles of laying hens fed *Hermetia illucens* larvae meal as total replacement of soybean meal from 24 to 45 week of age. Poultry Science. 96: 1783–1790.

Mathias, D.S.T.R., P.P.M. de Mello, and E.F.C. Sérvulo. 2014. Solid wastes in brewing process: A review. Journal of Brewing and Distilling. 5(1): 1-9.

Newton, G.L., C.V. Booram, R.W. Barker, and O.M. Hale. 1977. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. Journal of Animal Science. 44 (3): 395-400.

Nguyen, T.T.X., J.K. Tomberlin, and S. Vanlaerhoven. 2015. Ability of black soldier fly (Diptera : Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. Environmental Entomology. 44: 406–410.

Oonincx, D.G., S. Van Broekhoven, A. Van Huis, and J.J. van Loon. 2015. Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. PLoS One. 10 (12): 1-20.

Parra Paz, A.S., N.S. Carrejo, and C.H.G. Rodríguez. 2015. Effects of larval density and feeding rates on the bioconversion of vegetable waste using black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae). Waste and Biomass Valorization. 6 (6): 1059-1065.

R Development core team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. Venna, Austria: R Foundation for Statistical Computing [www.document]. URL: http://Rproject.org.

Scala, A., J.A. Cammack, R. Salvia, C. Scieuzo, A. Franco, S.A. Bufo, and P. Falabella. 2020. Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. Scientific Reports. 10 (1): 1-8.

Schiavone, A., M. Cullere, M. De Marco, M. Meneguz, I. Biasato, S. Bergagna, D. Dezzutto, F. Gai, S. Dabbou, L. Gasco, and A. Dalle Zotte. 2017. Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: Effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality. Italian Journal of Animal Science. 16 (1): 93-100.

Sheppard, D.C., J.K. Tomberlin, J.A. Joyce, B.C. Kiser, and S.M. Sumner. 2002. Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). Journal of Medical Entomology. 39: 695–698.

St-Hilaire, S., C. Sheppard, J.K. Tomberlin, S. Irving, L. Newton, M.A. McGuire, E.E. Mosley, R.W. Hardy, and W. Sealey. 2007. Fly prepupae as a feedstuff for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Journal of the World Aquaculture Society. 38(1): 59-67.

Spranghers, T., M. Ottoboni, C. Klootwijk, A. Ovyn, S. Deboosere, B.D. Meulenaer, J. Michiels, M. Eeckhout, D.P. Clercq, and S.D. Smet. 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.

Wang, Y.S., and M. Shelomi. 2017. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food. Foods. 91 (6): 1-23.

Zheng, L.Y., Y.F. Hou, W. Li, S. Yang, Q. Li, and Z.N. Yu. 2012. Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes. Energy. 47: 225–229.