

Wykorzystanie *Hermetia illucens* w biokonwersji oraz biodegradacji odpadów i produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego

Natalia Homska¹, Joanna Kowalska¹,
Zuzanna Mikołajczak², Roksana Wachowiak²,
Mateusz Rawski¹, Bartosz Kierończyk²,
Wojciech Czekala³

¹Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Zoologii,
Pracownia Rybactwa Śródlądowego i Akwakultury

²Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Żywności
Zwierząt

³Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Inżynierii
Biosystemów

Praca została zrealizowana w ramach projektu, którego celem było opracowanie innowacyjnej technologii biokonwersji produktów ubocznych przemysłu spożywczego (ReFood) stanowiących pełnowartościowy materiał paszowy dla *Hermetia illucens* wykorzystywanej do wytwarzania biomasy owadów na potrzeby produkcji tłuszczu paszowego, o potencjale zastosowania w przemyśle paszowym.

Streszczenie

W dobie zwiększającego się światowego zapotrzebowania przemysłu spożywczego i paszowego na białko efektywną i perspektywiczną metodą jego pozyskania jest fermowa hodowla owadów takich jak *Hermetia illucens*. Jest ona jednocześnie zrównoważoną środowiskowo metodą zagospodarowania odpadów pochodzących głównie z przemysłu spożywczego. Larwy tego owada charakteryzują się wysoką zdolnością konwersji materii organicznej na wartościowe białko oraz tłuszcz, które mogą z powodzeniem zostać wykorzystane w żywieniu zwierząt lub produkcji biopaliw. Na efektywność biokonwersji i produktywność larw wpływa szereg czynników środowiskowych takich jak: temperatura, wilgotność względna powietrza, rodzaj i pH substratu, oświetlenie, a także żywieniowych: zawartość białka ogólnego i tłuszczu surowego, ilość wody zawartej w pokarmie oraz obecność mykotoksyn i metali ciężkich.

Wprowadzenie

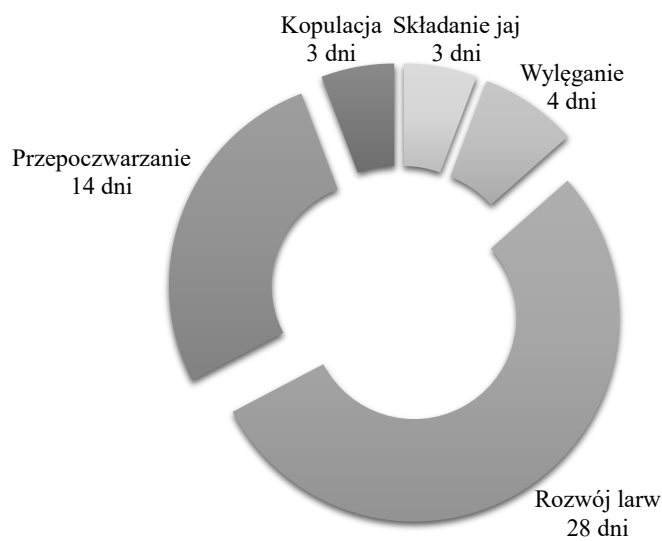
Hermetia illucens jest gatunkiem owada należącym do rzędu muchówek (*Diptera*) naturalnie zasiedlającym tropikalne i subtropikalne rejony obu Ameryk. W wyniku rozwoju handlu i transportu transkontynentalnego został on przypadkowo lub celowo wprowadzony do innych krain geograficznych. Obecnie stanowi takson kosmopolityczny występujący także na terenie Europy, Afryki, Azji oraz Australii i Nowej Zelandii. W cyklu rozwojowym *H. illucens* wyróżniamy larwę, przedpoczwarkę, poczwarkę oraz imago. Stadium dorosłe żyje ok. 8-10 dni, jest uskrzydłone, z reguły nie pobiera pokarmu, ponieważ bazuje na rezerwach energetycznych zgromadzonych w okresie larwalnym [32]. Jednakże Bertinetti i in. (2019) wykazali, że podawanie imago dodatkowego białka w pokarmie może zwiększyć ilość produkowanych jaj trzykrotnie oraz wydłużyć okres ich składania [3]. Dorosłe osobniki osiągają od 13 do 20 mm długości [39]. Następnie, po osiągnięciu dojrzałości w ciągu 2-3 dni poszukują one partnera do rozrodu. Samce rozlokowują się w obrębie terytorium i oczekują na samice. Każdy z nich broni swojego miejsca oczekiwania przed innymi samcami. W momencie pojawienia się samicy samiec przechwytywa ją w powietrzu, a następnie opadają złączeni w akcie kopulacji [43]. W ciągu 72 godzin po kopulacji samice składają od 200 do 600 jaj [44]. Jaja są owalne, o średnicy ok. 1 mm, składane na suchym substracie w pobliżu potencjalnego źródła pożywienia, a ich inkubacja w temperaturze 27-30°C trwa ok. 3-4 dni [39]. Larwy w warunkach naturalnych odżywiają się martwą materią organiczną i dorastają do 20 mm długości. Ich wzrost trwa od 4-7 dni do 5 miesięcy, w zależności od ilości dostępnego pokarmu, jego składu chemicznego oraz warunków utrzymania [44]. Larwy kilkakrotnie linieją. Ostatnim stadium larwalnym jest przedpoczwarka. Forma ta odnajduje optymalne środowisko do przekształcenia się w poczwarkę, z której po dwóch tygodniach powstaje osobnik dorosły. Cały cykl rozwojowy w optymalnych warunkach trwa około 40 dni, a jego przebieg został przedstawiony na rycinie 1 [44].



Fot. 1. Larwy *Hermetia illucens* (fot. HiProMine S.A.)



Fot. 2. Imago *Hermetia illucens* (fot. HiProMine S.A.)



Ryc. 1. Przybliżony czas trwania poszczególnych stadiów cyklu rozwojowego *H. illucens*

Hermetia illucens jako alternatywne źródło białka paszowego

Wraz ze wzrostem liczby ludności na świecie w ciągu ostatnich lat obserwuje się zwiększenie zapotrzebowania na białko pochodzenia zwierzęcego, w tym na białko paszowe. Koszty pasz stanowią największy udział (50-70%) w kosztach produkcji zwierzęcej [27] stąd potrzeba znalezienia zastępczego źródła białka bardziej opłacalnego ekonomicznie oraz o mniejszym negatywnym wpływie na środowisko naturalne. W przeciwieństwie do produkcji roślinnej przeznaczanej na cele paszowe, fermy owadów nie konkurują o powierzchnię uprawną oraz zapasy wody z uprawami konsumpcyjnymi, wymagają mniejszych nakładów energii i wody oraz emitują do atmosfery mniej gazów cieplarnianych [10]. Kolejnym problemem związanym ze wzrostem populacji ludzkiej jest generowanie coraz większej ilości odpadów pochodzenia roślinnego oraz zwierzęcego. Częściowym rozwiązaniem mogą być produkty spożywcze i komponenty

paszowe wytwarzane z biomasy owadów, między innymi *H. illucens* z wykorzystaniem w ich żywieniu produktów ubocznych przemysłu spożywczego i paszowego. Larwy tego owada charakteryzują się wysoką (40-60% w suchej masie) zawartością białka ogólnego (tab. 1) oraz zdolnościami do efektywnego wykorzystywania odpadów roślinnych, oraz zwierzęcych [33, 44]. Całe owady, mączki z nich pochodzące oraz tłuszcze owadzi mogą być wykorzystywane w żywieniu zwierząt np.: drobiu [7, 17, 29, 42], ryb [2, 18, 25, 34] lub zwierząt towarzyszących [20]. Jednakże wykorzystanie owadów jako komponent paszowy nie wszędzie jest dozwolone, a związane z tym regulacje prawne znacząco różnią się w poszczególnych rejonach świata (tab. 2).

Biokonwersja

H. illucens charakteryzuje się zdolnością do efektywnego wykorzystywania szerokiej gamy pokarmów organicznych, w związku z czym może być z powodzeniem wykorzystywana jako narzędzie w biokonwersji odpadów biologicznych [21]. Wykorzystując obornik wieprzowy lub kurzy jako substrat dla larw można w całym okresie ich wzrostu zredukować jego masę o 42-56% przy współczynniku wykorzystania paszy wynoszącym 9,6. Co więcej, pozwala to na jednoczesne pozyskanie biomasy owadów bogatej w białko ogólne (ok. 40% w suchej masie) i tłuszcz surowy (ok. 30% w suchej masie), z której powstać mogą komponenty paszowe niezbędne w żywieniu zwierząt [31]. Żywiąc larwy organicznymi odpadami komunalnymi stopień redukcji masy odpadów oraz współczynnik wykorzystania paszy są jeszcze

Tabela 1

Zawartość białka ogólnego w larwach *H. illucens* utrzymywanych z użyciem różnych substratów stanowiących całość dawki pokarmowej

| Substrat | Białko ogólne w SM (%) | Źródło |
|-------------------------------|------------------------|--------------|
| Obornik bydlęcy | 42,1 | [23] |
| Obornik kurzy | 40,1 ± 2,5 | [23, 32] |
| Obornik wieprzowy | 43,2 | [32] |
| Pasza dla kur | 47,9 ± 7,1 | [35, 33, 41] |
| Produkty uboczne ¹ | 41,7 ± 3,8 | [35] |
| Odpadki kuchenne | 43,1 | [41] |
| Wątroby | 62,7 | [33] |
| Owoce i warzywa | 38,5; 39,9 | [33, 41] |
| Odpady rybne | 57,9 | [33] |
| Marchew | 47,2 | [21] |
| Pomidor | 41,5 | [21] |
| Kapusta | 49,3 | [21] |
| Otręby pszenne | 55,2 | [21] |
| Mieszanina ² | 45,4 | [21] |

SM – sucha masa

¹Wystodki buraczane, obierki ziemniaczane, zużyte ziarna i drożdże piwne, pozostałości chleba i ciastek

²Marchew, pomidory, kapusta i otręby pszenne zmieszane w tych samych proporcjach

Tabela 2

Przepisy paszowe dotyczące wykorzystania owadów [40]

| Kraj | Instytucja | Regulacje prawne | Owady w żywieniu |
|------------------|--|-----------------------|---|
| Unia Europejska | EFSA | Rozporządzenia unijne | Przetworzone białko zwierzęce dozwolone w akwakulturze; dozwolony tłuszcz owadzi w paszach; lista owadów hodowlanych (<i>Hermetia illucens</i> , <i>Musca domestica</i> , <i>Tenebrio molitor</i> , <i>Alphitobius diaperinus</i> , <i>Acheta domestica</i> , <i>Gryllobates sigillatus</i> , <i>Gryllus assimilis</i>) |
| USA | FDA | FFDCA | Larwy <i>Hermetia illucens</i> jako komponent w żywieniu zwierząt |
| Kanada | CFIA | FAFR | Skarmianie surowych materiałów wymaga pozwolenia; produkty pochodzące od <i>Hermetia illucens</i> dozwolone dla drobiu |
| Korea Północna | Ministerstwo Rolnictwa, Żywności i Spraw Wsi | brak | Zabronione |
| Korea Południowa | Ministerstwo Rolnictwa, Żywności i Spraw Wsi | brak | Brak ograniczeń |
| Chiny | brak | brak | Brak ograniczeń |

EFSA – Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności; FDA – Federalna Administracja Żywności i Leków; FFDCA – Federalna ustawa o żywności, lekach i kosmetykach; CFIA – Kanadyjska Agencja Kontroli Żywności; FAFR - Ustawa o żywności i paszach

wyższe, odpowiednio 68% oraz 14,5% [8]. Larwy mogą również posłużyć do przetwarzania odpadów niskiej jakości, na przykład o wysokiej zawartości włókna surowego lub szkodliwych metali ciężkich oraz patogenów. Stosując jako substrat słomę ryżową największą biomasa larw w najkrótszym czasie, uzyskano przy dawce 200 mg/dzień/larwę, jednakże skutkowało on niskim współczynnikiem redukcji substratu (11%). Natomiast, aby zmaksymalizować efektywność redukcji biomasy odpadów, nie powinna to być dawka większa niż 12,5 mg/dzień/larwę, co skutkuje współczynnikiem redukcji substratu na poziomie 31%. Autorzy proponują dawkę 100 mg/dzień/larwę jako optymalną, gdyż jej zwiększanie nie wpływa znacząco na relatywny wskaźnik konsumpcji [28]. Zdaniem Lalander'a i in. (2013) jednym z potencjalnych zastosowań larw *H. illucens* jest redukcja ilości patogennych mikroorganizmów w ludzkim kale, co przyczynia się do poprawy warunków sanitarnych [22]. Stwierdzili oni, że w ciągu 8 dni żerowania larw zredukowały one jego masę o 50% oraz koncentrację bakterii *Salmonella* spp. milionkrotnie w stosunku do niespełna stukrotnej redukcji ich koncentracji w próbie kontrolnej niezawierającej larw. Nie stwierdzono obniżenia ilości pasożytniczego nicienia *Ascaris suum*, jak i bakterii *Enterococcus* spp. Należy jednak podkreślić, iż wiele bakterii z tego rodzaju charakteryzuje się działaniem probiotycznym. Jednocześnie *H. illucens* wydaje się mieć wysoki potencjał jako narzędzie w procesie zagospodarowania odpadów o wysokiej zawartości metali ciężkich [9, 37] oraz mykotoksyn [5, 37], szkodliwych dla większości zwierząt gospodarskich i domowych. Z badania przeprowadzonego przez Diener'a i in. (2015) wynika, że żywienie larw dietą o wysokiej zawartości kadmu, cynku oraz ołowiu nie wpływa znacząco na parametry odchowu (czas rozwoju, masę przedpoczwerek) [9]. Owady akumulują w tkankach kadm, lecz wchłania-

nie cynku oraz ołowiu jest zdecydowanie ograniczone. Co więcej, ilość metali ciężkich w larwach jest mniejsza niż w podawanym im pokarmie. Wskaźnik akumulacji cynku w owadach zmniejsza się wraz ze zwiększaniem jego koncentracji w pokarmie, co wskazuje na aktywną regulację koncentracji tego pierwiastka w organizmie *H. illucens* [9]. Z kolei Purschke i in. (2017) przedstawiają odmienne wyniki, twierdząc, że skażenie pokarmu metalami ciężkimi (arsen, kadm, chrom, rtęć, nikiel, ołów) niekorzystnie wpływa na końcową masę larw oraz współczynnik wykorzystania paszy [37]. Według nich kadm oraz ołów kumulują się w owadach, natomiast poziom pozostałych metali ciężkich w larwach pozostaje niższy niż w zadawanym im substracie. Z kolei w przypadku mykotoksyn takich jak aflatoksyny B1/B2/G2, deoksyniwalenol, ochratoksyna A oraz zearalenon nie odnotowano ich istotnego wpływu na wzrost larw, a także nie zaobserwowano zjawiska akumulacji w tkankach owadzych [37]. Potwierdza to również badanie przeprowadzone przez Camenzuli'ego i in. (2018) dowodząc zdolności larw *H. illucens* do efektywnego metabolizowania tych szkodliwych związków [5]. Kolejnym argumentem dowodzącym przydatności larw *H. illucens* w procesach biokonwersji odpadów organicznych jest możliwość wykorzystania uzyskanego z nich tłuszczu surowego do produkcji biopaliw. Po ekstrakcji tłuszczu surowego z larw utrzymywanych z wykorzystaniem obornika pochodzącego od trzody chlewnej, drobiu lub bydła i przetworzeniu go na biodiesel można otrzymać paliwo charakteryzujące się parametrami podobnymi do produktu pozyskiwanego z nasion rzepaku [23]. Na chwilę obecną w Unii Europejskiej żywienie owadów produktami pochodzenia zwierzęcego jest prawnie zabronione, lecz z powodzeniem można w tym celu wykorzystać roślinne produkty uboczne z przemysłu spożywczego [48, 49] oraz rolnictwa [24, 46].

Przegląd czynników środowiskowych wpływających na odchow i produktywność larw

Na wyniki odchowu larw owadów znacząco wpływają parametry fizyczne i chemiczne środowiska, w którym odchow jest prowadzony. Dla owadów jako zwierząt zmiennocieplnych kluczowym czynnikiem środowiska umożliwiającym przeżycie oraz efektywny wzrost jest temperatura otoczenia. Niezwykle ważna jest również wilgotność względna powietrza oraz zawartość suchej masy w substracie. Należy także zwrócić szczególną uwagę na spektrum oświetlenia będące czynnikiem stymulującym do rozrodu oraz zapewniającym prawidłowy rozwój. Bardzo duże znaczenie w odchowu larw mają także czynniki żywieniowe między innymi rodzaj substratu wykorzystywanego do wzrostu i jego skład chemiczny. Według Tomberlin'a i in. (2009) optymalna temperatura dla prawidłowego wzrostu i rozwoju larw mieści się w przedziale 27-30°C, natomiast górna granica ich przeżywalności to 36°C, w której to temperaturze odsetek larw osiagających dojrzałość spada do 0,1% [45]. Jednocześnie owady potrzebują średnio 4 dni więcej, aby osiągnąć dojrzałość w temperaturze 27°C niż w temperaturze 30°C. Każdy dodatkowy dzień trwania rozwoju larwalnego powoduje wydłużenie życia imago o około jeden dzień. Dolna granica temperaturowa dla skutecznego wzrostu i rozwoju larw mieści się w przedziale od 12 do 19°C [15]. Szczegółowe dane przedstawiające wpływ temperatury na poszczególne fazy cyklu rozwojowego *H. illucens* przedstawiono w tabeli 3. Kolejnym z istotnych czynników środowiskowych wpływających na cykl życiowy *H. illucens* jest wilgotność względna powietrza. Najczęściej stosowany system utrzymywania tych owadów w zamkniętych, ogrzewanych pomieszczeniach prowadzić może do trudności w zapewnieniu optymalnej i stabilnej wilgotności względnej. Niska

wartość tego parametru zwiększa śmiertelność w przypadku wielu gatunków owadów, szczególnie na etapie inkubacji jaj [38]. Jego optymalny poziom dla *H. illucens* wynosi 70%. W takich warunkach inkubacja trwa 80 godzin, a odsetek skutecznie wyklutych jaj wynosi 86%. Przy zachowaniu wilgotności na tym poziomie śmiertelność poczwerek oraz larw nie przekracza 5%, a 93% z nich przeobraża się w postaci dorosłe. Wilgotność względna powietrza ma także wpływ na długość życia osobników dorosłych, która maleje z 8 dni przy wartości wynoszącej 70% do 5 dni przy 25% wilgotności względnej [13]. Niemniej ważnym czynnikiem środowiskowym jest oświetlenie. Jego rodzaj oraz długość cyklu świetlnego wpływają na rozwój i aktywność rozrodczą *H. illucens*. Według Holmesa i in. (2017) stosując różne cykle świetlne o długości 0 oraz 8 i 12 godzin światła przy zachowaniu temperatury 27°C oraz wilgotności względnej na poziomie 70% w każdym przypadku dochodzi do wyklucia się larw, lecz w przypadku 12 godzin oświetlenia wymagało to o 5,77% mniejszej ilości ADH (*Accumulated Degree Hours*; skumulowanych stopniogodzin) niż przy braku oświetlenia i o 4,5% mniejszej niż przy cyklu 8-godzinnym [16]. Ilości ADH potrzebne do przebiegu kompletnego rozwoju owadów od momentu wyklucia się do osiągnięcia dorosłości są 39,34% oraz 37,78% większe przy braku oświetlenia niż odpowiednio dla 8 i 12 godzin światła. Długość cyklu świetlnego ma największy wpływ na owady w stadium przedpoczwarki, a najmniejszy na te w stadium poczwarki. Znaczący jest wpływ światła na śmiertelność larw. Przy braku oświetlenia przeżywa zaledwie 72% larw natomiast przy oświetleniu 8 i 12-godzinnym ponad 95% [16]. Z informacji tych można wywnioskować, że najwłaściwszy dla optymalnego rozwoju *H. illucens* jest cykl 8-12 godzin światła. Oprócz czasu oświetlenia istotna jest również długość emitowanych przez nie fal świetlnych. Zdaniem Zhang'a i in. (2010) rodzaj zastosowanego oświetlenia nie wpływa znacząco na czas inkubacji jaj wynoszący około 4 dni oraz wskaźnik ich wylęgu, a także na czas rozwoju larw i poczwerek [47]. Jednocześnie, w celu rozmnażania *H. illucens* wskazane jest zastosowanie oświetlenia o zakresie długości fal 450-700 nm. Lampa emitująca światło o niższej długości fali nie stymuluje rozmnażania, a zgodnie z Briscoe'm i in. (2001) owady w większości nie widzą światła o długości fali powyżej 700 nm, czyli czerwieni i podczerwieni [4].

Tabela 3

Parametry cyklu rozwojowego *H. illucens* porównane w badaniach przeprowadzonych w różnych temperaturach przy zachowaniu podobnego środowiska i diety [15]

| Temperatura (°C) | Czas rozwoju (dni) | | Ilość osobników przeobrażających się (%) | Czas życia imago (dni) | Źródło |
|------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------|-------------------|
| | Larwalnego | Poczwarki | | | |
| 12 | - | - | - | - | [15] |
| 16 | - | - | - | - | [15] |
| 19 | 60,96 | 11,52 | 31,90 | 25,37 ¹ | [15] |
| 27 | 13,00 | 8,41 | 93,00 | 7,94 | [13] |
| 28 | 10,28 ² | 6,74 | 87,60 | - | [14] ⁴ |
| 28 | 31,67 | 7,16 ³ | 75,56 | - | [33] ⁴ |
| 27 | 20,10 ¹ | 17,80 ¹ | 83,20 ⁵ | 14,00 ¹ | [44] |
| 30 | 18,50 ¹ | 15,50 ¹ | 74,20 ⁵ | 12,40 ¹ | [44] |
| 36 | 25,90 | - | 0,10 | - | [44] |

¹Dane tylko dla osobników żeńskich

²Długość etapu po odkarmieniu

³Wartość obliczona na podstawie odjęcia średniego czasu osiągnięcia stadium poczwarki od średniego czasu rozwinięcia się osobników dorosłych

⁴Karmione paszą pełnoporcjową dla kur (Agribands Purina Canada Canada Inc.) nie z zastosowaniem diety Gainesville [12] jak w pozostałych badaniach

⁵Obejmuje pojawianie się osobników dorosłych w trzech odrębnych powtórzeniach

Wpływ czynników żywieniowych na odchow i produktywność larw

Kluczowe znaczenie w odchowu larw *H. illucens* mają skład chemiczny i forma fizyczna diety. Jednym z najistotniejszych elementów jest pH substratu. W przypadku zastosowania

szlucznie wytworzonych substratów o pH równym 2, 4, 6, 7, 8 oraz 10 najwyższą, zbliżoną do siebie końcową masę osiagają larwy utrzymywane w początkowym pH 6, 7 i 10. Masa larw rozwijających się w substracie kwaśnym (pH 2 i 4) jest o około 23% niższa, podobna zależność zachodzi dla przedpoczwerek [26]. Według wspomnianych autorów czas rozwoju larwalnego trwa najkrócej przy pH równym 8, o 3 dni mniej niż dla pH 6, 7 i 10. Po około 3-4 dniach początkowe pH substratu zostaje sprowadzone do poziomu ok. 5,7 a po 16-17 dniach wzrasta do ok. 8,5. Nie dotyczy to przypadków o niskim początkowym pH 2 lub 4, gdzie do końca pozostaje ono lekko kwaśne, stąd zalecane jest stosowanie substratu o pH 6-8. Również rodzaj zastosowanych odpadów organicznych oraz ich skład znacząco wpływa na parametry produkcyjne larw. Według Jucker'a i in. (2017) larwy żywione dietą złożoną z owoców (jabłka, pomarańcze i gruszki), warzyw (sałaty, fasole i kapusty) oraz dietą mieszaną (owoców i warzyw) różnią się osiąganą końcową masą, zawartością białka ogólnego oraz kwasów omega-6 i omega-3 [19]. Kierończyk i in. (2020) także wykazali wpływ zastosowanego pokarmu na parametry produkcyjne larw oraz profil zawartych w nich kwasów tłuszczowych między innymi wysoki udział kwasu laurynowego [21]. Owady rozwijające się z użyciem diety mieszanej osiagają najniższą masę, lecz zawierają w sobie najwięcej białka ogólnego oraz kwasów omega-6. Z kolei najwyższą zawartością tłuszczu surowego (w większości nasyconych kwasów tłuszczowych) charakteryzują się osobniki odchowane na diecie z owoców. Utrzymywanie ich na diecie warzywnej skutkuje najwyższą zawartością kwasów omega-3 oraz masą. Zastosowana dieta wpływa także na czas trwania rozwoju larwalnego. Trwa on najdłużej, kiedy substratem są owoce (52 dni), a najkrócej przy zastosowaniu diety mieszanej (36 dni). Zastosowany substrat istotnie wpływa na odsetek osobników osiagających dojrzałość. Najwięcej larw przepoczwarcza się do postaci imago przy zastosowaniu diety złożonej z owoców (odsetek ten wynosi 86%), a najmniej dla diety warzywnej (46%). Na diecie mieszanej dorosłość osiaga 59% początkowej liczby owadów. Wybór jednego z powyżej wspomnianych substratów wpływa również na późniejsze wskaźniki rozrodu. Osobniki rozwijające się w substracie mieszanym składają najwięcej jaj o najwyższej masie, natomiast najmniej najlżejszych jaj składają samice odchowywane na diecie warzywnej. Masa wylęgu pochodzącego od owadów na diecie warzywnej jest najmniejsza, a najcięższy jest wylęg pochodzący od samic na diecie złożonej z owoców [19]. Również Mene-

Tabela 4

Wybrane parametry odchovu larw *H. illucens* w zależności od zastosowanego pokarmu [33, 21]

| Dieta | Czas rozwoju larwalnego (dni) | Masa larw (mg/3 larwy) | Długość larw (cm) | Śmiertelność larw (%) |
|------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| Wątroby | 22,5 | 473,1 | 1,95 | 42,78 |
| Obornik | 34 | 339,83 | 1,76 | 25,67 |
| Odpadki kuchenne | 23,8 | 519,65 | 2,08 | 53,33 |
| Odpady rybne | 26,5 | 428,72 | 1,9 | 52,78 |

| Dieta | Wskaźnik redukcji odpadów (%) | Masa larw w 13 dniu (g/100 larw) | Współczynnik konwersji (%) | Wyprodukowane odchody (g) |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Otręby pszenne | 85,39 | 5,12 | 10,17 | 54,07 |
| Marchew | 94,18 | 9,96 | 10,89 | 38,98 |
| Kapusta | 96,86 | 10,13 | 12,5 | 21,04 |
| Pomidory | 82,97 | 8,82 | 10,02 | 114,13 |
| Mieszanina ¹ | 89,15 | 12,88 | 11,76 | 72,71 |

¹Marchew, pomidory, kapusta i otręby pszenne zmieszane w tych samych proporcjach

guz i in. (2018) wykorzystywali warzywa (seler, papryka) i owoce (pomarańcze, jabłka, truskawki, mandarynki, kiwi, gruszki, banany, cytryny) oraz odpady z przemysłu winiarskiego i browarniczego jako substraty pokarmowe dla larw *H. illucens* [30]. Z przeprowadzonego przez nich badania wynika, że mieszanka z dominującym udziałem warzyw (70%) jest efektywniejsza od mieszanki owocowej oraz odpadów z przemysłu winiarskiego. W odchowie larw mogą mieć zastosowanie również odpady pochodzenia zwierzęcego, jednakże pośród owadów żywionych substratem mięsnym występuje bardzo wysoka śmiertelność: 60% w stadium larwalnym oraz 80% w stadium poczwarki [11]. Badano również wpływ na odchów *H. illucens* pokarmów takich jak: wątroba wieprzowa, obornik wieprzowy, odpadki kuchenne oraz odpady rybne (tab. 4). Larwy odchowywane z wykorzystaniem obornika osiagają mniejsze rozmiary, są lżejsze, a ich rozwój trwa dłużej w porównaniu do pozostałych grup, jednakże należy podkreślić, że żywienie owadów karmowych produktami pochodzenia zwierzęcego nie jest dozwolone w Unii Europejskiej. W przypadku zastosowania odpadków kuchennych uzyskuje się największe i najcięższe larwy. Z kolei wszystkie larwy karmione pokarmem rybnym zamierają w stadium poczwarki [33]. Badania te wskazują również na nieefektywność stosowania diety owocowo-warzywnej z powodu niskiej zawartości białka ogólnego i tłuszczu surowego w porównaniu do innych substratów. Zawartość białka ogólnego i tłuszczu surowego w pokarmie dla larw jest tak istotna, ponieważ wpływa na kształtowanie się ciała tłuszczowego powstającego w okresie larwalnym. Uczestniczy ono w przemianach białek, węglowodanów oraz tłuszczu, z których to przemian energia jest w nim magazynowana [1, 36]. Z badania przeprowadzonego przez Pimentel'a i in. (2017) wynika, że dieta w pełni warzywna zawiera zbyt niską ilość białka ogólnego dla efektywnego gromadzenia go w ciele tłuszczowym, lecz jest wskazana, jeśli chce się uzyskać larwy o wysokiej

zawartości tłuszczu surowego [36]. Oonincx i in. (2015) badając wpływ poziomu białka i tłuszczu w diecie na rozwój larw stwierdzili, że najszybszy wzrost i najmniejszą śmiertelność osiąga się przy zastosowaniu diety o wysokiej zawartości białka ogólnego (22%) i tłuszczu surowego (9,5%) [35]. Owady na tej diecie odznaczają się także najwyższym stopniem konwersji paszy (24%) i najniższym współczynnikiem wykorzystania paszy (1,4) na tle pozostałych grup doświadczalnych. Kolejnym z kluczowych dla optymalnego wzrostu larw elementem jest wilgoć zawarta w substracie. W trakcie odchovu owadom nie podaje się dodatkowo wody technologicznej więc całą jej ilość potrzebną do życia i wzrostu czerpią z pokarmu. Z przeprowadzonych przez Chenga i in. (2017) badań, w których podawano larwom pokarm o zawartości wody 70%, 75% oraz 80% przy zachowaniu temperatury otoczenia 36°C wynika, że wilgotność diety nie wpływa znacząco na końcową masę larw oraz ich przeżywalność, lecz wpływa na szybkość ich wzrostu [6]. Im większa zawartość wody w pożywieniu tym larwy szybciej rosną i czas ich odchovu się skraca. Jednakże przy zawartości wody w pokarmie na poziomie 80% lub większej, problemem staje się odseparowanie larw od osadu metodą przesiewania sitami, zaleca się więc, aby zawartość wody w substracie wynosiła 70-75%.

Podsumowanie

Ze względu na szeroką gamę wykorzystywanych pokarmów organicznych oraz wysoki stopień ich konwersji na cenne białko ogólne, oraz tłuszcz surowy larwy *H. illucens* mają duży potencjał jako narzędzie w biodegradacji odpadów i produktów ubocznych pochodzących z różnych gałęzi przemysłu. Jednocześnie nie wymagają one dużej przestrzeni życiowej, co umożliwia stosunkowo wysoką koncentrację produkcji niezbędną do efektywnej redukcji biomasy odpadów.

Praca zrealizowana w ramach projektu: IN-OIL: Innowacyjna metoda biokonwersji produktów ubocznych przemysłu spożywczego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – Program Lider VII, nr umowy: LIDER/5/0148/L-7/15/NCBR/2016.

Literatura: 1. **Arrese E.L., Soulages J.L.**, 2010 – Insect fat body: energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology*, 55(1), 207-225. 2. **Barroso F.G., de Haro C., Sánchez-Muros M.J., Venegas E., Martínez-Sánchez A., Pérez-Bañón C.**, 2014 – The potential of various insect species for use as food for fish. *Aquaculture*, 422-423, 193-201. 3. **Bertinetti C., Samayoa A.C., Hwang S. Y.**, 2019 – Effects of feeding adults of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on longevity, oviposition, and egg hatchability: insights into optimizing egg production. *Journal of Insect Science*, 19(1), 1-7. 4. **Briscoe A.D., Chittka L.**, 2001 – The evolution of colour vision in insects. *Annual Review of Entomology*, (46), 471-510. 5. **Camenzuli L., van Dam R., de Rijk T., Andriessen R., van Schelt J., van der Fels-Klerx H.J.I.**, 2018 – Tolerance and excretion of the mycotoxins aflatoxin B1, zearalenone, deoxynivalenol, and ochratoxin A by *Alphitobius diaperinus* and *Hermetia illucens* from contaminated substrates. *Toxins*, 10(2). 6. **Cheng J.Y.K., Chiu S.L.H., Lo I.M.C.**, 2017 – Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion.

Waste Management, 67, 315-323. 7. **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. 8. **Diener S., Studt Solano N.M., Roa Gutiérrez F., Zurbrügg C., Tockner K.**, 2011 – Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), 357-363. 9. **Diener S., Zurbrügg C., Tockner K.**, 2015 – Bioaccumulation of heavy metals in the black soldier fly, *Hermetia illucens* and effects on its life cycle. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 261-270. 10. **Dossey A.T., Tatum J.T., McGill W.L.**, 2016 – Modern insect-based food industry: current status, insect processing technology, and recommendations moving forward. *W: Insects as Sustainable Food Ingredients*. Academic Press, 113-152. 11. **Gobbi P., Martínez-Sánchez A., Rojo S.**, 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), 461-468. 12. **Hogsette J.A.**, 1992 – New diets for production of house flies and stable flies (Diptera: Muscidae) in the laboratory. *Journal of Economic Entomology*, 85(6), 2291-2294. 13. **Holmes L.A., Vanlaerhoven S.L., Tomberlin J.K.**, 2012 – Relative humidity effects on the life history of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 41(4), 971-978. 14. **Holmes L.A., Vanlaerhoven S.L., Tomberlin J.K.**, 2013 – Substrate effects on pupation and adult emergence of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 42(2), 370-374. 15. **Holmes L.A., Vanlaerhoven S.L., Tomberlin J.K.**, 2016 – Lower temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2(4), 255-262. 16. **Holmes L.A., Vanlaerhoven S.L., Tomberlin J.K.**, 2017 – Photophase duration affects immature black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development. *Environmental Entomology*, 46(6), 1439-1447. 17. **Józefiak D., Józefiak A., Kierończyk 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. 18. **Józefiak A., Nogales-Mérida S., Rawski M., Kierończyk B., Mazurkiewicz, J.**, 2019 – Effects of insect diets on the gastrointestinal tract health and growth performance of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt, 1869). *BMC Veterinary Research*, 15(1), 348. 19. **Jucker C., Erba D., Leonardi M. G., Lupi D., Savoldelli S.**, 2017 – Assessment of vegetable and fruit substrates as potential rearing media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Environmental Entomology*, 46(6), 1415-1423. 20. **Kierończyk B., Rawski M., Pawełczyk P., Różyńska J., Golusik J., Mikołajczak Z., Józefiak D.**, 2018 – Do insects smell attractive to dogs? A comparison of dog reactions to insects and commercial feed aromas – a preliminary study. *Annals of Animal Science*, 18(3), 795-800. 21. **Kierończyk B., Sypniewski J., Rawski M., Czekała W., Świątkiewicz S., Józefiak D.**, 2020 – From waste to sustainable feed material: the effect of *Hermetia illucens* oil on the growth performance, nutrient digestibility, and gastrointestinal tract morphometry of broiler chickens. *Annals of Animal Science*, 20(1), 157-177. 22. **Lalander C., Diener S., Magri M. E., Zurbrügg C., Lindström A., Vinnerås B.**, 2013 – Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) – from a hygiene aspect. *Science of the Total Environment*, 458-460, 312-318. 23. **Li Q., Zheng L., Cai H., Garza E., Yu Z., Zhou S.**, 2011 – From organic waste to biodiesel: black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible. *Fuel*, 90(4), 1545-1548. 24. **Li W., Li Q., Zheng L., Wang Y., Zhang J., Yu Z., Zhang Y.**, 2015 – Bioresource technology potential

biodiesel and biogas production from corncob by anaerobic fermentation and black soldier fly. *Bioresource Technology*, 194, 276-282. **25. Lock E.R., Arsiwalla T., Waagbø R.**, 2016 – Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquaculture Nutrition*, 22(6), 1202-1213. **26. Ma J., Lei Y., Rehman K.U., Yu Z., Zhang J., Li W., Zheng L.**, 2018 – Dynamic effects of initial pH of substrate on biological growth and metamorphosis of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 47(1), 159-165. **27. 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. **28. Manurung R., Supriatna A.**, 2016 – Bioconversion of rice straw waste by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.): optimal feed rate for biomass production. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 89(4), 501-506. **29. Maurer V., Holinger M., Amsler Z., Früh B., Wohlfahrt J., Stamer A., Leiber F.**, 2016 – Replacement of soybean cake by *Hermetia illucens* meal in diets for layers. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2(2), 83-90. **30. Meneguz M., Schiavone A., Gai F., Dama A., Lussiana C., Renna M., Gasco L.**, 2018 – Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5776-5784. **31. Newton L., Burtle G., Tomberlin J.**, 2005a – The black soldier fly *Hermetia illucens*, as a manure management/resource recovery tool. *Proceedings of symposium State of Science, animal manure and waste management*, January 5-7, San Antonio, TX, USA. **32. Newton L., Sheppard C., Watson D., Burtle G., Dove R.**, 2005b – Using the black soldier fly, *Hermetia Illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. Report for Mike Williams director of the Animal and Poultry Waste Management Centre, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. **33. Nguyen T.T.X., Tomberlin J.K., Vanlaerhoven S.**, 2013 – Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development. *Journal of Medical Entomology*, 50(4), 898-906. **34. Nogales-Mérida S., Gobbi P., Józefiak D., Mazurkiewicz J., Dudek K., Rawski M., Józefiak A.**, 2019 – Insect meals in fish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 1080-1103. **35. Oonincx D.G.A.B., Van Broekhoven S., Van Huis A., Van Loon J.J.A.**, 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. **36. Pimentel A.C., Montali A., Bruno D., Tettamanti G.**, 2017 – Metabolic adjustment of the larval fat body in *Hermetia illucens* to dietary conditions. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(4), 1307-1313. **37. Purschke B., Scheibelberger R., Axmann S., Adler A., Jäger H.**, 2017 – Impact of substrate contamination with mycotoxins, heavy metals and pesticides on

the growth performance and composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for use in the feed and food value chain. *Food Additives and Contaminants – Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 34(8), 1410-1420. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1299946>. **38. Schausberger P.**, 1998 – The influence of relative humidity on egg hatch in *Euseius filandicus*, *Typhlodromus pyri* and *Kampimodromus aberrans* (Acari, Phytoseiidae). *Journal of Applied Entomology*, 122(1-5), 497-500. **39. 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): Table 1. *Journal of Medical Entomology*, 39(4), 695-698. **40. Sogari G., Amato M., Biasato I., Chiesa S., Gasco L.**, 2019 – The potential role of insects as feed: a multi-perspective review. *Animals*, 9(4), 1-15. **41. Spranghers T., Ottoboni M., Klootwijk C., Ovin A., Deboosere S., De Meulenaer B., 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. **42. Sypniewski J., Kierończyk B., Benzertiha A., Mikołajczak Z., Pruszyńska-Oszmałek E., Kołodziejki P., Józefiak D.**, 2020 – Replacement of soybean oil by *Hermetia illucens* fat in turkey nutrition: effect on performance, digestibility, microbial community, immune and physiological status and final product quality. *British Poultry Science*, 1-9. **43. Tomberlin J.K., Sheppard D.C.**, 2001 – Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *The Florida Entomologist*, 84(4), 729. **44. Tomberlin J.K., Sheppard D.C., Joyce J.A.**, 2002 – Selected life-history traits of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets. *Entomological Society of America*, 95(3), 379-386. **45. Tomberlin J.K., Adler P.H., Myers H.M.**, 2009 – Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature. *Environmental Entomology*, 38(3), 930-934. **46. Wang H., Rehman K., Liu X., Yang Q., Zheng L., Li W., Li Q.**, 2017 – Biotechnology for biofuels insect biorefinery: a green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein. *Biotechnology for Biofuels*, 10, 1-13. **47. Zhang J., Huang L., He J., Tomberlin J.K., Li J., Lei C., Yu Z.**, 2010 – An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens*. *Journal of Insect Science*, 10(202), 1-7. **48. Zheng L., Hou Y., Li W., Yang S., Li Q., Yu Z.**, 2012a – Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes. *Energy*, 47(1), 225-229. **49. Zheng L., Li Q., Zhang J., Yu Z.**, 2012b – Double the biodiesel yield: Rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production. *Renewable Energy*, 41, 75-79.

The use of *Hermetia illucens* in bioconversion and biodegradation of waste and by-products of the agri-food industry

Summary

At a time of increasing global demand for protein by the food and feed industry, farming of insects such as *Hermetia illucens* is an efficient and promising method of protein acquisition. It is also an environmentally sustainable method of management of waste, mainly from the food industry. The larvae of this insect are highly capable of converting organic matter into valuable protein and fat, which can be successfully used in animal feeding or biofuel production. The bioconversion efficiency and productivity of larvae is influenced by a number of environmental factors, including air temperature and relative humidity, substrate type and pH, and light conditions, as well as nutritional factors: content of crude protein, crude fat, and water in the feed and the presence of mycotoxins and toxic metals.

KEY WORDS: *Hermetia illucens*, bioconversion, degradation of waste, 4R, innovative feed materials