

Wychów karpiowatych ryb reofilnych – żywienie w niskoemisyjnej akwakulturze zachowawczej

Jan Mazurkiewicz^{1,2}, Marcin Wiśniewski³, Mateusz Rawski^{1,2},
Krzysztof Florczyk^{1,2}, Jan Banaszak¹, Paula Skrzypczak²

¹Zakład Doświadczalny Technologii Produkcji Pasz i Akwakultury w Muchocinie,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

²Pracownia Rybactwa Śródlądowego i Akwakultury, Katedra Zoologii,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

³Polski Związek Wędkarski Okręg w Poznaniu

Wstęp

Karpiokształtne ryby reofilne będące obiektami przeprowadzonych badań: kleń (*Squalius cephalus*), certa (*Vimba vimba*) oraz brzana (*Barbus barbus*) są gatunkami, których naturalne populacje wymagają stałego monitoringu oraz podejmowania działań wspomagających. Jest to konsekwencją presji antropogenicznej, m.in. zmian w funkcjonowaniu cieków, ich zanieczyszczenia, przetłoczenia czy wprowadzenia gatunków obcych oraz inwazyjnych (Kujawa i Glińska-Lewczuk 2011). Pomimo iż karpiokształtne ryby reofilne nie zostały w pełni wykorzystane jako ryby hodowlane należy je uznać za bardzo cenne pod kątem ekologicznym i wędkarskim, których obecność i ochrona przekłada się na zwiększenie zachowania bioróżnorodności całych ekosystemów (Śliwiński i in. 2016). Konieczne jest więc opracowanie i wprowadzenie rozwiązań zmniejszających negatywne oddziaływanie na środowisko, a równocześnie wspomagających stabilizację i odbudowę dzikich populacji ryb reofilnych. W tym aspekcie kluczowe jest prowadzenie prac badawczych nad użyciem innowacyjnych rozwiązań żywieniowych, w tym diet opartych na najnowszej wiedzy technicznej i naukowej oraz transfer wiedzy do praktyki hodowlanej. Dla uzyskania zrównoważonego rozwoju akwa-

kultury istotna jest nie tylko optymalizacja procesu produkcji ryb typowo konsumpcyjnych, ale również zwiększenie innowacyjności programów mających na celu zrównoważone gospodarowanie zasobami w sektorze akwakultury zachowawczej, która jest narzędziem wspomagającym odbudowę i stabilizację populacji ryb dziko żyjących (Zakęś i Rożyński 2021).

W przypadku karpiokształtnych ryb reofilnych biotechnologia hodowli, reprodukcji oraz większości aspektów podchowu stadiów młodocianych jest dobrze opisana, była lub jest obecnie przedmiotem projektów badawczo-rozwojowych (Kucharczyk i in. 2008, Kupren i in. 2008, Kamiński i in. 2010, Homska i in. 2022). Niemniej jednak nie opracowano dotychczas praktycznych diet dla tych gatunków oraz wytycznych dotyczących ich żywienia w akwakulturze zachowawczej. Brak optymalnej diety skutkuje dużą zmiennością jakości produkowanych w ten sposób młodych osobników, a tym samym zmniejsza szansę adaptacyjne i przystosowanie się gatunku do środowiska. Wiadomo, że jedynie niewielka część ryb wprowadzana do ekosystemów naturalnych poprzez zarybianie osiąga dojrzałość i przystępuje do reprodukcji. Utrzymanie różnorodności biologicznej oraz zachowanie ciągłości pokoleń wymaga jednak corocznego zarybiania. Produkcja karpiokształtnych ryb reofilnych do celów ochronnych odbywa się głównie w recyklujących systemach akwakultury, w warunkach kontrolowanych. Uzasadniona jest więc optymalizacja i doskonalenie procedur produkcji tych gatunków, aby uzyskać najwyższej jakości materiał przeznaczony do zarybień.

Od kilku lat przedmiotem wielu badań dotyczących zrównoważonego rozwoju akwakultury towarowej jest poszukiwanie efektywnych surowców paszowych, przede wszystkim zamienników dla mączki rybnej. Owady są jednym z najbardziej obiecujących alternatywnych źródeł białka zwiększającym efektywność żywienia zwierząt akwakultury (Nogales-Mérida i in. 2019, Rawski i in. 2020). Wynika to z faktu wysokiej zawartości białka, ale również tłuszczu w stadiach larwalnych owadów, których biomasa stanowi surowiec do produkcji pełnotłustych lub odtłuszczonych mączek (Gasco i in. 2020). Mogą być one także źródłem różnych związków bioaktywnych, w tym peptydów przeciwdrobnoustrojowych, kwasu laurynowego czy chityny (Józefiak i Engberg 2017, Gasco i in. 2021). Z żywieniowego punktu widzenia karpiokształtne ryby reofilne to w zdecydowanej większości gatunki wszystkożerne, dla których owady na różnych etapach rozwoju są niezbędnym, naturalnym źródłem pożywienia zwłaszcza dla młodocianych osobników, co tworzy potencjał do opracowania efektywnych akwapasz z udziałem produktów uzyskanych z biomasy pochodzenia owadziego (Rohtla i in. 2021).

Przeprowadzony cykl badawczy miał na celu ocenę efektywności zastosowania mączek z biomasy trzech gatunków owadów jako składników w paszach dla młodocianych osobników karpiokształtnych ryb reofilnych. Praktycznym aspektem wykonanych prac było opracowanie składu diet przeznaczonych dla akwakultury zachowawczej.

Materiał i metody

Wszystkie procedury i metody postępowania ze zwierzętami były zgodne z zaleceniami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/63/UE z dnia 22 września 2010 r. w sprawie ochrony zwierząt wykorzystywanych do celów naukowych, Ustawy z dnia 15 stycznia 2015 r. w sprawie ochrony zwierząt wykorzystywanych do celów naukowych, dobrych praktyk i zaleceń Krajowej Komisji Etycznej ds. Doświadczeń na Zwierzętach, oraz Lokalnej Komisji Etycznej ds. Doświadczeń na Zwierzętach Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Mączki z owadów, przygotowanie diet doświadczalnych

Świeże larwy suszono w przepływie powietrza przez 24 godziny w temperaturze 50°C do uzyskania stałej suchej masy, zmielono w celu uzyskania mączki z biomasy owadów, a następnie przechowywano w temperaturze 4°C przed ich użyciem do przygotowania pasz. Analizy chemiczne mączek z owadów wykonano w akredytowanym laboratorium J.S Hamilton Sp. z o.o. (Gdynia, Polska). Próbki poddano analizie zgodnie z następującymi normami i przepisami: PB-116 wyd. III z dnia 11 sierpnia 2020 r. dla białka surowego; PN-EN ISO 6865:2002 dla włókna surowego; ISO 5984:2002 dla popiołu surowego; Rozporządzenie Komisji (WE) nr 152/2009 z dnia 27 stycznia 2009 r., załącznik III część A dla suchej masy; Rozporządzenie Komisji (WE) nr 152/2009, załącznik III, część H, metodologia B dla tłuszczu surowego; PB-223/ICP, wyd. II z dnia 12 stycznia 2015 r. dla fosforu; PB-223/ICP, wyd. II z dnia 12 stycznia 2015 r. dla wapnia; PN-EN ISO 12966-1:2015-01, PN-EN ISO 12966-2:2017-05 z wyjątkiem pkt. 5.3 i 5.5, oraz PB-53/HPLC wyd. II z dnia 30 grudnia 2008 r. dla profilu aminokwasów. Obliczono zawartość związków bezazotowych wyciągowych (ZBAW).

Poziomy białka w przygotowanych mączkach z owadów określono na podstawie zawartości aminokwasów, stosując empiryczny współczynnik konwersji białka (Kp), który obliczono według poniższego wzoru opracowanego przez Janssena i in. (2017) oraz Rawskiego i in. (2020):

$$Kp = (\text{całkowita zawartość aminokwasów} \times \text{całkowita zawartość białka}^{-1} \text{ na podstawie analizy } N \times 6,25) \times 6,25$$

Stosowanie standardowego współczynnika konwersji białka $N \times 6,25$ do obliczania jego zawartości w mączkach z owadów może prowadzić do przeszacowań wynikających z obecności chityny w biomasie owadów (Finke 2007, Gasco i in. 2018). Wyniki analizy chemicznej mączki rybnej i przygotowanych mączek z owadów przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

Podstawowy skład chemiczny (% suchej masy) i aminokwasowy (% białka ogólnego) mączek z owadów oraz mączki rybnej zastosowanych w paszach doświadczalnych dla stadiów młodocianych karpiokształtnych ryb reofilnych (szczegóły w rozdziale Materiał i metody)

Parametr	<i>Hermetia illucens</i>	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Zophobas morio</i>	Mączka rybna
Sucha masa (%)	93,19	95,30	94,25	94,94
Białko ogólne (N × 6,25)	51,10	63,44	48,67	67,63
Współczynnik Kp	5,12	5,29	5,60	6,25
Białko z przelicznikiem Kp	41,86	57,63	46,3	67,63
Włókno surowe	10,82	9,20	5,73	0,67
Popiół surowy	10,01	5,10	4,05	12,49
Tłuszcz surowy	11,44	13,87	32,41	12,85
Związki bezazotowe wyciągowe (ZBAW)	3,82	3,69	3,39	1,30
Wapń	2,04	0,09	0,05	3,92
Fosfor	1,08	0,93	0,49	2,16
Aminokwasy				
histydyna	2,26	2,60	2,80	1,72
seryna	3,85	4,36	4,22	3,96
arginina	3,90	4,45	4,43	5,98
glicyna	4,82	5,08	4,75	11,60
kwas asparaginowy	8,49	7,10	7,62	7,92
kwas glutaminowy	10,48	11,18	13,7	12,15
treonina	3,65	3,78	3,77	3,64
alanina	7,45	7,98	7,70	6,97
prolina	5,27	6,46	5,33	6,17
lizyna	5,03	5,07	5,41	5,88
tyrozyna	5,14	5,03	7,01	2,41
walina	5,63	6,01	6,37	4,09
izoleucyna	3,98	4,29	4,61	3,26
leucyna	6,26	6,93	6,97	5,56
fenyloalanina	3,60	3,07	3,53	3,09
metionina	1,55	0,83	0,92	1,27
cysteina	0,55	0,43	0,53	0,52

Dieta kontrolna (CON) została skomponowana bez udziału mączek z owadów, natomiast zawierała 300 g kg⁻¹ mączki rybnej. Ponadto opracowano sześć diet doświadczalnych, w których zastąpiono 25 i 50% mączki rybnej mączką z owadów:

- H75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ mączki rybnej i 75 g kg⁻¹ mączki z muchy czarnej (*Hermetia illucens*);
- H150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *H. illucens*;

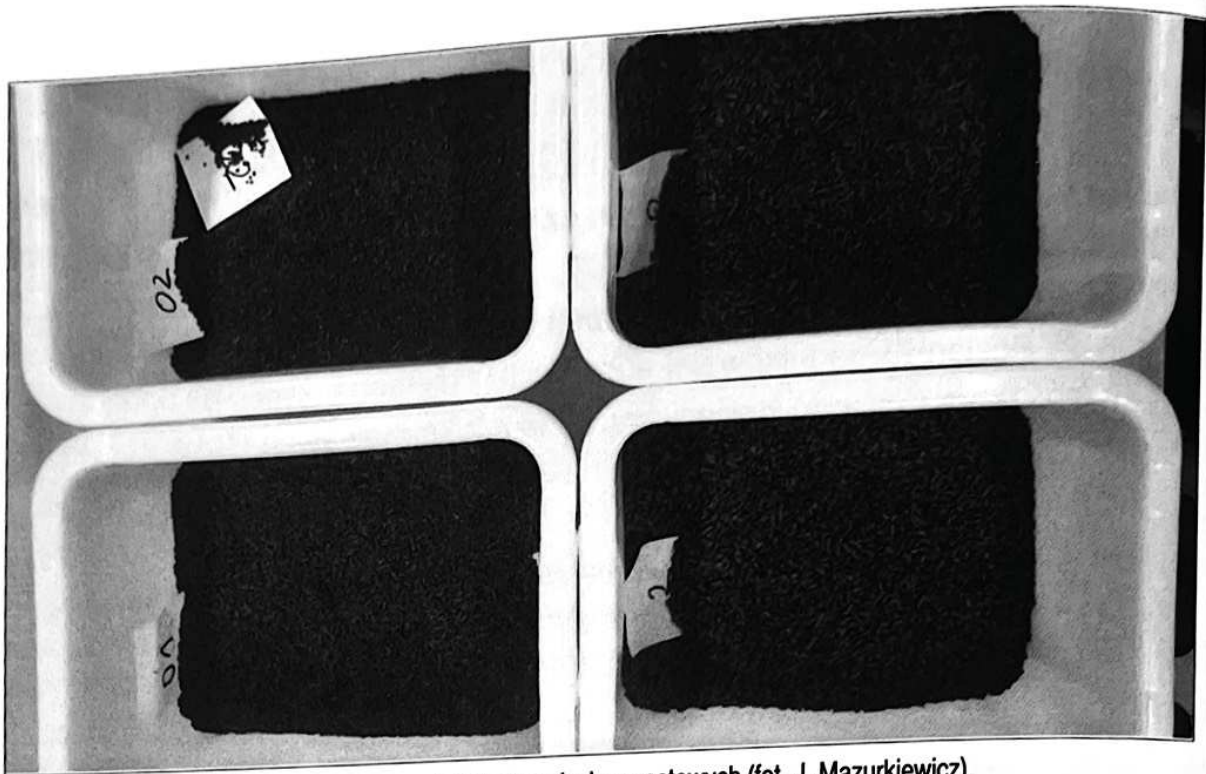
- T75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ młynarka (*Tenebrio molitor*);
- T150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *T. molitor*;
- Z75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ mączki rybnej i 750 g kg⁻¹ mączki z drewnoja-da (*Zophobas morio*);
- Z150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *Z. morio* (tab. 2). Poziomy składników pokarmowych w dietach przyjęto na podstawie Ren i in. (2017) oraz zaleceń żywieniowych dla ryb karpiojących (Takeuchi i in. 2002, NRC 2011).

Tabela 2

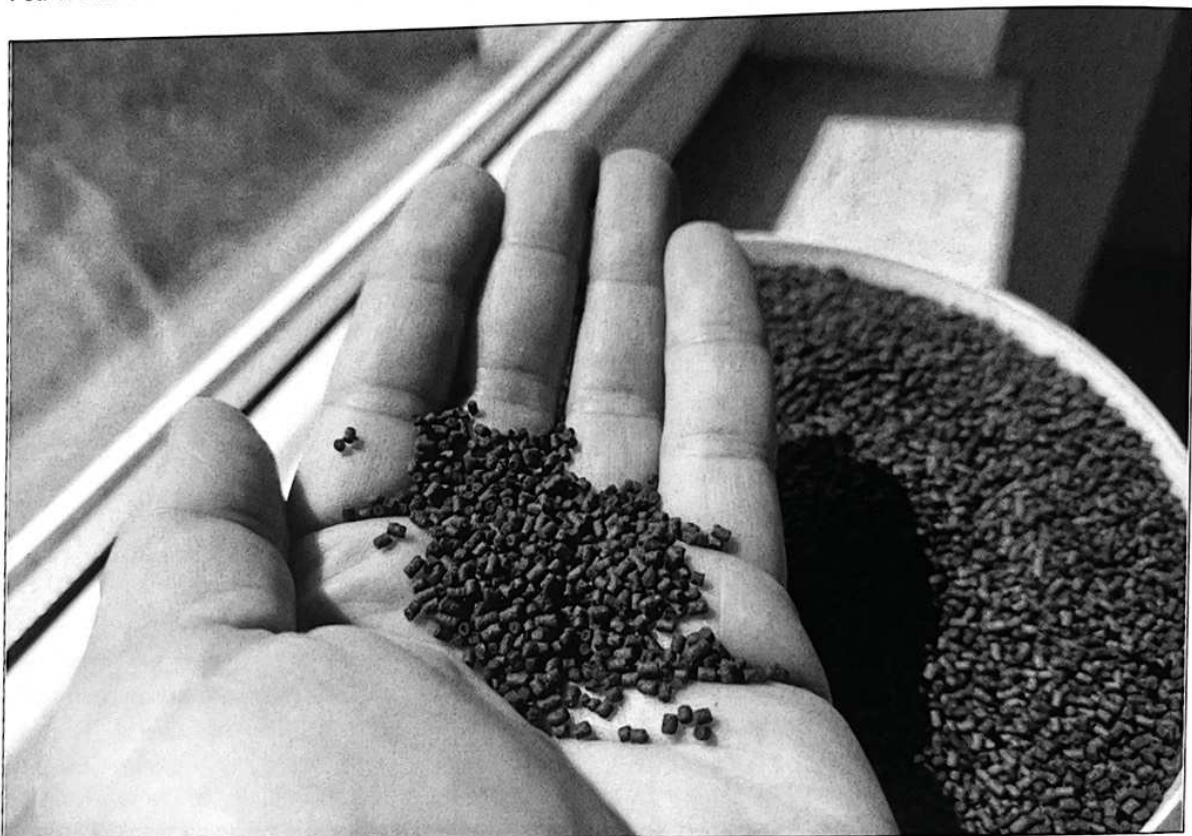
Skład surowcowy pasz doświadczalnych dla stadiów młodocianych karpiokształtnych ryb reofilnych (szczegóły w rozdziale Materiał i metody)

Składniki (g kg ⁻¹ paszy)	Pasza						
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150
Mączka rybna ¹	300	225	150	225	150	225	150
Mączka z erytrocytów ²	90	90	90	90	90	90	90
Mączka z owadów ³	0	75	150	75	150	75	150
Izolat białka sojowego ⁴	51	72	92	61	72	68	85
Gluten pszenny ⁵	100	100	100	100	100	100	100
Mąka pszenna	156	137	119	152	148	154	150
Skrobia kukurydziana	200	200	200	200	200	200	200
Olej rybny ⁶	35	33	31	25	15	16	0
Lecytyna sojowa ⁷	10	10	10	10	10	10	10
Premix mineralno-witaminowy ⁸	15	15	15	15	15	15	15
Premix witaminowy ⁹	1	1	1	1	1	1	1
Chlorek choliny	2	2	2	2	2	2	2
Karboksymetyloceluloza	20	20	20	20	20	20	20
Kreda pastewna	20	20	20	24	27	24	27
Kwas askorbinowy ¹⁰	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

¹Wyprodukowana z całych ryb morskich i odpadów ryb słodkowodnych, >64% białka surowego; ²AP 301 >92% białka surowego, APC (GB) Ltd., Ings Road, Doncaster, Wielka Brytania; ³HiProMine S.A., Robakowo, Polska; ⁴ > 85% białka surowego; ⁵ >86% białka surowego; ⁶Agro-fish, Kartoszyno, Polska; ⁷BergaPure, Polska; ⁸ > 85% białka surowego; ⁹ >86% białka surowego; ⁶Agro-fish, Kartoszyno, Polska; ⁷BergaPure, Polska; ⁸Polfamix W, odtłuszczona lecytyna, czystość > 97%, Berg + Schmidt GmbH & Co. KG, Hamburg, Niemcy; ⁹Polfamix W, BASF Polska Sp. z o.o. Kutno, Polska – zawierający w 1 kg: witamina A 1000000 IU, witamina D3 200000 IU, witamina E 1,5 g, witamina K 0,2 g, witamina B1 0,05 g, witamina B2 0,4 g, witamina B12 0,001 g, kwas nikotynowy 2,5 g, D-pantotenian wapnia 1,0 g, chlorek choliny 7,5 g, kwas foliowy 0,1 g, metionina 150,0 g, lizyna 150,0 g, Fe 2,5 g, Mn 6,5 g, Cu 0,8 g, Co 0,04 g, Zn 4,0 g, J 0,008 g, nośnik > 1000,0 g; ¹⁰Vitazol AD₃E, BIOWET Drwałow, Polska – zawierający w 1 kg: witamina A 50 000 IU, witamina D3 5000 IU, witamina E 30,0 mg; ¹⁰Rovimix Stay-C 35, DSM Nutritional Products Ltd., Saint-Louis Cedex, Francja.



Fot. 1. Pasze doświadczalne stosowane w doświadczeniach wzrostowych (fot. J. Mazurkiewicz).



Fot. 2. Ekstrudowana pasza doświadczalna z udziałem mączki z biomasy larw *Hermetia illucens* (fot. J. Mazurkiewicz).

Pasze (fot. 1 i 2) wytworzono metodą ekstruzji w dwuślimakowym egzogennym ekstruderze w Zakładzie Doświadczalnym Technologii Produkcji Pasz i Akwakultury w Muchocinie (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu). Warunki wytwarzania były następujące: temperatura cylindra w strefie rosnącego ciśnienia 90°C, temperatura cylindra

w strefie wysokiego ciśnienia 120°C, temperatura głowicy 100°C, prędkość ślimaka 52 obr. min⁻¹, średnica dyszy 3 mm. W postprodukcji wykonano natłuszczenie pasz olejem rybnym (Rollermac BA 15 FR at. Pomati Group S.R. L, Codogno, Włochy).

Do analizy składu chemicznego pasz wykorzystano metody opisane dla mączek z owadów, a wyniki przedstawiono w tab. 3. Pasze zostały opracowane tak, aby zachować ich zbliżone poziomy energetyczne przy wyrównanych zawartościach białka surowego. Różnice w ilościach tłuszczu surowego i włókna wynikają z różnej zawartości tych składników w mączkach owadów.

Tabela 3

Wartość pokarmowa pasz doświadczalnych dla stadiów młodocianych karpiokształtnych ryb reofilnych (szczegóły w rozdziale Materiał i metody)

Składnik	Pasza						
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150
Sucha masa (%)	93,29	93,59	92,58	93,29	92,06	93,32	92,35
Białko ogólne (% suchej masy (s.m.))	44,39	42,63	42,37	43,88	44,69	42,48	42,39
Aminokwasy egzogenne (g 100 g ⁻¹ białka)							
arginina	4,42	4,47	4,52	4,54	4,66	4,49	4,56
histydyna	2,56	2,65	2,73	2,71	2,87	2,68	2,81
lizyna	4,25	4,35	4,45	4,42	4,59	4,36	4,47
tryptofan	0,84	0,81	0,79	0,79	0,74	0,81	0,78
fenylalanina + tyrozyna	5,71	6,03	6,35	6,17	6,64	6,13	6,55
meionina + cystyna	1,55	1,70	1,85	1,69	1,82	1,67	1,80
treonina	2,89	2,98	3,06	3,06	3,23	2,99	3,08
leucyna	7,56	7,66	7,76	7,85	8,15	7,71	7,86
izoleucyna	3,68	3,76	3,85	3,85	4,03	3,79	3,90
walina	4,70	4,85	5,01	5,02	5,33	4,90	5,11
Tłuszcz surowy (% s.m.)	7,94	7,76	6,00	7,76	7,56	7,32	6,61
Związki bezazotowe wyciągowe (ZBAW) (% s.m.)	32,11	33,92	35,99	32,27	29,32	34,11	34,85
Włókno surowe (% s.m.)	1,07	1,57	1,40	1,79	3,10	1,76	1,45
Popiół (% s.m.)	7,78	7,71	6,82	7,59	7,39	7,65	7,05
Fosfor ogólny (% s.m.)	0,89	0,79	0,70	0,77	0,64	0,74	0,59
Wapń (% s.m.)	1,50	1,47	1,44	1,48	1,43	1,48	1,43
Energia brutto (MJ kg ⁻¹)	19,06	18,88	18,49	18,89	18,50	18,71	18,53
E/P (kJ g ⁻¹ białka)	42,93	44,30	43,63	43,06	41,39	44,04	43,72

Doświadczenia wzrostowe

Badania wykonano z młodocianymi osobnikami trzech gatunków karpiokształtnych ryb reofilnych: klenia, certy i brzany (fot. 3 i 4) o średniej początkowej masie ciała, odpowiednio: 9,6 g (± 0,1 g), 10,5 g (± 0,4 g) i 7,9 g (± 0,3 g). Każdy z gatunków utrzymywano



Fot. 3. Wylęg żerujący brzany w trakcie wychowu na potrzeby testu wzrostowego (fot. J. Mazurkiewicz).



Fot. 4. Narybek certy w trakcie testu wzrostowego (fot. J. Mazurkiewicz).

w doświadczalnym recyrkulacyjnym systemie akwakultury w 21 zbiornikach wzrostowo-
 stano po 4200 młodocianych osobników, które podzielono na siedem grup, po trzy
 powtórzenia w każdej (200 ryb zbiornik⁻¹). Każdy test wzrostowy trwał 60 dni. Dawkę
 paszy ustalano w zależności od biomasy ryb w poszczególnych zbiornikach oraz pobra-
 nia paszy w poprzednich dniach. Ryby ważono co 10 dni w celu dostosowania dawki
 ne warunki środowiskowe: średnia dzienna temperatura wody wynosiła 22,5°C, nasyce-
 nie wody tlenem powyżej 70% (miernik WTW Multi Line P4 z optycznym czujnikiem tlenu
 WTW, FDO 924, WTW, Weilheim, Niemcy), odczyn wody mieścił się w zakresie pH od 7,5
 do 7,90 (miernik WTW Multi Line P3, WTW, Weilheim, Niemcy), przewodność elektroli-
 tyczna wynosiła od 760 do 785 µS (miernik EC-3, HM Digital Inc., Redondo Beach, CA,
 USA), zawartość amoniaku wynosiła poniżej 0,02 mg l⁻¹, zawartość NO₂ wynosiła poniż-
 ej 0,15 mg l⁻¹, a zawartość NO₃ nie przekraczała 14,5 mg l⁻¹ (zestawy pomiarowe Merck
 MColorTest nr kat. 1144230002, 1144240001 i 1111700001, Merck Darmstadt, Niemcy).
 W hali akwakultury utrzymywano sztuczny fotoperiod (14 godzin światła i 10 godzin
 ciemności), barwa światła była naturalna.

Obliczono następujące parametry wzrostu ryb oraz wykorzystania pasz: końcową
 masę ciała (FBW), względne dobowe tempo wzrostu (SGR), procentowy przyrost masy
 ciała (PWG), współczynnik pokarmowy paszy (FCR), współczynnik wydajności wzrosto-
 wej białka paszowego (PER) i współczynnik przeżywalności (SR), według wzorów:

$$FBW (g) = \text{biomasa ryb w zbiorniku (g)} \times \text{liczba ryb w zbiorniku}^{-1};$$

$$SGR (\% d^{-1}) = (\ln \text{końcowa masa ciała (g)} - \ln \text{początkowa masa ciała (g)}) \times \text{liczba dni kar-}$$

$$\text{mienia}^{-1} \times 100;$$

$$PWG (\%) = (\text{jednostkowy przyrost masy ciała (g)} \times \text{początkowa masa ciała}^{-1} (g)) \times 100;$$

$$FCR = \text{pobranie paszy (g)} \times \text{przyrost masy ciała}^{-1} (g);$$

$$PER = \text{przyrost masy ciała (g)} \times (\text{pobranie paszy (g)} \times \text{poziom białka w diecie (\%)})^{-1};$$

$$SR (\%) = (\text{końcowa liczba żywych ryb (osob.)} \times \text{początkowa liczba żywych ryb}^{-1} (\text{osob.})) \times 100.$$

Zrównoważenie środowiskowe chowu ryb

Wskaźniki zrównoważenia środowiskowego chowu ryb obliczono z uwzględnieniem
 danych dotyczących wzrostu i wykorzystania paszy zgodnie z literaturą naukową (Raw-
 ski i in. 2020, Stejskal i in. 2020). Względne wykorzystanie materiałów paszowych
 pochodzenia morskiego (mączki rybnej (FMU) oraz oleju rybnego (FOU)) obliczono
 według następujących wzorów:

$$FMU (g \text{ kg}^{-1} \text{ masy ryb}) = \text{udział mączki rybnej w paszy (g kg}^{-1}) \times \text{współczynnik wykorzy-}$$

$$\text{stania paszy (g g}^{-1});$$

FOU (g kg^{-1} masy ryb) = udział oleju rybnego w paszy (g kg^{-1}) \times współczynnik wykorzystania paszy (g g^{-1}).

Wskaźnik FIFO (tzw. indeks rybożerności; ang. *Fish In – Fish Out Ratio*) obliczono według następującego wzoru:

$$\text{FIFO} = [(\text{udział mączki rybnej w paszy } (\text{g kg}^{-1}) + \text{udział oleju rybnego w paszy } (\text{g kg}^{-1})) \times (\text{średnia masa mączki rybnej pochodzącej z połówów } (\text{g kg}^{-1}) + \text{średnia masa oleju rybnego pochodzącego z połówów } (\text{g kg}^{-1}))] \times (\text{pobranie paszy } (\text{g}) \times \text{przyrost masy ciała}^{-1} (\text{g})).$$

Uśredniona ilość mączki rybnej wyprodukowanej z surowców pochodzących z połówów oraz odpadów rybnych została przyjęta na poziomie 225 g kg^{-1} , natomiast uśredniona ilość oleju rybnego na poziomie 50 g kg^{-1} .

Analiza statystyczna

Analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu programu R (wersja 4.0.3). Rozkład normalny danych potwierdzono za pomocą testu Shapiro-Wilka, natomiast jednorodność wariancji zweryfikowano za pomocą testu Levene'a. Istotne różnice pomiędzy grupami oceniano za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), a do wielokrotnych porównań parametrów o rozkładzie normalnym danych zastosowano test Duncana. Istotność różnic określono na poziomie $P \leq 0,05$. W przypadku braku normalności rozkładu danych istotne różnice między grupami potwierdzono testem Kruskala-Wallisa. Do porównań wielokrotnych wykorzystano test Dunna z metodą Benjaminiego-Hochberga, a istotność różnic określono na poziomie $P \leq 0,05$.

Wyniki

W trakcie testu wzrostowego z narybkiem klenia nie odnotowano statystycznie istotnych różnic między grupami w zakresie przeżywalności ryb (tab. 4). Najniższe wartości średniej masy końcowej i względnego przyrostu masy ciała ryb odnotowano w grupie Z150 oraz niższe wartości w grupach: kontrolnej, H75, H150, Z75 w stosunku do grupy T75. Najwyższą średnią masą końcową oraz względnym przyrostem masy ciała charakteryzowały się ryby z grupy T150. Składniki pokarmowe pasz były najlepiej wykorzystane przez narybek klenia również z grupy T150 ($\text{FCR}=1,36$), natomiast najmniej korzystną wartość współczynnika pokarmowego paszy odnotowano u ryb z grupy Z150 ($\text{FCR}=2,31$); w pozostałych grupach były to wartości pośrednie. Najwyższymi wartościami współczynników SGR i PER charakteryzowały się ryby z grupy T150, a najniższymi z grupy Z150. Wartości pośrednie dla tych parametrów zanotowano w grupach CON, H75, H150 i Z75.

Wartości wskaźników chowu oraz wykorzystanie pasz uzyskane w teście wzrostowym z narybkiem klenia. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Tabela 4

Parametr	Grupa							SEM	Wartość P
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150		
IBW (g)	9,66 ^a	9,60 ^a	9,65 ^a	9,68 ^a	9,64 ^a	9,65 ^a	9,58 ^a	0,2076	0,9551
FBW (g)	19,83 ^c	19,61 ^c	19,92 ^c	21,64 ^b	23,24 ^a	20,32 ^c	16,99 ^d	0,3571	< 0,001
PWG (%)	108 ^c	109 ^c	108 ^c	126 ^b	143 ^a	113 ^c	78 ^d	3,1224	< 0,001
SGR (% d ⁻¹)	1,22 ^c	1,23 ^c	1,22 ^c	1,36 ^b	1,48 ^a	1,26 ^c	0,96 ^d	0,0248	< 0,001
SR (%)	97 ^a	96 ^a	94 ^a	95 ^a	98 ^a	94 ^a	95 ^a	0,6001	0,9118
FCR	1,76 ^b	1,71 ^b	1,71 ^b	1,52 ^c	1,36 ^d	1,67 ^b	2,31 ^a	0,0465	< 0,001
PER	1,28 ^c	1,37 ^c	1,38 ^c	1,5 ^d	1,65 ^a	1,41 ^{bc}	1,02 ^d	0,3158	< 0,001

CON – dieta zawierająca 300 g kg⁻¹ mączki rybnej; H75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ mączki rybnej i 75 g kg⁻¹ mączki z *Hermetia illucens*; H150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *Hermetia illucens*; T75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ mączki rybnej i 75 g kg⁻¹ mączki z *Tenebrio molitor*; T150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *Tenebrio molitor*; Z75 – dieta zawierająca 225 g kg⁻¹ mączki rybnej i 75 g kg⁻¹ mączki z *Zophobas morio*; Z150 – dieta zawierająca 150 g kg⁻¹ mączki rybnej i 150 g kg⁻¹ mączki z *Zophobas morio*; SEM – standardowy błąd pomiaru; IBW – średnia początkowa masa ciała; FBW – średnia końcowa masa ciała; PWG – procentowy przyrost masy ryb; SGR – względne dobowe tempo wzrostu ryb; SR – współczynnik przeżywalności; FCR – współczynnik pokarmowy paszy; PER – wskaźnik wydajności wzrostowej białka paszowego. Szczegóły w rozdziale Materiał i metody.

Wyniki otrzymane w teście wzrostowym z udziałem młodocianych osobników certy przedstawiono w tab. 5. Najwyższe przyrosty masy ciała, a tym samym końcowe masy jednostkowe odnotowano u ryb żywionych paszami zawierającymi mączkę z *H. illucens* lub mącznika młynarka, z kolei istotnie niższe wartości stwierdzono w grupie kontrolnej i Z75, a najniższe u ryb z grupy Z150. Nie stwierdzono istotnych różnic w zakresie względnych dobowych przyrostów masy ciała ryb w grupach H150, T75, T150, H75, natomiast wartości pośrednie zanotowano w grupie kontrolnej oraz Z75. Ryby z grupy Z150 charakteryzowały się najniższym względnym przyrostem masy ciała. Najwyższą wartość FCR zaobserwowano w grupie Z150, a najniższe – najkorzystniejsze w grupach H75, H150, T75, T150, Z75; wartości pośrednie zanotowano w grupie kontrolnej. Najwyższe wartości wskaźnika wydajności wzrostowej białka paszowego zanotowano w grupach H75, H150, T75, T150. Wartości pośrednie dla PER stwierdzono w grupie kontrolnej, a najniższą wartością tego wskaźnika charakteryzowała się grupa Z150. Przeżywalność ryb w całym okresie testu wzrostowego nie różniła się istotnie pomiędzy grupami, najniższe wartości tego parametru (SR=86%) odnotowano w grupach kontrolnej i Z150, z kolei w pozostałych grupach wartości były bardzo wyrównane (od 93% do 98%).

Wartości wskaźników chowu oraz wykorzystanie pasz uzyskane w teście wzrostowym z narybkiem certy. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Tabela 5

Parametr	Grupa							SEM	Wartość P
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150		
IBW (g)	10,75 ^a	10,33 ^a	10,83 ^a	10,75 ^a	10,75 ^a	10,92 ^a	10,17 ^a	0,1192	0,6703
FBW (g)	17,6 ^c	19,58 ^a	19,75 ^a	19,67 ^{ab}	19,3 ^{ab}	17,67 ^c	14,08 ^d	2,7514	< 0,001
PWG (%)	75,25 ^c	91,25 ^b	98,92 ^a	92,92 ^{ab}	92,25 ^{ab}	78,75 ^c	44,92 ^d	2,7793	< 0,001
SGR (% d ⁻¹)	0,99 ^b	1,15 ^a	1,22 ^a	1,17 ^a	1,16 ^a	1,03 ^b	0,65 ^c	0,030	< 0,001
SR (%)	86 ^a	97 ^a	98 ^a	94 ^a	93 ^a	96 ^a	86 ^a	0,5234	0,6387
FCR	2,32 ^a	1,89 ^c	1,75 ^c	1,86 ^c	1,88 ^c	1,96 ^c	2,92 ^a	0,076	< 0,001
PER	1,03 ^c	1,26 ^{ab}	1,36 ^a	1,28 ^{ab}	1,27 ^{ab}	1,22 ^b	0,86 ^d	0,029	< 0,001

Oznaczenia jak w tab. 4.

W teście wzrostowym z narybkiem brzany najgorsze wartości parametrów chowu ryb oraz wykorzystania pasz odnotowano w grupie otrzymującej paszę z wyższym udziałem (150 g kg⁻¹) mączki z biomasy larw drewnojada, a istotność różnic została potwierdzona statystycznie (tab. 6).

Tabela 6

Wartości wskaźników chowu oraz wykorzystanie pasz uzyskane w teście wzrostowym z narybkiem brzany. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Parametr	Grupa							SEM	Wartość P
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150		
IBW (g)	7,94 ^a	7,93 ^a	7,97 ^a	7,97 ^a	7,97 ^a	7,90 ^a	7,96 ^a	0,01	0,8924
FBW (g)	14,63 ^{cd}	14,81 ^{bcd}	15,29 ^{ab}	15,21 ^{abc}	15,89 ^{ab}	14,43 ^d	10,56 ^e	0,2603	< 0,001
PWG (%)	71,14 ^a	71,43 ^a	74,07 ^a	76,71 ^a	73,90 ^a	67,94 ^b	25,60 ^b	2,7678	< 0,001
SGR (% d ⁻¹)	1,07 ^a	1,08 ^a	1,11 ^a	1,14 ^a	1,11 ^a	1,03 ^a	0,45 ^b	0,0371	< 0,001
SR (%)	100	100	100	100	100	100	100	-	-
FCR	1,67 ^b	1,65 ^b	1,61 ^b	1,55 ^b	1,60 ^b	1,74 ^b	4,17 ^a	0,1515	< 0,001
PER	1,44 ^a	1,45 ^a	1,49 ^a	1,54 ^a	1,11 ^a	1,39 ^a	0,60 ^b	0,0515	< 0,001

Oznaczenia jak w tab. 4.

W dniu zakończenia doświadczenia wzrostowego średnie końcowe masy ciała ryb były zróżnicowane, najwyższe w grupach H150, T75 i T150 przy braku istotnych różnic międzygrupowych. Ryby z grup Z150 i Z75 charakteryzowały się istotnie niższym względnym przyrostem masy ciała w stosunku do młodocianej brzany z pozostałych grup. Wartości współczynnika pokarmowego paszy w poszczególnych grupach były wyrównane (FCR od 1,55 do 1,74) z wyjątkiem grupy Z150. Podobnie jak w przypadku

FCR kształtowały się wartości wskaźnika wydajności wzrostowej białka paszowego PER. Nie odnotowano strat ryb w żadnej grupie doświadczalnej w całym okresie badań.

Wyniki doświadczeń wzrostowych pozwoliły na analizę zrównoważenia środowisko-przyrostu masy ciała ryb), FOU – względnego zużycia mączki rybnej (g kg^{-1} przyrostu masy ciała ryb), współczynnika rybożerności (FIFO) oraz współczynnika wydajności wykorzystania paszy (FCR). W przypadku testu przeprowadzonego na kleniu (tab. 7) w porównaniu do grupy kontrolnej (CON) uzyskano obniżenie zużycia mączki rybnej w przypadku wszystkich grup z zastosowaniem mączek wytworzonych z owadów (H75, H150, T75, T150, Z75 i Z150).

Tabela 7

Parametry zrównoważenia środowiskowego chowu ryb obliczone na podstawie wyników testu wzrostowego z narybkiem klenia. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Parametr	Grupa							SEM	Wartość P
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150		
FMU	528 ^a	385 ^b	257 ^c	342 ^b	204 ^c	376 ^b	347 ^b	24,670	< 0,001
FOU	61,6 ^a	56,4 ^a	53,0 ^a	38,0 ^b	20,4 ^c	26,7 ^c	0,0 ^d	2,6752	< 0,001
FIFO	2,14 ^a	1,60 ^b	1,13 ^c	1,38 ^{bc}	0,82 ^d	1,46 ^{bc}	1,26 ^c	0,0625	< 0,001
FCE	0,57 ^c	0,58 ^c	0,58 ^c	0,66 ^{bc}	0,74 ^a	0,60 ^c	0,43 ^d	0,0156	< 0,001

CON – dieta zawierająca 300 g kg^{-1} mączki rybnej; H75 – dieta zawierająca 225 g kg^{-1} mączki rybnej i 75 g kg^{-1} mączki z *Hermetia illucens*; H150 – dieta zawierająca 150 g kg^{-1} mączki rybnej i 150 g kg^{-1} mączki z *Hermetia illucens*; T75 – dieta zawierająca 225 g kg^{-1} mączki rybnej i 75 g kg^{-1} mączki z *Tenebrio molitor*; T150 – dieta zawierająca 150 g kg^{-1} mączki rybnej i 150 g kg^{-1} mączki z *Tenebrio molitor*; Z75 – dieta zawierająca 225 g kg^{-1} mączki rybnej i 75 g kg^{-1} mączki z *Zophobas morio*; Z150 – dieta zawierająca 150 g kg^{-1} mączki rybnej i 150 g kg^{-1} mączki z *Zophobas morio*; SEM – standardowy błąd pomiaru; FMU – względne wykorzystanie mączki rybnej (ang. fish meal use); FOU – względne wykorzystanie oleju rybnego (ang. fish oil use); FIFO – indeks rybożerności (ang. fish-in fish-out ratio); FCE – efektywność wykorzystania paszy (ang. feed conversion efficiency). Szczegóły w rozdziale Materiał i metody.

Najniższe wyniki zaobserwowano w grupach H150 i T150. Względne zużycie oleju rybnego uległo obniżeniu w grupach, gdzie zastosowano pełnotłuste mączki z owadów (T75, T150, Z75 i Z150), a najniższą wartość uzyskano w grupie Z150. Nie odnotowano wpływu częściowo odtłuszczonej mączki z *H. illucens* (grupy H75 i H150). Współczynnik rybożerności we wszystkich grupach z wyjątkiem T150 przekraczał wartość 1,0, gdzie uzyskano najniższy wynik. W dalszej kolejności najkorzystniejsze wyniki obserwowano w grupach H150, T75, Z75 i Z150. Najwyższą wartość odnotowano dla grupy kontrolnej. W przypadku współczynnika wydajności wykorzystania paszy zaobserwowano jego obniżenie w grupie Z150 i zwiększenie w grupie T150.

Tabela 8

Parametry zrównoważenia środowiskowego chowu ryb obliczone na podstawie wyników testu wzrostowego z narybkiem certy. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Parametr	Grupa						SEM	Wartość P	
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75			Z150
FMU	697 ^a	426 ^b	263 ^c	420 ^b	282 ^c	441 ^b	439 ^b	35,756	< 0,001
FOU	81,3 ^a	62,4 ^b	54,4 ^c	46,6 ^d	28,2 ^e	31,4 ^e	0,00 ^f	3,0124	< 0,001
FIFO	2,83 ^a	1,78 ^b	1,15 ^c	1,70 ^b	1,13 ^c	1,18 ^c	1,60 ^b	0,082	< 0,001
FCE	0,43 ^c	0,53 ^{ab}	0,57 ^a	0,54 ^{ab}	0,53 ^{ab}	0,51 ^b	0,36 ^d	0,213	< 0,001

Oznaczenia jak w tab. 7.

W doświadczeniu z narybkiem certy najwyższe względne zużycie mączki rybnej na kilogram przyrostu ryb odnotowano w grupie kontrolnej (tab. 8). Obniżenie tego wskaźnika zaobserwowano w grupach H75, T75, Z75 i Z150, natomiast najniższe wartości w grupach H150 i T150. Względne zużycie oleju rybnego osiągnęło najwyższą wartość w grupie kontrolnej, następnie obniżało się różniąc się istotnie pomiędzy grupami H75, H150, T75, jeszcze niższą wartość uzyskano w grupach T150 i Z75, a najniższą w Z150. Najwyższą wartość współczynnika FIFO odnotowano w grupie kontrolnej, niższą w grupach H75, T75 i Z150, z kolei najniższą w grupach H150, T150 i Z75. Współczynnik wydajności wykorzystania paszy we wszystkich grupach doświadczalnych różnił się w stosunku do tej żywionej paszą kontrolną. Jego zwiększenie obserwowano w H75, H150, T75, T150 i Z75, natomiast obniżenie w grupie Z150.

Doświadczenie z młodocianymi osobnikami brzany charakteryzowało się zróżnicowanym poziomem względnego zużycia mączki rybnej na jednostkę przyrostu masy ciała (tab. 9). Najwyższą wartość odnotowano w grupie Z150, następnie istotnie niższe w grupach CON i Z75, przy czym ostatnia nie różniła się istotnie od wyniku dla grup H75, T75 T150. Najniższą wartość odnotowano w grupie H150, nie różniła się ona od wyniku uzyskanego w grupie T75. Najniższe względne zużycie oleju rybnego odnotowano w grupie Z150, najwyższe w grupie kontrolnej, następnie istotne obniżenie kolejno w grupach H75, H150, T75 oraz nie różniących się od siebie T150 i Z75. Najwyższy współczynnik FIFO odnotowano w grupach kontrolnej i Z150, jego obniżenie w grupach H75 i T75, a dalsze istotnie niższe wyniki w grupach H150 i Z75, najniższe w T150. Współczynnik wydajności wykorzystania paszy nie różnił się pomiędzy grupami (CON, H75, H150, T75, T150 i Z75), poza grupą Z150, gdzie zaobserwowano jego obniżenie w stosunku do grupy kontrolnej i pozostałych doświadczalnych.

Tabela 9

Parametry zrównoważenia środowiskowego chowu ryb obliczone na podstawie wyników testu wzrostowego z narybkiem brzany. Grupy oznaczone tym samym indeksem literowym nie różnią się istotnie statystycznie ($P > 0,05$)

Parametr	Grupa							SEM	Wartość P
	CON	H75	H150	T75	T150	Z75	Z150		
FMU	500 ^b	371 ^c	241 ^d	348 ^{cd}	361 ^c	391 ^{bc}	939 ^a	22,010	< 0,001
FOU	58,3 ^a	54,4 ^b	49,8 ^c	38,7 ^d	24,1 ^e	27,8 ^e	0,0 ^f	3,8524	< 0,001
FIFO	2,03 ^a	1,55 ^b	1,06 ^c	1,41 ^b	0,96 ^d	1,05 ^c	2,27 ^a	0,0912	< 0,001
FCE	0,61 ^a	0,61 ^a	0,63 ^a	0,64 ^a	0,62 ^a	0,58 ^a	0,25 ^b	0,0126	< 0,001

Oznaczenia jak w tab. 7.

Dyskusja

Owady są głównym naturalnym źródłem pokarmu dla wielu gatunków ryb (Vidotto-Magnoni i Carvalho 2009, Makkar i in. 2014, Rohtla i in. 2021). Wyniki doświadczeń w zakresie karmienia ryb z wolnym wyborem oraz testy akceptacji pasz zawierających produkty wytworzone z biomasy larw owadów wykazały ich wysoką smakowitość, a tym samym wysoki potencjał do zastosowania w żywieniu ryb hodowlanych (Rawski i in. 2020), w tym karpia (Rawski in. 2018), jak również gatunków ozdobnych (Kowalska i in. 2021). Wyniki wzrostowe uzyskane dla trzech gatunków karpiokształtnych ryb reofilnych objętych niniejszymi badaniami we wszystkich grupach doświadczalnych, z wyjątkiem grup Z150, były zadowalające i porównywalne z wynikami uzyskanymi przez Ren i in. (2017), przy podobnej zawartości białka w paszach. Wartości współczynnika pokarmowego pasz (FCR) dla grupy kontrolnej oraz ryb żywionych paszami z zastosowaniem mączek z *H. illucens* lub *T. molitor* były zbliżone do średnich wartości uzyskiwanych dla karpia (*Cyprinus carpio*) (Naylor i in. 2021). Dotychczas przeprowadzono kilka doświadczeń żywieniowych, w tym dotyczących efektów zastosowania mączki z owadów, głównie z biomasy larw *H. illucens* (BSFM), na rybach karpiokształtnych, głównie różnych odmianach karpia. W przeciwieństwie do wyników naszych badań, Gebremichael i in. (2021) stwierdzili, że zastąpienie mączki rybnej mączką BSFM (do 100%) w diecie karpia nie wpływa negatywnie na wzrost ryb oraz wykorzystanie paszy.

Dotychczas wykonano wiele badań dotyczących opracowania odpowiedniej ilości białka w dietach dla różnych gatunków ryb z rodziny Cyprinidae, głównie karpia pospolitego. Badania nad żywieniem tego gatunku dostarczyły wiedzy niezbędnej do określenia specyficznych wymagań pokarmowych różnych gatunków oraz wielu aspektów związanych z żywieniem ryb karpiowatych. Wymagania pokarmowe ryb są specyficzne dla gatunku i zależą od wieku, stanu fizjologicznego oraz wielu innych czynników (Kaus-

hik i Schrama 2021). W żywieniu zwierząt współczynnik konwersji azotu na białko (Kp) jest powszechnie przyjmowany jako $N \times 6,25$ ze względu na średnią zawartość 16 g azotu w 100 g białka. W przypadku mączek z owadów użytych jako źródło białka w paszach doświadczalnych wartość współczynnika Kp obliczana na podstawie zawartości aminokwasów wynosiła od 5,12 do 5,60, co zgadza się z wcześniejszymi badaniami, potwierdzającymi zawyżenie zawartości białka ogólnego przy użyciu obliczeń $N \times 6,25$ (Janssen i in. 2017, Rawski i in. 2020). W niniejszych badaniach oceniono żywieniowe efekty włączenia mączek z trzech gatunków owadów w akwakulturze karpiokształtnych ryb reofilnych. Zastosowanie empirycznego współczynnika Kp w przypadku mączki z *Z. morio* wykazało zawyżenie o 2,37% w porównaniu do obliczeń $N \times 6,25$; dla mączek *T. molitor* i *H. illucens* zawyżenie wynosiło, odpowiednio 5,81 i 9,24%. Zastosowanie współczynnika Kp w analizie składu całej paszy jest niemożliwe z powodu braku analitycznego rozróżnienia azotu pochodzenia owadziego od innych źródeł. W analizie opartej na azocie gotowych pasz nie zaobserwowano wyraźnych zmian poziomu białka ogólnego, gdy w diecie były zastosowane mączki z owadów. Fakt ten potwierdza jednoznacznie konieczność bilansowania diet zawierających mączki z owadów na podstawie zmodyfikowanego współczynnika Kp lub na podstawie zawartości aminokwasów, aby spełnić potrzeby żywieniowe ryb. Efektywne wykorzystanie składników pokarmowych pasz jest ściśle związane z odpowiednio zbilansowanym poziomem energii, który w praktyce najczęściej wyrażany jest jako stosunek energii do białka (Takeuchi i in. 1979b). Pasza dla ryb powinna zawierać od 33,5 do 42,0 kJ energii na 1 g białka ogólnego, co gwarantuje, że będzie ono wykorzystywane do wzrostu ryb, a nie tylko do pokrycia zapotrzebowania na energię (Ogin i in. 1976, Takeuchi in. 1979a). Ryby jako zwierzęta zmiennocieplne mają znacznie mniejsze zapotrzebowanie na energię niż zwierzęta stałocieplne. Chakraborty i in. (1992) oraz Kaushik (1995) wykazali liniową zależność między retencją azotu a poziomem energii w diecie. Diety o zbyt niskim poziomie energii skutkują zwiększonym wykorzystaniem białka jako źródła energii, zmniejszeniem tempa wzrostu oraz pogorszeniem wykorzystania paszy. Stosunek energii do białka w dietach eksperymentalnych spełniał te zalecenia, wynosił od 41,39 do 44,3 kJ energii brutto na 1 g białka surowego. Korzystny współczynnik pokarmowy paszy (FCR) oraz przyrosty masy ryb potwierdzają, że poziom energii w paszach eksperymentalnych był poprawnie zbilansowane.

W żywieniu ryb wszystkożernych tłuszcze i węglowodany są składnikami paszy, które skutecznie pokrywają zapotrzebowanie na energię, dlatego jej poziom w diecie jest ważniejszy niż ilość tłuszczu. Takeuchi i in. (1979a) wykazali, że zwiększenie ilości energii strawnej paszy z 13 do 15 MJ kg⁻¹ przy dodatku tłuszczu od 5 do 15% nie spowodowało lepszego wzrostu karpia ani wyższej retencji białka. Poziom tłuszczu surowego w paszach zastosowanych w niniejszym badaniu różnił się ze względu na dość zróżnico-

waną zawartość tego składnika w mączkach z różnych gatunków owadów. Ze względu na powyższe fakty, wszystkie pasze eksperymentalne były bilansowane zgodnie ze stoniam oraz selekcji mającej na celu polepszenie ich cech produkcyjnych charakteryzują się wolniejszym i mniej intensywnym wzrostem niż karp, dlatego wymagania energetyczne dla tych gatunków nie zostały empirycznie określone. Tłuszcze paszowe nie powinny być uważane jedynie za źródło energii. Zawierają one kwasy tłuszczowe kluczowe dla metabolizmu ryb. Dotychczas określono wymagania karpia tylko dla dwóch kwasów tłuszczowych, mianowicie kwasu linolowego (18:2 n-6) i linolenowego (18:3 n-3), których poziom w paszy powinien wynosić więcej niż 1% (Takeuchi i Watanabe 1977). Węglowodany mogą być stosowane jako główne źródło energii w diecie ryb wszystkożernych, a optymalna zawartość tego składnika pokarmowego w paszy dla karpia wynosi od 30 do 40% (Ogin i in. 1976, Takeuchi i in. 1979a). Wysoka skuteczność wykorzystania węglowodanów (głównie skrobi) jako źródła energii dla ryb karpiowatych wynika z aktywności enzymów amylolitycznych, która jest wyższa niż u ryb drapieżnych (Murai i in. 1983). W prezentowanych badaniach przyjęto założenie, że te cechy są podobne dla większości ryb karpiokształtnych, w tym dla brzany, certy i klenia, dlatego bilansowano pasze doświadczalne pod kątem zawartości węglowodanów na poziomie od niespełna 30 do 36%. Dodatkowo wytworzenie pasz metodą ekstruzji znacznie poprawia przyswajalność skrobi, co zwiększa zawartość strawnej energii w diecie (Takeuchi i in. 1990).

Składnikiem pokarmowym, który należy uwzględnić w bilansowaniu diet zawierających mączki z owadów jest włókno surowe, którego zawartość wzrasta ze względu na obecność egzoskieletów larw zbudowanych z chityny. W przypadku ryb wszystkożernych niewielki wzrost zawartości włókna surowego nie wpływa negatywnie na wyniki wzrostu i procesy trawienne (Stone 2003, Krogdahl i in. 2005). Zrównoważenie środowiskowe produkcji akwakultury leży u podstaw większości obecnie prowadzonych badań nad żywieniem ryb. Ich głównymi celami są: ograniczenie zastosowania mączki i oleju rybnego w żywieniu ryb, jak również poszukiwania aplikowalnych i skalowalnych alternatywnych materiałów paszowych. Jednakże w większości prac naukowych termin ten pozostaje w sferze dyskusji bez jego mierzalnej oceny dla wyników empirycznych uzyskanych na drodze doświadczeń wzrostowych z użyciem innowacyjnych diet (Stejskal i in. 2020, Rawski i in. 2021). W związku z powyższym w prezentowanej pracy podjęto się uzupełnienia tej luki poprzez kalkulację parametrów uwzględniających skład paszy i stopień jej wykorzystania w poszczególnych doświadczeniach. Zastosowanie tego samego układu doświadczalnego w poszczególnych doświadczeniach pozwoliło na uwzględnienie porównania międzygatunkowego ryb. Użyte w teście trzy rodzaje mączek wytworzonych z biomasy owadów zwiększyły zakres oceny alternatywnych materiałów paszowych. Uzyskane wyniki wskazują na konieczność każdorazowej analizy w przy-

padku wprowadzania surowców paszowych i wysoką wartość tych kalkulacji, jeżeli uwzględnione w nich są parametry ewaluujące diety zarówno pod kątem wykorzystania zawartej w nich mączki oraz oleju rybnego, jak i ogólnego zużycia materiałów paszowych pochodzenia morskiego. Przeprowadzone doświadczenia wskazują, że poza składem mieszanek paszowych realne zrównoważenie produkcji jest warunkowane ich wykorzystaniem i wydajnością. Należy podkreślić, że w przypadku nieudomowionych gatunków ryb ze względu na ich fizjologię i tempo wzrostu nie jest możliwe osiągnięcie tak imponujących wyników zrównoważenia środowiskowego jak w przypadku łososia atlantyckiego (*Salmo salar*) czy pstrąga tęczowego (*Oncorhynchus mykiss*), które poprzez swój znacznie większy potencjał genetyczny wykorzystują pasze w znacznie wyższym stopniu, jak również ich precyzyjne żywienie zostało już dokładnie opisane (Mikołajczak i in. 2023a, 2023b). Uzyskane wyniki wskazują na wyraźnie niższe w przypadku karpiokształtnych reofilnych ryb współczynniki wydajności wykorzystania pasz. W przypadku klenia z 1 kg paszy uzyskiwano przyrost na poziomie od 430 do 760 gramów biomasy ryb. Przy czym poziom nie pogorszony w stosunku do mączki rybnej utrzymywał się w grupach z zastosowaniem mączek z owadów poza jedną – żywioną paszą zawierającą 150 g kg⁻¹ mączki z drewnojada. Natomiast zastosowanie mączki z *H. illucens* skutkowało niezmiennym statystycznie poziomem produktywności paszy, a z mącznika młynarka jego zwiększeniem. W przypadku certy zastosowanie mączek z *H. illucens* i mącznika młynarka oraz niższym udziałem *Z. morio* również okazały się korzystnym wariantem z punktu widzenia efektywności wykorzystania paszy. Jedynym, który doprowadził do pogorszenia FCE był wariant zawierający 150 g kg⁻¹ mączki z drewnojada. Test przeprowadzony na brzanie wskazał na wyrównany potencjał wzrostowy pasz doświadczalnych z wyjątkiem grupy Z150, gdzie uległ on pogorszeniu. Już ta prosta analiza wykazuje wpływ poszczególnych pasz na zrównoważenie środowiskowe poprzez zróżnicowaną efektywność materiałów paszowych zużywanych na potrzeby żywienia ryb, co przekłada się na zwiększenie lub zmniejszenie energochłonności procesów jej produkcji oraz transportu. Oceniając szczegółowo zużycie mączki i oleju rybnego, jak również współczynnik FIFO na kilogram przyrostu masy należy zauważyć, że poza wspomnianymi wyżej czynnikami kluczowe dla wyników oceny zrównoważenia środowiskowego jest zastosowanie materiałów o charakterze białkowym lub białkowo-energetycznym. W przypadku przeprowadzonych badań użyto częściowo odtuszczonej mączki z *H. illucens* oraz pełnotłuste mączki z mącznika młynarka i drewnojada. Skutkowało to przede wszystkim zróżnicowanym poziomem zastąpienia przez nie oleju rybnego, a w konsekwencji, z racji jego znacznie wyższego braku zrównoważenia środowiska w porównaniu do mączki rybnej, wyższego efektu na wskaźniki je oceniające. Podsumowując, dokonując oceny aplikacyjności innowacyjnych materiałów paszowych pod kątem zrównoważenia środowiskowego należy brać pod uwagę szereg czynników, od

energocłonności wytworzenia pasz i długości łańcuchów dostaw po ostateczne wyniki wzrostowe uzyskane z ich zastosowaniem. Dopiero po pozytywnych wynikach możemy stwierdzić realne zrównoważenie i zasadność ich wprowadzenia.

Podsumowanie

Innowacyjne pasze dla klenia, certy i brzany zastosowane w doświadczeniach okazały się efektywne i korzystne dla ryb. Udowodniono wysoką użyteczność diet zawierających mączki wytworzone z *H. illucens* lub mącznika młynarka w żywieniu młodocianych stadiów ryb karpiokształtnych przeznaczonych do zarybiania. Niemniej jednak, konieczne są dalsze badania w celu optymalizacji składu pasz i określenia optymalnego zastosowania produktów z owadów (mączek pełnotłustych i odtłuszczonych, tłuszczu). Wyniki przedstawione w niniejszej pracy otwierają nowe perspektywy w zakresie zastosowania mączek z biomasy larw owadów w akwakulturze zachowawczej karpiokształtnych ryb reofilnych.

Badania zrealizowano w ramach operacji pt.: „Innowacyjny system rozrodu i wychowu karpiowałych ryb reofilnych w biologicznie efektywnej i niskoemisyjnej akwakulturze zachowawczej”, umowa o dofinansowanie nr 00002-6521.1-OR1500001/22 zawarta w dniu 9 listopada 2022 roku w ramach działania 2.1 „Innowacje” o których mowa w art. 47 rozporządzenia nr 508/2014 w zakresie Priorytetu 2 – Wspieranie akwakultury zrównoważonej środowiskowo, zasobooszczędnej, innowacyjnej, konkurencyjnej i opartej na wiedzy, zawartego w Programie Operacyjnym „Rybnactwo i Morze”.

Literatura

- Chakraborty S.C., Ross L.G., Ross B. 1992 – Specific dynamic action and feeding metabolism in common carp, *Cyprinus carpio* L. – Comp. Biochem. Physiol. A Physiol. 103: 809-815.
- Finke M.D. 2007 – Estimate of chitin in raw whole insects – Zoo Biol. 26: 105-115.
- Gasco L., Acuti G., Bani P., Dalle Zotte A., Danieli P.P., De Angelis A., Fortina R., Marino R., Parisi G., Piccolo G. 2020 – Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition – Ital. J. Anim. Sci. 19: 360-372.
- Gasco L., Gai F., Genovese L., Ragonese S., Bottari T., Caruso G. 2018 – Fishmeal alternative protein sources for aquaculture feeds – W: *Feeds for the aquaculture sector: current situation and alternative sources* (Red.) L. Gasco, F. Gai, G. Maricchiolo, L. Genovese, S. Ragonese, T. Bottari, G. Caruso. Springer Int. Pub., Cham, Switzerland: 1-28.
- Gasco L., Józefiak A., Henry M. 2021 – Beyond the protein concept: health aspects of using edible insects on animals – J. Insects Food Feed 7: 715-741.
- Gebremichael A., Hancz C., Kucska B. 2021 – Effect of total or partial replacing of fishmeal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal on growth performance and body condition indices of common carp (*Cyprinus carpio*) – AACL Bioflux 14(4): 2280-2286.
- Homska N., Kowalska J., Bogucka J., Ziółkowska E., Rawski M., Kierończyk B., Mazurkiewicz J. 2022 – Dietary fish meal replacement with *Hermetia illucens* and *Tenebrio molitor* larval meals improves the growth performance and nutrphysiological status of ide (*Leuciscus idus*) juveniles – Animals 12(10), 1227.

- Jackson A. 2009 – Fish in-fish out, ratios explained – *Aquac. Eur.* 34: 5-10.
- Janssen R.H., Vincken J.P., Van Den Broek L.A.M., Fogliano V., Lakemond C.M.M. 2017 – Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens* – *J. Agric. Food Chem.* 65: 2275-2278.
- Józefiak A., Engberg R. 2017 – Insect proteins as a potential source of antimicrobial peptides in livestock production. A review – *J. Anim. Feed Sci.* 26: 87-99.
- Kamiński R., Kamler E., Wolnicki J., Sikorska J., Wałowski J. 2010 – Condition, growth and food conversion in barbel, *Barbus barbus* (L.) juveniles under different temperature/diet combinations – *J. Therm. Biol.* 35(8): 422-427.
- Kaushik S.J. 1995 – Nutrient requirements, supply and utilization in the context of carp culture – *Aquaculture* 129: 225-241.
- Kaushik S.J., Schrama J.W. 2021 – Bioenergetics – W: *Fish nutrition* (Red.) R.W. Hardy, S.J.Kaushik. Academic Press: 17-48.
- Kowalska J., Rawski M., Homska N., Mikołajczak Z., Kierończyk B., Świątkiewicz S., Wachowiak R., Hetmańczyk K., Mazurkiewicz J. 2021 – The first insight into full-fat superworm (*Zophobas morio*) meal in guppy (*Poecilia reticulata*) diets: a study on multiple-choice feeding preferences and growth performance – *Ann. Anim. Sci.* 22(1): 371-384.
- Krogdahl A., Bakke-McKellep A.M., Baeverfjord G. 2005 – Effects of graded levels of standard soybean meal on intestinal structure, mucosal enzyme activities, and pancreatic response in atlantic salmon (*Salmo salar* L.) – *Aquac. Nutr.* 9(6): 361-371.
- Kucharczyk D., Targońska K., Źarski D., Kujawa R., Mamcarz A. 2008 – A review of the reproduction biotechnology for fish from the genus *Leuciscus* – *Fish. Aquat. Life.* 16(4): 319-340.
- Kujawa R., Glińska-Lewczuk K. 2011 – The impact of regulation and hydrotechnical works in river channels on the rheophilic Cyprinidae fish – *Cont. Probl. Manage. Environ. Prot.* 7: 233-248.
- Kupren K., Turkowski K., Kucharczyk D., Krejszef S., Źarski D., Hakuć-Błażowska A., Czarkowski T. 2008 – Economic aspects of rearing larval asp, *Aspius aspius* (L.), and ide, *Leuciscus idus* (L.), in closed recirculating systems – *Fish. Aquat. Life.* 16(4): 413-420.
- Makkar H.P.S., Tran G., Heuzé V., Ankers P. 2014 – State-of-the-art on use of insects as animal feed – *Anim. Feed Sci. Technol.* 197: 1-33.
- Mikołajczak Z., Mazurkiewicz J., Rawski M., Kierończyk B., Józefiak A., Świątkiewicz S., Józefiak D. 2023a – Black soldier fly full-fat meal in Atlantic salmon nutrition – Part A: effects on growth performance, feed utilization, selected nutriphysiological traits and production sustainability in fries – *Ann. Anim. Sci.* 23(1): 225-238.
- Mikołajczak Z., Mazurkiewicz J., Rawski M., Kierończyk B., Józefiak A., Świątkiewicz S., Józefiak D. 2023b – Black soldier fly full-fat meal in Atlantic salmon nutrition – Part B: effects on growth performance, feed utilization, selected nutriphysiological traits and production sustainability in pre-smolts – *Ann. Anim. Sci.* 23(1): 239-251.
- Murai T., Akiyama T., Nose T. 1983 – Effects of glucose chain length of various carbohydrates and frequency of feeding on their utilization by fingerling carp – *Nippon Suisan Gakkaishi* 49: 1607-1611.
- Naylor R.L., Hardy R.W., Buschmann A.H., Bush S.R., Cao L., Klinger D.H., Little D.C., Lubchenco J., Shumway S.E., Troell M. 2021 – A 20-year retrospective review of global aquaculture – *Nature* 591: 551-563.
- Nogales-Mérida S., Gobbi P., Józefiak D., Mazurkiewicz J., Dudek K., Rawski M., Kierończyk B., Józefiak A. 2019 – Insect meals in fish nutrition – *Rev. Aquac.* 11: 1080-1103.
- NRC 2011 – Nutrient Requirements of Fish and Shrimp – National Academies Press, ISBN 978-0-309-47322-4.

- Ogin C., Chiou J.Y., Takeuchi T. 1976 – Protein nutrition in fish - effects of dietary energy sources on the utilization of proteins by rainbow trout and carp – Nippon Suisan Gakkaishi 42: 213-218.
- Rawski M., Józefiak D., Nogales-Merida S., Józefiak A., Kierończyk B., Benzertiha A., Talibov S., Dudek K., Gobbi P., Noak M., Mikołajczak Z., Barc A., Mazurkiewicz J. 2018 – The preliminary study on live insects' acceptance in common carp (*Cyprinus carpio*) – XV Conference of Young Researchers Physiology and Biochemistry in Animal Nutrition, 26-28 September 2018, Warsaw, Poland
- Rawski M., Mazurkiewicz J., Kierończyk B., Józefiak D. 2020 – Black soldier fly full-fat larvae meal as an alternative to fish meal and fish oil in Siberian sturgeon nutrition: the effects on physical properties of the feed, animal growth performance, and feed acceptance and utilization – *Animals* 10: 1-19.
- Rawski M., Mazurkiewicz J., Kierończyk B., Józefiak D. 2021 – Black soldier fly full-fat larvae meal is more profitable than fish meal and fish oil in Siberian sturgeon farming: the effects on aquaculture sustainability, economy and fish GIT development – *Animals* 11(3), 604.
- Ren M., Ji K., Liang H., Ge X., Mi H. 2017 – Dietary protein requirement of juvenile ide, *Leuciscus idus* in relation to growth performance, whole-body composition and plasma parameters – *Isr. J. Aquac.-Bamidgeh* 69: 1-9.
- Rohtla M., Vilizzi L., Kováč V., Almeida D., Brewster B., Britton J.R., Głowacki Ł., Godard M.J., Kirk R., Nienhuis S. 2021 – Review and meta-analysis of the environmental biology and potential invasiveness of a poorly-studied cyprinid, the ide *Leuciscus idus* – *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 29: 512-548.
- Śliwiński J., Ostaszewska T., Kamaszewski M. 2016 – Akwakultura jako narzędzie poprawy statusu karpiojących ryb reofilnych w Polsce - stan i perspektywy badań – *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.* 25: 239-248.
- Stejskal V., Tran H.Q., Prokesova M., Gebauer T., Giang P.T., Gai F., Gasco L. 2020 – Partially defatted *Hermetia illucens* larva meal in diet of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) juveniles – *Animals* 10, 1876.
- Stone D.A.J. 2003 – Dietary carbohydrate utilization by fish – *Rev. Fish. Sci.* 11: 337-369.
- Takeuchi T., Jeong K.S., Watanabe T. 1990 – Availability of extruded carbohydrate ingredients to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and carp *Cyprinus carpio* – Nippon Suisan Gakkaishi 56: 1839-1845.
- Takeuchi T., Satoh S., Kiron V. 2002 – Common carp, *Cyprinus carpio* – W: *Nutrient Requirements and Feeding of Finfish for Aquaculture* (Red.) C.D. Webster, C. Lim. CABI Publishing: New York, USA: 245-261.
- Takeuchi T., Watanabe T. 1977 – Requirement of carp for essential fatty acids – Nippon Suisan Gakkaishi 43: 541-551.
- Takeuchi T., Watanabe T., Ogino C. 1979a – Availability of carbohydrate and lipid as dietary energy sources for carp – Nippon Suisan Gakkaishi 45: 977-982.
- Takeuchi T., Watanabe T., Ogino C. 1979b – Optimum ratio of dietary energy to protein for carp – Nippon Suisan Gakkaishi 45: 983-987.
- Vidotto-Magnoni A.P., Carvalho E.D. 2009 – Aquatic insects as the main food resource of fish the community in a neotropical reservoir – *Neotrop. Ichthyol.* 7: 701-708.
- Zakęś Z., Rożyński M. 2021 – Charakterystyka produkcji polskiej akwakultury zachowawczej w latach 2010-2019 – W: *Akwakultura jako narzędzie ochrony ichtiofauny* (Red.) Z. Zakęś, K. Demska-Zakęś. Wyd. IRS, Olsztyn: 11-25.