

STANISŁAW KNUTELSKI, EMILIA KNUTELSKA

Uniwersytet Jagielloński, Wydział Biologii, Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Zakład Entomologii, e-mail: s.knutelski@uj.edu.pl

OWADY PRZEKSZTAŁCAJĄCE ODPADY W UŻYTECZNAJĄ BIOMASĘ WSPARCIEM DLA RETARDACJI

*Owady pełnią wiele funkcji ekologicznych niezbędnych do przetrwania ludzkości i mogą przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa żywnościowego oraz czystości środowiska przyrodniczego, a także rozwiązania problemu niedoborów białka. Niektóre z nich jak: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, *Geotrupes stercorarius*, *Hermetia illucens*, czy *Musca domestica*, usuwają i oczyszczają środowisko z nadmiaru odpadów uciążliwych dla człowieka. Stabilizują środowisko przyrodnicze poprzez biodegradację, redukcję, rozprzestrzenianie lub biokonwersję odpadów w użyteczną biomasę (białka i lipidy, chityna, minerały, witaminy), przysparzając tym paszy dla zwierząt oraz żywności dla ludzi. Mogą także stanowić źródło biopaliw, a w szczególności oleju napędowego. Odpady przetwarzane przez nie mogą być cennym źródłem nawozów organicznych wykorzystywanych w produkcji roślinnej, opóźniając tym nadmierną eksploatację środowiska przyrodniczego. Hodowla przemysłowa określonych gatunków owadów może być obiecującą strategią ze względu na źródło energooszczędne, wysokiej jakości białka oraz strategię recyklingu różnych odpadów przekształcanych w biomasę pokarmu dla zwierząt gospodarskich. Przekonanie się do korzyści z hodowli owadów na odpadach może być impulsem dla rozwijania nowej formy działalności gospodarczej, zarówno dla rolników, jak i zakładów paszowych.*

Słowa kluczowe: owady, odpady, biokonwersja, biomasa, białko, żywność, retardacja

I. WSTĘP

Gwałtowny wzrost gospodarki oraz populacji świata i związane z tym zapotrzebowanie na żywność oraz rekreację, spotęgowały presję człowieka na zasoby naturalne środowiska oraz jego różnorodność biologiczną [Lin i in. 2013], co zakłóca zdolność do trwałej regeneracji planety [Rockström i in. 2009]. Szacuje się, że do 2050 r. na świecie będzie około 9 mld ludzi i aby temu sprostać produkcja żywności będzie musiała się podwoić, a globalny popyt na białko wzrośnie o ponad 75% w stosunku do obecnego [Alexandratos i Bruinsma 2012]. Powiększanie obszarów przeznaczonych pod uprawy rolnicze rzadko bywa zrównoważoną opcją, oceany są przełowione, a zmiany klimatu i związane z nimi niedobory wody mogą mieć poważne konsekwencje [FAO 2013]. Produkcja żywności w oparciu o intensywne, nowoczesne rolnictwo przyczynia się także do wzrostu zanieczyszczenia gleb i innych zasobów środowiska. Warto też przytoczyć fakt olbrzymich strat energii i wody podczas produkcji rolnej oraz zachowania konsumpcyjne związane z nadmiernym zużywaniem i marnotrawieniem żywności [Alexander i in. 2017]. Na świecie rocznie marnowane jest prawie 1,3 miliarda ton żywności

[FAO 2011], a tylko 24,8% zebranej biomasy wykorzystuje się do spożycia przez ludzi [Alexander i in. 2017]. Rosnąca populacja wymaga rozwoju systemu żywnościowego, ale istnieje powszechne zaniepokojenie nadmiernym wykorzystywaniem gruntów i wody oraz wpływem produkcji i konsumpcji żywności na wzrost różnorodnych odpadów [De Smet i in. 2018]. W celu uniknięcia luki pokarmowej należy poprawić efektywność niektórych działań i znaleźć alternatywne źródła pozyskiwania białka. Również nadmiar odpadów, zwłaszcza organicznych, wymaga szukania bardziej skutecznych sposobów ich usuwania. Dlatego potrzebne są innowacyjne strategie prowadzące w kierunku zrównoważonego systemu o obiegu zamkniętym, który koncentrowałby się na ponownym wprowadzaniu składników odżywczych, np. przez przekształcanie odpadów w użyteczną biomasę. Duże nadzieje wiąże się tu z owadami, najbardziej różnorodną grupą organizmów współcześnie żyjących na Ziemi, pełniącą wiele ekologicznych funkcji niezbędnych do przetrwania ludzkości [Knutelski 2018].

W powszechnym odbiorze, owady są kojarzone jako szkodniki upraw, lasów i magazynów, a niektóre z nich są uważane za organizmy uciążliwe dla ludzi i zwierząt. W rzeczywistości, sześćcionogi te dają jednak zdecydowanie więcej korzyści, np. jako zapylacze w rozmnażaniu roślin, poprawiacze żyzności gleby poprzez biokonwersję odpadów, czy też jako naturalna kontrola biologiczna szkodliwych gatunków. Zapewniają również cenne produkty dla ludzi, jak miód i jedwab, są też stosowane w lecznictwie. Owady odgrywają wiodącą rolę w biodegradacji odpadów, np. larwy niektórych gatunków chrząszczy, muchówek, a także mrówki, czy termyty, dekomponują martwą materię organiczną, zarówno pochodzenia roślinnego jak i zwierzęcego, przygotowując ją do dalszego rozkładu przez grzyby i bakterie. W ten sposób minerały i składniki odżywcze martwych organizmów stają się w glebie łatwiej dostępne dla roślin. Niezwykłe umiejętności owadów są bezcenne w utylizacji różnego rodzaju szczątków organicznych, poprzez ich usuwanie, redukcję, rozprzestrzenianie lub biokonwersję w środowisku w nowe źródła użyteczności [Di Giacomo i Leury 2019]. Dla przykładu, larwy niektórych gatunków muchówek, czy chrząszczy, potrafią przemieniać odpady, np. warzyw i owoców, resztek ziaren i innych części roślin, a także odchody oraz szczątki zwierzęce w białka (35% do 55%) i lipidy (10% do 40%). Poprzez taką aktywność, nie tylko stają się korzystne dla utylizacji odpadów, ale oczyszczają oraz stabilizują i wspomagają środowisko przyrodnicze. Mogą również przysparzać pasz dla zwierząt gospodarskich oraz żywności dla ludzi, choć polskie społeczeństwo nie jest jeszcze gotowe mentalnie na włączenie do swojej diety żywności wyprodukowanej na bazie owadów [Kostecka i in. 2017].

Sprzyjając biodegradacji i stabilizacji, owady mogą także stanowić źródło biopaliw, a w szczególności oleju napędowego pochodzącego z tłuszczu i/lub białek uzyskiwanych z ich biomasy. Wydaje się, że hodowla przemysłowa określonych gatunków insektów może być obiecującą strategią [Cicaková i in. 2015, Van Huis i in. 2015, Salomone i in. 2017]. Obecnie hodowla owadów na skalę przemysłową jest ściśle związana z usuwaniem odpadów z produkcji żywności, obornika, przemysłu przetwórczego, np. mięsa, nabiału, owoców, warzyw, a nawet styropianu [Bakuła i in. 2016]. Spośród wielu hodowanych obecnie w Unii Europejskiej na skalę przemysłową owadów, siedem gatunków już spełnia warunki bezpieczeństwa dla celów paszowych. Są to: czarna mucha (*Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758)), mucha domowa (*Musca domestica* Linnaeus, 1758), mącznik młynarek (*Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758), pleśniakowiec złocisty (*Alphitobius diaperinus* (Panzer, 1797)), świerszcz domowy (*Acheta domestica* (Linnaeus, 1758)), świerszcz bananowy (*Gryllodes sigillatus* (Walker, F., 1869)) i świerszcz kubański (*Gryllus assimilis* (Fabricius, 1775)). Od 1 lipca 2017 r. przepisy Unii Europejskiej [DUUE 2017] dopuszczają w żywieniu ryb przetworzone białko owadzie i pozwalają na wykorzystanie w akwakulturze pasz pochodzących z tych gatunków, choć wiedza na temat optymalizacji wydajności owadów wykorzystywanych w tym zakresie jest

wciąż niewielka. Wydaje się, że kolejna dekada zapowiada niezwykle interesujące wyzwania dla tego obszaru badań.

Ważnym jest, żeby jak najszerzej informować społeczeństwa o zaletach hodowli owadów na bezpiecznych odpadach i wykorzystywać przetworzoną przez nie biomasę. Działania takie mogłyby prowadzić do zmniejszenia presji przemysłowego systemu uprawy roślin oraz hodowli zwierząt gospodarskich na środowisko i opóźnienia negatywnych transformacji ekosystemów oraz utraty różnorodności biologicznej. Wpisuje się to w koncepcję retardacji przekształcania zasobów przyrodniczych w rozumieniu Kosteckiej [2013], a owady hodowane na skalę przemysłową mogą spełniać dla niej jedną z kluczowych ról.

W artykule zaprezentowano obiecujące możliwości zastosowania niektórych gatunków owadów dla retardacji niekorzystnych zmian środowiska i wykorzystania efektów z ich hodowli przemysłowej jako alternatywnego źródła białka w żywieniu zwierząt, a być może także ludzi, na szerszą skalę niż obecnie. Ogólnospołeczne zainteresowanie tym zagadnieniem wydaje się konieczne ze względu na ogrom korzyści, zarówno dla środowiska przyrodniczego, jak i samych ludzi, jakie daje utylizacja odpadów przez owady.

II. MATERIAŁ I METODY

W oparciu o dostępne źródła literatury naukowej, specjalistyczne portale internetowe, a także własne obserwacje i badania, przedstawiono przykłady zastosowania owadów w zagospodarowaniu odpadów oraz perspektywy ich hodowli na odpadach w przyszłości.

III. OWADY OCZYSZCZAJĄCE ŚRODOWISKO Z ODPADÓW - PRZYKŁADY

Coleoptera (chrząszcze)

Mącznik młynarek, *Tenebrio molitor*, z rodziny czarnuchowatych (Tenebrionidae) jest jednym z hodowanych na skalę przemysłową gatunków chrząszczy, m.in. w celu oczyszczania środowiska z odpadów. Jest bardzo wytrzymały na niekorzystne warunki środowiskowe, a jego hodowla jest względnie łatwa i tania. Poza hodowlami, najczęściej spotykany jest np. w źle utrzymanych magazynach zboża lub pod korą drzew oraz w gniazdach ptaków. Chrząszcz ten pożera rozmaite produkty przechowywane oraz dystrybuowane na całym świecie [Wang i in. 2017]. Żywi się zwykle przetworami zbożowymi, np.: mąką, otrębami i sucharami, ale jest w stanie pożreć także drewno oraz inne materiały pochodzenia roślinnego. Jego larwy typu drutowiec, osiągają około 30 mm długości, zawierają w swoim ciele 23-47% tłuszczu i są „czyszcicielami” zmielonych i gnijących zbóż oraz ziaren przechowywanych nieraz w wilgotnych i złych warunkach. Hodowane na odpadach o niskiej wartości odżywczej drutowce są w stanie przekształcić je w materiał wysokobiałkowy, dzięki czemu *T. molitor* stanowi obiecujące źródło alternatywnego białka, w szczególności jako zamiennik śrutu sojowej w paszy dla drobiu. Podobne wyniki uzyskano również w próbach z *Anabrus simplex* Haldeman 1852, *Acheta domestica* (Orthoptera), *Bombyx mori* (Linnaeus, 1758), *Alphitobius diaperinus* i *Tribolium castaneum* (Coleoptera) oraz termitami (Isoptera). Czasem larwy mącznika młynarka bywają nazywane super pokarmem (ang. *superfood*), gdyż w swoim ciele zawierają bardzo dużo białka oraz aminokwasów. Stąd są często hodowane jako pokarm dla wielu gatunków jaszczurek, brojlerów oraz drapieżnych bezkręgowców, są także wykorzystywane przez wędkarzy jako przynęta. Drutowce *T. molitor* mogą być również spożywane przez ludzi, co w przyszłości może pomóc w rozwiązaniu problemu niedostatku żywności w niektórych rejonach świata [FAO 2013].

Bardzo opłacalnym i przyjaznym dla środowiska podejściem jest wykorzystanie mącznika młynarka oraz innych owadów do skutecznego rozkładania substancji organicznych, np. resztek

pożniwnych i przekształcania ich w biomasa larwalną oraz proste materiały organiczne. Jest to koncepcja zwana biotransformacją [Wang i in. 2017]. Różne resztki roślinne, np.: kukurydza, pszenica i słoma ryżowa, składają się głównie z lignocelulozy, którą można by wykorzystać do produkcji biopaliw. Jednakże produkcja etanolu celulozowego jest obecnie nieekonomiczna i nieprzyjazna dla środowiska. W związku z tym istnieje pilna potrzeba szukania innych źródeł i technologii do produkcji biopaliw oraz wykorzystania marnotrawionej lignocelulozy, a jednym z kandydatów najlepiej nadających się do tego rodzaju biotransformacji jest właśnie *T. molitor*. Taka biorafineria na początku obejmuje degradację rusztu kukurydzianego przez mącznika młynarka, a w następnym etapie wykorzystuje się larwy czarnej muchy (*Hermetia illucens*) w celu dalszego rozkładu pozostałości powstałych podczas pierwszego etapu [Wang i in. 2017]. Okazuje się, że larwy *T. molitor* potrafią w pewnych warunkach pożerać nawet styropian [Bakuła i in. 2016, Peng i in. 2019]. To odkrycie jest o tyle cenne, że pianka styropianowa, najpopularniejszy materiał izolacyjny stosowany od wielu lat w budownictwie i opakowaniach, była uważana za trwałą i odporną na biodegradację. Tymczasem, badania wykazały, że Tenebrionidae można z powodzeniem stosować na skalę przemysłową do recyklingu produktów z polistyrenu. Wiadomo już także, że to nie same larwy mącznika są w stanie trawić polistyren, ale proces ten zachodzi dzięki symbiotycznym bakteriom żyjącym w przewodzie pokarmowym tego gatunku chrząszcza [Peng i in. 2019]. Jeśli dalsze badania pozwolą na lepsze poznanie tych mikroorganizmów i ich relacji z mącznikiem, to istnieje szansa, że w niedalekiej przyszłości uda się je wykorzystać na skalę przemysłową do biodegradacji także innych tworzyw sztucznych. Również w Polsce trwają intensywne badania nad wykorzystaniem owadów do usuwania polistyrenu [PAP 2017].

Innym przedstawicielem rodziny czarnuchowatych, o podobnych możliwościach w usuwaniu odpadów organicznych, jest wspomniany już wcześniej pleśniakowiec złocisty, *Alphitobius diaperinus*. Jest to gatunek kosmopolityczny, a zarazem synantropijny, często spotykany w różnych systemach hodowli zwierząt, najczęściej w fermach drobiu, w których odnajduje bardzo dobre warunki do rozwoju, dzięki wysokiej temperaturze, stałemu dostępowi do pokarmu oraz wielu zakamarkom do schronienia się. W krajowej faunie *A. diaperinus* jest gatunkiem obcym i znanym stosunkowo od niedawna. Pochodzi z obszarów tropikalnych, gdzie żyje na sawannach, chroniąc się w glebie, pod korzeniami lub korą drzew, w ściółce leśnej, w martwych pniach palm, gnijących drzewach, czy w innych butwiejących resztkach roślinnych, oraz w gniazdach ptaków. Z Afryki Zachodniej został do regionów umiarkowanych wprowadzony przez systemy produkcji zwierzęcej wraz z paszą zanieczyszczoną tym owadem. W Europie pojawił się w latach 60. i od tego czasu jest najczęściej spotykanym chrząszczem w podściółce oraz oborniku w kurnikach i chlewniach. W Polsce jest jeszcze względnie słabo poznany, choć coraz bardziej się rozprzestrzenia [Iwan i in. 2012]. Występuje głównie w magazynach, spichrzach, młynach oraz zabudowaniach, ale tylko na wilgotnych, przegrzybiałych i zapleśniałych towarach oraz produktach pochodzenia roślinnego, zwłaszcza w zbożu i jego przetworach. Poza magazynami, młynami i siedzibami ludzkimi, w warunkach naturalnych jest rzadko spotykany, zwykle pod odstającą korą drzew [Iwan i in. 2012]. Pleśniakowiec złocisty żywi się zwykle wszelkimi resztkami organicznymi pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, ale zjada i zanieczyszcza także pasze. W przypadku braku odpowiedniego pokarmu, jego larwy i osobniki dorosłe, poszukując pożywienia, mogą wnikać nawet w materiał izolacyjny, powodując jego uszkodzenia. Historia życia *A. diaperinus* oraz sposób jego hodowli w warunkach laboratoryjnych jest dobrze udokumentowana [Axtell i Arends 1990]. Pomimo wykazanych wyżej negatywnych skutków aktywności, gatunek ten ma pozytywny potencjał dla funkcjonowania w zrównoważonej gospodarce odpadami organicznymi oraz dla wtórnego wykorzystania w produkcji pasz i żywności.

Innym, ale rodzimym chrząszczem, którego można by w przyszłości wykorzystać do usuwania odpadów, jest żuk leśny *Anoplotrupes stercorosus* (Scriba, 1791) z rodziny żukowatych (Geotrupidae). Gatunek ten zasiedla głównie obszary leśne, chociaż spotykany jest także w aglomeracjach miejskich, w parkach, ogrodach, prawie wszędzie tam, gdzie występuje roślinność. Pożera głównie odchody zwierząt (koprofag), choć zjada również butwiejące liście i stare grzyby (detrytusozerca), przyczyniając się do oczyszczania środowiska z różnych resztek organicznych, zwłaszcza odchodów zwierzęcych. Warto więc zwracać uwagę, by podczas spacerów na obszarach zadrzewionych nie deptać tych chrząszczy. Jeśli odchody zwierzęce pozostają na powierzchni gleby, około 80% azotu dostaje się do atmosfery, natomiast obecność tych chrząszczy oznacza, że węgiel i minerały są wprowadzane do gleby, gdzie dalej są rozkładane do substancji przyswajanych przez rośliny. Dlatego w kontekście zrównoważonej gospodarki odpadami warto lepiej zbadać możliwości tego gatunku.

Diptera (muchówki)

Kolejnym owadem o obiecującym zastosowaniu w gospodarce odpadami jest wspomniana wcześniej czarna mucha, *Hermetia illucens* z rodziny lwinkowatych lub zmrózkowatych (Stratiomyidae). W światowych hodowlach znana najczęściej pod nazwami BSF lub BSFL (ang. *black soldier fly*). Gatunek ten pochodzi z krainy neotropikalnej, ale w ostatnich dziesięcioleciach rozprzestrzenił się na wszystkie kontynenty, stając się praktycznie kosmopolitycznym. Jego dyspersję przyspieszył głównie handel. Owad ten jest hodowany na skalę przemysłową przez wiele firm w różnych rejonach świata jako alternatywne źródło białka i tłuszczu do celów paszowych oraz jako surowiec dla przemysłu chemicznego, a także w procesie remediacji biomasy, gdyż wykazuje szczególną zdolność do wzrostu na różnych źródłach biomasy o niskiej jakości, np. na odpadach pochodzenia zwierzęcego i roślinnego [Li i in. 2015]. Larwy (typu czerwie) *H. illucens* intensywnie żerują np. na zgniłych owocach, warzywach, czy kukurydzy oraz innych produktach spożywczych, a także na oborniku i padlinie [Roháček i Hora 2013]. Przekształcają te odpady w masę składającą się głównie z białka, tłuszczu i chityny. Ponadto, czerwie te cechują się wysokim poziomem wapnia i są jedynymi owadami stosowanymi dotąd w żywieniu zwierząt, które wykazują korzystny stosunek wapnia do fosforu. Produkty powstające w wyniku ich żerowania mogą być wykorzystywane również jako surowiec w przemyśle chemicznym [Weiner i in. 2018], a chityna jest przetwarzana w chitozan o szerokim zastosowaniu; od oczyszczania ścieków po wytwarzanie powłok bioaktywnych [De Smet i in. 2018].

Karmione obornikiem zwierzęcym, słomą ryżową, odpadami restauracyjnymi, czy kolbami kukurydzy, czerwie *H. illucens* zawierają 20-40% tłuszczu [Oonincx i in. 2015]. Głównie są to duże ilości nasyconych kwasów tłuszczowych o pożądanym właściwościach fizycznych i chemicznych, takich jak: lepkość kinematyczna, wartość opałowa, stabilność oksydacyjna, które sprzyjają dalszej przemianie w biodiesel. Spośród testowanych odpadów organicznych, obornik drobiowy okazał się najlepszy, zarówno pod względem maksymalnego wzrostu BSF, jak i do produkcji surowego tłuszczu po ekstrakcji eteru naftowego, co można wykorzystać do produkcji biodiesla [Li i in. 2011]. Przy tym właściwości paliwowe biodiesla uzyskanego z larw *H. illucens* są porównywalne do biodiesla pozyskiwanego na bazie oleju rzepakowego i spełniają europejską normę (EN14214) [Wang i in. 2017]. Ponadto, w porównaniu z biodieslem na bazie oleju roślinnego, ten na bazie tłuszczu BSFL ma co najmniej dwie zalety: 1) nie konkuruje z zasobami żywności ani użytkowaniem gruntów, 2) maksymalizuje korzyści z gospodarki odpadami poprzez zastosowanie odchodów do wzrostu owadów. Powstałą odtłuszczoną biomasa larwalną można również wykorzystać jako źródło białka dla drobiu, akwakultury i zwierząt gospodarskich. Przekształcanie biomasy

w produkty handlowe, paliwa i chemikalia poprzez biorafinację jest podobne do tradycyjnych rafinerii. Główną różnicą są surowce [Wang i in. 2017].

Larwy *H. illucens* można również wykorzystać do recyklingu substratów zanieczyszczonych mikotoksyną oraz metalami ciężkimi. Skutecznie zmniejszają one suchą masę liści kukurydzy zanieczyszczonych metalami ciężkimi, którymi były karmione, średnio o 49% po 36 dniach, zarówno w przypadku Cd, jak i Zn. Daje to lepszy efekt niż standardowa metoda obróbki wstępnej biomasy zanieczyszczonej po fitoekstrakcji (przez kompostowanie). W ciele poczwerek (*puparium*) *H. illucens* gromadzi się głównie kadm, a w ciele dorosłych (*imagines*) - cynk. Wysoka zawartość Cd w *puparium* stwarza możliwość odzyskiwania tego metalu, co sugeruje możliwość wykorzystania larw BSF jako nowej metody gospodarowania zanieczyszczoną biomasą i odzyskiwania z niej metali [De Smet i in. 2018].

Okazuje się, że *H. illucens* może wpływać również na detoksykację substratów. Różne ksenobiotyki, takie jak antybiotyki lub pestycydy, są złożonymi cząsteczkami i mogą powodować problemy w środowisku przez swoją wysoką stabilność. Tymczasem, larwy BSF mogą nie tylko rosnąć w podłożach zanieczyszczonych tymi cząsteczkami, ale ich aktywność enzymatyczna powoduje istotne skrócenie okresu połowicznego rozkładu leków i pestycydów; np. dla trimetoprimu wynosi on 1,1 dnia, zamiast 25 dni [Lalander i in. 2016]. Stąd, *H. illucens* może odgrywać znaczącą rolę, nie tylko w recyklingu odpadów, ale także w ich bioremediacji, w celu uzyskaniu bezpieczniejszego materiału do kompostowania. Degradacja złożonych allelochemikaliów roślinnych i ksenobiotycznych środków owadobójczych przez czerwie jest możliwa dzięki symbiotycznym mikroorganizmom żyjącym w ciele BSFL [Van den Bosch i Welte 2017]. Interesującym byłoby poznanie metagenomu mikrobioty *H. illucens* w celu zidentyfikowania mechanizmów degradacji ksenobiotyków i wykorzystania wytwarzanych przez nią enzymów w bioremediacji.

Do usuwania odpadów, w szczególności do przetwarzania obornika, wykorzystuje się także inne muchówki, np.: ścierwice (*Sarcophaga* sp.) z rodziny ścierwicowatych (Sarcophagidae), muchę oborową (*Musca autumnalis* De Geer, 1776) oraz muchę domową (*Musca domestica* L.) z rodziny muchowatych (Muscidae), z którą wiąże się szczególnie duże nadzieje w pozyskiwaniu zamiennika śrutu sojowej w dietach drobiowych. Mucha domowa jest typowym gatunkiem synantropijnym, a obecnie także kosmopolitycznym. Pierwotnie występowała w strefie klimatu umiarkowanego, ale została zawleczona również na obszary tropikalne. Głównym pożywieniem *M. domestica* jest obornik świński. Ze składanych na nim jaj rozwijają się czerwie, które przekształcają 50-60% masy kałowej świń w biomasę larwalną, wiążąc w niej do 55% węgla organicznego [Chiou i Chen 1982]. Larwy te potrafią także żerować na oborniku drobiowym, przemieniając go w swoim ciele na 42% białka, w tym egzogenne aminokwasy oraz 35% tłuszczu [Sheppard i in. 1994, Hussein i in. 2017].

IV. PERSPEKTYWY HODOWLI OWADÓW NA ODPADACH

Owady same w sobie posiadają wysoką wartość odżywczą i potrafią, przy niskiej emisji gazów cieplarnianych oraz niewielkim zapotrzebowaniu na przestrzeń, przekształcać z wysoką wydajnością pokłady rozmaitych odpadów organicznych w surowce pokarmowe dla zwierząt gospodarskich i akwakultury, zastępując coraz droższe składniki białkowe mieszanek paszowych opartych na uprawach roślin [Van Huis 2013]. Tego rodzaju produkcję biomasy owadów można łączyć również z biodegradacją, kompostowaniem oraz odkażaniem. Także emisje amoniaku związane z hodowlą owadów są znacznie niższe niż te w tradycyjnych hodowlach gospodarskich, np. świń. Ponadto hodowla insektów nie wymaga tak dużych ilości wody oraz ciągłego powiększania arealu w celu zwiększenia produkcji, jak np. hodowla bydła [FAO 2013]. Dla przykładu, świerszcze (Grylloidea) potrzebują 12 razy mniej pokarmu niż

bydło, 4 razy mniej niż owce i połowę mniej niż świnie, czy brojlery, wytwarzając przy tym taką samą ilość białka.

Hodowle owadów w celu wykorzystywania ich jako bezpośredniej karmy lub do produkcji pasz dla zwierząt gospodarskich można zakładać na niewielkich przestrzeniach, np. przy przydomowych hodowlach drobiu, jak również w masowej skali przemysłowej. Hodowle przemysłową można łączyć z zagospodarowaniem różnego rodzaju odpadów, powstających na wszystkich etapach produkcji żywności, zarówno w przemyśle zbożowym, owocowo-warzywnym, mięsnym, mleczarskim, rybnym, itp. [FAO 2011, 2013]. Żywe lub martwe owady, spożywane w całości lub przetworzone na granulaty i pasty już częściowo utworzyły rynki niszowe służąc głównie jako karma dla zwierząt domowych i ogrodów zoologicznych. Możliwa jest również ekstrakcja z owadów: białek, tłuszczów, chityny, minerałów i witamin. W epoce antropocenu warto więc podjąć działania mające na celu wykorzystanie ogromnego potencjału oferowanego przez owady w zakresie poprawy bezpieczeństwa sanitarnego i żywnościowego.

V. HODOWLE OWADÓW SZANSĄ DLA ROZWOJU GOSPODARCZEGO POLSKI

Dotychczasowe badania wskazują, że skład aminokwasowy białka owadów jest najbardziej zbliżony do białka soi i białka rybiego [Dobermann i in. 2017]. Polska importuje rocznie około 2 mln ton śruty sojowej genetycznie modyfikowanej (GMO) z przeznaczeniem na pasze. Wejście w życie zakazu wytwarzania i stosowania pasz GMO w żywieniu zwierząt okazało się więc poważnym problemem, gdyż obejmuje to wszystkie tradycyjnie hodowane zwierzęta, bez względu na wielkość gospodarstwa. To wymusza wypracowanie nowej strategii zastępowania białka genetycznie modyfikowanego białkiem bez GMO pochodzenia krajowego. Dodatkowo takie działania implikuje także zakaz stosowania mączki mięsno-kostnej w żywieniu zwierząt. Opracowanie strategii rozwoju produkcji wartościowego białka owadziego przez ich hodowle przemysłowe i upowszechnienie w żywieniu zwierząt, jako alternatywy dla importowanej soi GMO jest logiczne i konieczne. Sprzyja temu dopuszczenie już od 1 lipca 2017 r. przetworzonego białka owadziego w żywieniu ryb, a kolejnym zadaniem UE jest analiza ryzyka zastosowania białka owadziego w żywieniu innych zwierząt gospodarskich. Wydaje się to być dodatkowym impulsem do rozwijania nowej formy działalności gospodarczej, zarówno dla rolników, jak i zakładów paszowych. Może to się przyczynić do przekwalifikowania niektórych rolników, np. z hodowli trzody na hodowlę owadów, która mogłaby być mało zaawansowana technologicznie lub bardzo wyrafinowana, w zależności od poziomu inwestycji i potrzeb. Może to też stanowić impuls do rozwoju przedsiębiorczości i powstawania nowych miejsc pracy, a także zwiększania produkcji taniej żywności i pasz. Hodowle owadów przeznaczonych na cele paszowe na odpadach organicznych mogą stanowić również alternatywę dla tradycyjnej produkcji przemysłu spożywczego i pomóc w rozwoju niektórych rejonów Polski, np. tych w których występuje afrykański pomór świń. Niewielka hodowla owadów jest nisko-technologiczną i nisko-kapitałową opcją inwestycyjną i daje możliwości utrzymania nawet najsłabszym grupom społecznym, zarówno w miastach, jak i na wsi.

VI. PODSUMOWANIE

Prezentowane w opracowaniu przykłady hodowli gatunków z rzędu muchówek (Diptera) i chrząszczy (Coleoptera) na odpadach organicznych, mają mniejszy wpływ na środowisko niż bardziej tradycyjne formy produkcji białka zwierzęcego. Owady przekształcające różnorakie odpady organiczne w nowe źródła użyteczności, ze względu na mniej energochłonne wymagania w tworzeniu alternatywnego pokarmu o wysokiej zawartości białka oraz kluczowych mikroelementów dla zwierząt i ludzi, stanowią znakomite wsparcie dla retardacji nadmiernej eksploatacji środowiska przyrodniczego.

Poprawiają także bezpieczeństwo sanitarne środowiska, oczyszczając go, stabilizując i wspomagając. Opóźniają tym samym antropogeniczne przekształcania zasobów przyrodniczych.

Bardzo dziękujemy Pani prof. dr hab. Joannie Kosteckiej, Redaktor czasopisma "Polish Journal Sustainable Development" oraz anonimowym Recenzentom, za konstruktywne uwagi, które przyczyniły się do poprawy jakości tego artykułu.

BIBLIOGRAFIA

1. Alexander P., Brown C., Arneith A., Finnigan J., Moran D., Rounsevell M.D.A. 2017. Losses, inefficiencies and waste in the global food system. *Agric. Syst.* 153. 190-200.
2. Alexandratos N., Bruinsma J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA working paper no. 12-03. FAO, Rome, Italy.
3. Axtell R.C., Arends J.J. 1990. Ecology and management of arthropod pests of poultry. *Ann. Rev. Entomol.* 35. 101-126.
4. Bakula T., Obremski K., Gałęcki R. 2016. Tenebrionidae can eat polystyrene. International Symposium on Insects as Feed. Food and Non-Food. September 12, 2016. Magdeburg. poster.
5. Chiou Y.Y., Chen W.J. 1982. Production of maggot protein produced from swine manure. *K'o Hsueh Fa Chan Yueh K'an.* 10. 667-682.
6. Cicaková H., Newton G.L., Lacy R.C., Kozánek M. 2015. The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Manag.* 35. 68-80.
7. De Smet J., Wynants E., Cos P., Van Campenhout L. 2018. Microbial community dynamics during rearing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) and impact on exploitation potential. *Appl. Environ. Microbiol.* 84 (9). e02722-17.
8. Di Giacomo K., Leury B.J. 2019. Review: Insect meal: a future source of protein feed for pigs? *Animal.* 13(12). 3022-3030.
9. Dobermann D., Swift J.A. and Field L.M. 2017. Opportunities and hurdles of edible insects for food and feed. *Nutrition Bulletin.* 42. 293-308.
10. DUUE (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej). 2017. Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/893 z dnia 24 maja 2017 r. zmieniające załączniki I i IV do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 999/2001 oraz załączniki X, XIV i XV do rozporządzenia Komisji (UE) nr 142/2011 w odniesieniu do przepisów dotyczących przetworzonego białka zwierzęcego [dok. elektr. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL>, dostęp 7.04. 2020].
11. FAO 2011. Global food losses and food waste – extent, causes and prevention. FAO. Rome.
12. FAO 2013. Edible insects – future prospects for food and feed security. FAO. Rome.
13. Hussein M., Pillai V.V., Goddard J.M., Park H.G., Kothapalli K.S., Ross D.A., Ketterings Q.M., Brenna J.T., Milstein M.B., Marquis H., Johnson P.A., Nyrop J.P., Selvaraj V. 2017. Sustainable production of house fly (*Musca domestica*) larvae as a protein rich feed ingredient by utilizing cattle manure. *PLoS ONE* 12(2). e0171708. DOI:10.1371/journal.pone.0171708
14. Iwan D., Kubisz D., Tykarski P. 2012. Coleoptera Poloniae: Tenebrionoidea (Tenebrionidae, Boridae). Critical checklist, distribution in Poland and meta-analysis. University of Warsaw – Faculty of Biology. Natura optima dux Foundation. Warszawa. 480 ss.
15. Knutelski S. 2018. Różnorodność biotyczna dobrostanem ludzkości. *Polish Journal for Sustainable Development.* 22(1). DOI: 10.15584/pjdsd.2018.22.1.4
16. Kostecka J. 2013. Retardacja tempa życia i przekształcania zasobów przyrody – wybrane implikacje obywatelskie. *Inżynieria Ekologiczna.* 34. 38-52.

17. Kostecka J., Konieczna K., Cunha L.M. 2017. Evaluation of insect-based food acceptance by representatives of Polish consumers in the context of natural resources processing retardation. *Journal of Ecological Engineering*. 18 (2). 166-174. DOI: 10.12911/22998993/68301.
18. Lalander C., Senecal J., Gros C., Ahrens L., Josefsson S., Wiberg K., Vinnerås B. 2016. Fate of pharmaceuticals and pesticides in fly larvae composting. *Sci. Total Environ*. 565. 279-286.
19. 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. 1545-1548.
20. Li W., Li Q., Zheng L., Wang Y., Zhang J., Yu Z. 2015. Potential biodiesel and biogas production from corncob by anaerobic fermentation and black soldier fly. *Bioresour. Technol*. 194. 276-82.
21. Lin C.S.K., Pfaltzgraff L., Herrero-Davila L., Mubofu E., Abderrahim S., Clark J., Koutinas A., Kopsahelis N., Stamatelatos K., Dickson F., Thankappan S., Mohamed Z., Brocklesby R., Luque R. 2013. Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy Environ Sci*. 6. 426-464.
22. Oonincx D., van Huis A., van Loon J.J.A. 2015. Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure. *J. Insects Food Feed*. 1. 131-139.
23. PAP (Polska Agencja Prasowa). 2017. Larwy zeżrą zużyty styropian? Nauka w Polsce. [dok. elektr.: <http://naukawpolsce.pap.pl>. data publikacji: 24.03.2017].
24. Peng B., Su Y., Chen Z., Chen J., Zhou X., Benbow M., Criddle C., Wu W-M., Zhang Y. 2019. Biodegradation of Polystyrene by Dark (*Tenebrio obscurus*) and Yellow (*Tenebrio molitor*) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environ. Sci. Technol*. 53. 5256-5265.
25. Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S. III, Lambin E.F., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J.A. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*. 461. 472-475.
26. Roháček J., Hora M. 2013. A northernmost European record of the alien black soldier fly *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Stratiomyidae). *Čas. Slez. Muz. Opava (A)*. 62. 101-106. DOI: 10.2478/cszma-2013-0011 (ang.)
27. Salomone R., Saija G., Mondello G., Giannetto A., Fasulo S., Savastano D. 2017. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens*. *J. Clean Prod*. 140. 890-905.
28. Sheppard, D.C., G.L. Newton, S.A. Thompson and Savage S. 1994. A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Tech*. 50. 275-279.
29. Van den Bosch T.J.M., Welte C.U. 2017. Detoxifying symbionts in agriculturally important pest insects. *Microb. Biotechnol*. 10. 531-540.
30. Van Huis A. 2013. Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. *Annu. Rev. Entomol*. 58. 563-83.
31. Van Huis A., Dicke M., van Loon J.J.A. 2015. Insects to feed the world. *Journal of Insects as Food and Feed*. 1(1). 3-5.
32. Wang H., ur Rehman K., Liu X., Yang Q., Zheng L., Li W., Cai M., Li Q., Zhang J., Yu Z. 2017. Insect biorefinery: a green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein. *Biotechnol. Biofuels*. 10. 304. DOI.org/10.1186/s13068-017-0986-7.
33. Weiner A., Paprocka I., Kwiatek K. 2018. Wybrane gatunki owadów jako źródło składników odżywczych w paszach. *Życie Weterynaryjne*. 93(7). 499-504.

INSECTS TRANSFORMING WASTES FOR USEFUL BIOMASS AS THE SUPPORT FOR RETARDATION

Summary

Examples of rearing species from the order of the flies (Diptera) and beetles (Coleoptera) on organic waste are promoted. Scientific studies indicates that under appropriate conditions these insects have less environmental impact than more traditional Western forms of animal protein production. Insects transforming various wastes into new sources of utility provide excellent support for retardation, due to the alternative and balanced source of high protein content and key micronutrients for animals and humans. They also improve the sanitary safety of the environment, cleaning it, stabilizing and supporting it. In general, insects can make valuable economic and invigorating contributions to the development of food or feed production systems and provide an alternative to vegetable protein derived from imported soybeans and to the traditional production of the current food industry and help the economic and social development of some regions of the world, including Poland.

Keywords: insects, waste, bioconversion, biomass, protein, food, retardation