



Funded by
the European Union



Skaitmeninė mėlynoji karjera įveikus anglies krizę – akvakultūros mokymo programos naujovės [DiBluCa]
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

4 modulis. Kaip dėl pasaulinio atšilimo turėtų keistis žuvų mityba ir šėrimo praktika akvakultūroje?

Prof. dr. Ergün Demir

Prof. dr. Muhittin Zengin

Balikesiro universitetas, Turkija

Turinys

Išvadas	2
1. Klimato kaitos įtaka žuvų mitybos fiziologijai	3
1.1. Temperatūros poveikis medžiagų apykaitai	3
1.2. Pašarų virškinamumas ir pasisavinimo efektyvumas	3
2. Tvarūs pašarų ingredientai akvakultūroje	4
2.1. Alternatyvūs pašarų ir baltymų šaltiniai	5
2.2. Akvakultūros pašarų poveikio aplinkai mažinimas	11
3. Šėrimo valdymo strategijos	12
3.1. Tikslusis ir prisitaikantis šėrimas	12
3.2. Išankstinio apdorojimo technologijos ir fermentuoti pašarai, skirti akvakultūrai	14
4. Vandenyne rūgštėjimo poveikio mažinimas	14
4.1. Buferinės medžiagos pašaruose	15
4.2. Mitybos strategijos atsparumui rūgštėjimui didinti	16
5. Pašarų efektyvumo didinimas	16
5.1. Ekstruzijos ir perdirbimo technologijos apdorojimas	16
5.2. Funkciniai pašarų priedai	17
Santrauka	21
Literatūra	21



Įvadas

Akvakultūra yra vienas sparčiausiai augančių žemės ūkio sektorių pasaulyje ir tampa vis svarbesnė tiekiant tvarius ir sveikus produktus, kurie pasižymi palyginti mažesniu poveikiu klimatui. Prognozuojama, kad žuvininkystės produkcija iki 2030 m. padidės 32 proc. (FAO, 2020). Rinkos veiksniai rodo, kad Europos akvakultūros plėtra yra vienintelis realus būdas patenkinti didėjančią žuvų paklausą. Tačiau pasiekti tvarią gamybą, kuri prisidėtų prie sveikos mitybos, įgyvendintų Darnaus vystymosi tikslus ir padėtų siekti neutralumo klimato kaitai („Net Zero“), yra sudėtinga užduotis (Messeder, 2021).

Vykstant klimato kaitai, prognozuojama, kad sumažės maistinių medžiagų prieinamumas (Cheung et al., 2023). Aukštos kokybės pašarų ir jų sudedamųjų dalių trūkumas, taip pat vandens produktų saugos ir kokybės klausimai kelia daug iššūkių šio sektoriaus tvariam vystymuisi (Ma & Hu, 2023). Pasaulinė žuvų auginimo veikla kasmet sukuria apie 250 mln. tonų CO₂ ekvivalentų (MacLeod et al., 2020). Vien lašišų auginimas sukuria apie 10 mln. tonų CO₂ ekvivalentų per metus. Pašarai sudaro vidutiniškai 75 proc. šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijos Norvegijoje auginamų lašišų gamyboje (Ziv-Douki, 2020). Palyginti su gyvulininkystės gamyba, ypač jautiena, jūrų produktų gamyba pasižymi mažesne anglies dioksido emisija.



4.1 pav. Akvakultūros sektoriai, kuriuose galima mažinti anglies dioksido emisiją (adaptuota pagal Zhang et al., 2024).

Temperatūros pokyčiai neigiamai veikia šalto vandens rūšių augimą ir išgyvenamumą, blogėja vandens kokybė, silpnėja šių rūšių imuninė sistema, mažėja vandenyno gebėjimas veikti kaip anglies dvideginio „sugertuvas“ (angl. „carbon sink“), didėja šiltesnio vandens patogenų virulentiškumas. Kadangi pašarai labai prisideda prie akvakultūros anglies pėdsako,



didžiausias dėmesys turėtų būti skiriamas emisijų mažinimui gaminant pašarus (Zhang et al., 2024).

1. Klimato kaitos įtaka žuvų mitybos fiziologijai

1.1. Temperatūros poveikis medžiagų apykaitai

Akvakultūra yra ypač jautri klimato kaitos poveikiui, nes labai priklauso nuo aplinkos sąlygų. Dėl pasaulinio atšilimo didėja vandens temperatūra, o tai lemia auginamų rūšių medžiagų apykaitos intensyvėjimą, todėl reikia keisti pašarų sudėtį, kad būtų patenkinti padidėję mitybos poreikiai (Reid et al., 2019). Kadangi žuvis yra pokiloterminiai (šaltakraujai) gyvūnai, jų bazinis energijos poreikis tiesiogiai priklauso nuo vandens temperatūros. Temperatūrai kylant, didėja jų standartinis metabolizmo greitis, taip pat energijos ir baltymų poreikis palaikymui. Tiesa, temperatūros poveikis bazinei medžiagų apykaitai net ir optimaliame intervale skiriasi pagal rūšį. Klimato kaita išlieka vienu didžiausių streso veiksnių akvakultūroje.

1.2. Pašarų virškinamumas ir pasisavinimo efektyvumas

Dėl temperatūros atsiradę metabolizmo pokyčiai paveikia ne tik mitybinę vertę, bet ir šėrimo efektyvumo rodiklius, tokius kaip šėrimo efektyvumo santykis (PER – svorio prieaugis / pašarų kiekis) ar pašarų konversijos koeficientas (PKK – pašarai / svorio prieaugis). Vandens temperatūros skirtumas vos keliais laipsniais kai kurioms rūšims gali lemti ryškius šėrimo efektyvumo skirtumus (Siikavuopio et al., 2012). Temperatūros pokyčiai taip pat gali paveikti kai kurių maistinių medžiagų, pavyzdžiui, riebalų rūgščių, virškinamumą, ypač lašišinių žuvų (Huguet et al., 2015).

Vis dėlto vertinama, kad vandens temperatūros poveikis akvakultūrinių gyvūnų maisto virškinamumui yra nedidelis. Pavyzdžiui, tyrimai su lašišomis rodo, kad baltymų ir lipidų virškinamumas gali kisti nežymiai (Amin et al., 2014). Kai kuriais tyrimais nustatyta, kad slinkimo žarnynu laikas gali sutrumpėti esant aukštesnei vandens temperatūrai – tai priklauso nuo rūšies. Tačiau dauguma tyrimų pabrėžiama, kad maistinių medžiagų ar energijos virškinamumui žala pasireiškia tik tada, kai viršijamas optimalus temperatūros intervalas (Reid et al., 2019).

Pašarų suvartojimas ir medžiagų apykaitos greitis

Pasaulinis atšilimas ir dėl jo atsirandantys klimato pokyčiai skatina vandens telkinių išilimą, rūgštėjimą, kritulių ir vėjo režimų kaitą, dėl ko kinta vandens srovės, turbulencija ir drumstumas. Visa tai daro poveikį vandens organizmų mitybos ir endokrinei sistemai (Nadermann et al., 2019). Klimato pokyčių metu į atmosferą išskiriamas CO₂ ir metanas taip pat veikia žuvų fiziologiją, elgseną, šėrimą bei su juo susijusį hormoninį reguliavimą (Ahmed et al., 2019; Volkoff, 2019).



Kadangi žuvis yra ektoterminiai gyvūnai, jos itin jautriai reaguoja į vandens temperatūros pokyčius. Temperatūrai kylant, daugėja deguonies poreikis, spartėja metabolizmas, todėl didėja energijos poreikiai (Sandblom et al., 2014). Nors šie pokyčiai priklauso nuo rūšies, vidutinio lygio temperatūros padidėjimas skatina didesnį pašarų vartojimą (Sharma et al., 2017). Tyrimai rodo, kad padidėjęs CO₂ ir sumažėjęs vandens pH mažina žuvų apetitą, trikdo jų gebėjimą reaguoti į cheminius signalus ir aptikti maistą uosle (Porteus et al., 2018). Be to, didesnis raumenų aktyvumas, reikalingas stabilumui palaikyti esant srovių turbulencijai, didina energijos poreikį, o prastas matomumas dar labiau apsunkina maitinimąsi.

Klimato kaitos poveikis žuvų mikroflorai (mikrobiotai)

Žuvų virškinimo sistemos sandara turi tiesioginės įtakos jų virškinimui ir imuninės sistemos būklei, tačiau ši sistema taip pat pažeidžiama dėl šiluminio streso, dėl kurio gali pablogėti žuvų sveikata (Geda et al., 2012). Žinoma, kad karščio stresas neigiamai veikia tokių gyvūnų kaip kiaulės ar vištos žarnyno gaurelius ir absorbcinį paviršių, tačiau poveikis žuvų žarnyno morfologijai dar nėra iki galo ištirtas.

Žarnyno mikrobiota sąveikauja su žuvų organizmu daugelyje fiziologinių procesų, įskaitant metabolizmą ir imuninę apsaugą (Gardiner et al., 2020; Yadav & Jha, 2019), ir yra jautri temperatūros pokyčiams. Pavyzdžiui, nustatyta, kad dėl aukštesnės temperatūros sumažėja naudingų pieno rūgšties bakterijų kiekis ir padidėja potencialiai pavojingų *Vibrio* spp. kiekis atlantinėse lašišose (Amin et al., 2016). Vis dėlto karščio poveikis žarnyno mikroflorai būdingas rūšiai.

Mikrobiota plačiai pripažįstama kaip svarbus žuvų sveikatos palaikymo veiksnys (Legrand et al., 2020). Temperatūra yra reikšmingas fiziologiją lemiantis nebiologinis veiksnys, ypač vandens organizmams, kurių kūno temperatūra atitinka aplinkos vandenį (Sepulveda & Moeller, 2020). Dėl streso gali sutrikti mikrobinė žarnyno struktūra ir paveikti žuvų fiziologines bei imunines funkcijas (Blacher et al., 2017). Be to, dėl temperatūros kinta ne tik mikrobiotos sudėtis, bet ir šeiminingo metabolizmas bei fenotipiniai požymiai (Guillen et al., 2019).

Trinh ir kt. (2017) nustatė, kad skirtingo augimo tempo jauniklių žuvų žarnyno mikrobiotos reikšmingai skyrėsi, ir padarė išvadą, jog mikrobiota gali daryti įtaką augimo greičiui dėl efektyvesnio energijos panaudojimo. Rimoldi ir kt. (2020) nustatė, kad vyraujanti žarnyno mikrobiota gali būti naudojama kaip Europos jūrinio ešerio sveikatos būklės rodiklis.

2. Tvarūs pašarų ingredientai akvakultūroje

Akvakultūra gali užtikrinti gyvūninės kilmės baltymų gamybą su mažesne šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisija nei žemės ūkyje auginami gyvūnai (Hilborn et al., 2018). Todėl akvakultūra klimato požiūriu laikoma draugiškesniu baltymų gamybos sektoriumi, palyginti su kitomis gyvulininkystės formomis (NOAA Fisheries, 2022). Akvakultūros pašarams gaminti sunaudojama daugiau kaip 70 proc. pasaulio žuvų miltų ir žuvų



taukų (FMFO). Iš maždaug 30 mln. tonų mažų žuvų, kasmet sugaunamų pasaulio vandenynuose, apie 17 mln. tonų naudojama akvakultūros pašarams gaminti (Cottrell et al., 2020). Tad alternatyvių baltymų šaltinių naudojimas pašarams gali sumažinti akvakultūros poveikį aplinkai, sąnaudas ir prisidėti prie konkurencingo sektoriaus kūrimo. Alternatyvūs baltymų šaltiniai, tokie kaip vabzdžių miltai, nėra naujiena, tačiau pastaruoju metu į šią sritį nukreiptos investicijos leidžia tikėtis greitesnio jų pritaikymo praktiškai. Vienas iš pavyzdžių – naujos iniciatyvos, skirtos sumažinti lašišų ūkių ekologinį pėdsaką 30 proc. iki 2030 m. Taip pat plėtojami kiti pašarų šaltiniai, ypač dumbliai ir jūrų dumbliai, kurie turi didelį potencialą. Dar viena perspektyvi kryptis – pramoninės biotechnologijos pagrindu sukurti pašarai. Technologija, pavyzdžiui, ekstruzija, padidina maistinių medžiagų virškinamumą ir įsisavinimą (Zhang et al., 2024).

2.1. Alternatyvūs pašarų ir baltymų šaltiniai

Tikimasi, kad baltymų gamyba ES turės padvigubėti iki 2050 m. Kadangi ES nėra savarankiška baltymų gamybos srityje, apie 70 proc. pašarinių baltymų importuojama. Tad būtina rasti tvarius alternatyvius baltymų šaltinius, kurių reikiamą kiekį būtų įmanoma gaminti ekonomiškai, kad jie atitiktų augantį maisto ir pašarų pramonės poreikį (Smáráson, 2023). Pašarų tvarumas akvakultūroje labai priklauso nuo tokių kokybiškų žaliavų kaip žuvų miltai ir žuvų taukai (FMFO) prieinamumo. Tradiciniai pašarų komponentai tampa vis sunkiau prieinami dėl sparčios akvakultūros plėtros, mažėjančių natūralių žuvų išteklių ir klimato kaitos (Idenyi et al., 2022).

Akvakultūroje daugiau kaip 90 proc. ŠESD emisijos susidaro dėl naudojamų pašarų. Siekiant klimato kaitos mažinimo tikslų, pašarų gamyboje galima taikyti žiedinės ekonomikos principus, panaudojant naujus biologinius išteklius (Tait, 2021). Šiuo metu apie 70 proc. pasaulinės akvakultūros produkcijos (pagal svorį) priklauso nuo išorinių pašarų tiekimo. Tai yra vienas didžiausių iššūkių ilgalaikiam sektoriaus tvarumui, kuris reikalauja alternatyvių žaliavų vystymo (Reid et al., 2019).

Dėl riboto ir mažėjančio žvejybos laimikio žuvų miltų gamyba pasaulyje sumažėja iki maždaug 5 mln. tonų per metus, o žuvų taukų – iki 1 mln. tonų. Iš šių kiekių apie 60–80 proc. žuvų miltų ir 70–80 proc. žuvų taukų sunaudojama akvakultūroje (FAO, 2022). Atsižvelgiant į didėjančią FMFO poreikį, kurį lemia nuolat auganti akvakultūros pramonė, būtina rasti tinkamus jų pakaitalus, kad sektorius būtų vystomas tvariai.

Žuvų miltai ir žuvų taukai (ŽMT) – pagrindiniai akvakultūros pašarų ingredientai

Akvakultūra iš esmės remiasi dviem gamybos rūšimis – šeriamais organizmais, tokiais kaip krevetės, jūriniai ešeriai ir lašišos, bei nešeriamais, kaip sidabriniai karpiai, jūrų dumbliai, austrės. Tradiciškai šeriama akvakultūra buvo grindžiama pašarais su dideliu ŽMT kiekiu (Froehlich et al., 2018). Tačiau ŽMT naudojimas laikomas viena iš pagrindinių netvarumo priežasčių akvakultūroje, nes tai didina spaudimą žuvų ištekliais ir griaua vandens maisto tinklų pusiausvyrą (Hua et al., 2019). Priklausomybė nuo žuvų pašarų kelia grėsmę jūrų



biologinei įvairovei ir maisto saugai. Kaip žinoma, klimato kaita ir El Ninjo neigiamai veikia daugelį natūralių vandens maisto šaltinių, ypač fitoplanktoną. Dėl šių priežasčių ŽMT kiekis akvakultūros pašaruose per pastaruosius metus mažėjo. Kita problema, susijusi su žuvų miltais, – didesnis sunkiųjų metalų, cheminių medžiagų ir mikroplastiko kaupimasis jūrų žuvyse (Hanachi et al., 2019).

Augaliniai pašarai ir (arba) aliejai ir aplinkosaugos iššūkiai

Pastaraisiais metais akvakultūros pašarų gamintojai pradėjo naudoti tokius žemės ūkio produktus kaip sojos, kukurūzai ar rapsai vietoj ŽMT. Tačiau transgeninių sėklų, pesticidų, trąšų ir vandens naudojimas tokių produktų gamyboje daro neigiamą poveikį aplinkos tvarumui. Todėl ŽMT pakeitimas sausumos augalinės kilmės ingredientais yra toli nuo nulinės anglies pėdsako tikslo. Be to, jų maistinė vertė mažesnė, prasčiau virškinami, juose trūksta tokių aminorūgščių kaip lizinas, treoninas ar triptofanas. Dėl to žuvų baltymų vis dar neįmanoma visiškai pakeisti augaliniais baltymais. Kadangi akvakultūros gyvūnai negali gana efektyviai pasisavinti sintetinėmis aminorūgštimis papildytų pašarų, į aplinką patenka daugiau azoto atliekų, o tai sukelia ekologinį poveikį. Ilgos grandinės polinesočiosios riebalų rūgštys, tokios kaip DHR ir EPR, yra pagrindiniai ribojantys veiksniai augaliniuose aliejuose. Taip pat augalinės kilmės pašarai turi antinutrientų, galinčių neigiamai paveikti virškinamojo trakto mikrobiotą ir žuvų medžiagų apykaitą (Idenyi et al., 2022). Kita problema – apie 70 proc. fosforo augaliniuose pašaruose susijęs su fitatu, o tai kelia eutrofikacijos riziką, blogina baltymų virškinamumą ir didina azoto išsiskyrimą.

Šalutiniai produktai kaip akvakultūros pašaras

Žuvų perdirbimo šalutiniai produktai. Kasmėt pasaulyje išmetamų žuvų perdirbimo atliekų kiekis sudaro apie 25 proc. visos jūrų žvejybos produkcijos. Tai sudaro daugiau kaip 20 mln. tonų visame pasaulyje ir apie 5 mln. tonų per metus ES (Shahin et al., 2023). Apie 25–35 proc. žuvų miltų gaunama iš žuvų perdirbimo atliekų, o apie 70 proc. – iš žvejybos laimikių. Tačiau šių atliekų surinkimas dažnai laikomas ekonomiškai neefektyviu dėl logistinių ir techninių apribojimų (Sarker, 2023).

Svarbiausias šių šalutinių produktų panaudojimo būdas – jų įtraukimas į gyvulininkystės ir akvakultūros pašarų sudėtį. Pagal ES reglamentą 1069/2009, žuvų ir akvakultūros šalutiniai produktai patenka į 3-iąją kategoriją, kuri leidžia juos naudoti gyvūnų mityboje, atsakingai prisidedant prie aplinkos apsaugos ir visuomenės sveikatos (Gasco et al., 2020). Nereikalingas žvejybos šalutines medžiagas galima naudoti FMFO gamyboje (Li et al., 2019). Fermentinė žvejybos atliekų hidrolizė – dar vienas metodas gaminti baltymų hidrolizatus žuvis (Gasco et al., 2020).

Viename tyrime (Warwas, 2023) trys skirtingi žuvų perdirbimo šalutiniai produktai (filė ir nuopjovos) buvo panaudoti tiesiogiai upėtakių pašaruose, neatskyrus riebalų ir baltymų frakcijų. Tyrimas parodė, kad jų tinkamumas priklauso nuo laikymo sąlygų ir apdorojimo. 50 proc. šviežių ančiuvų nuopjovų įtraukimas į pašarus pagerino žuvų augimą, pašarų suvartojimą



ir palaikė žarnyno sveikatą. Bet yra ir trūkumų – baltymų ir nepakeičiamų aminorūgščių kiekis, higienos problemos, ribotas galiojimo laikas bei ES nustatyti apribojimai (Reglamentas (EB) Nr. 1069/2009), draudžiantys naudoti tos pačios rūšies žuvų atliekas jų pašaruose (Gasco et al., 2020).

Maisto atliekos. Maisto atliekos taip pat gali būti naudojamos kaip baltymų šaltinis akvakultūros pašarams (Shahin et al., 2023). Jos apima žalią ir virtą maistą bei perdirbtus maisto likučius. Žinoma, kad kasmet susidaro apie 1,5 mlrd. tonų žmonių maisto likučių – tai sudaro apie trečdalį viso kasmet pagaminamo maisto. Nors ne visoms akvakultūros rūšims šios atliekos tinka, jos gali būti panaudojamos kai kurioms visaėdėms rūšims, pavyzdžiui, tilapijoms (Nasser et al., 2018), bei žemose trofinėse grandyse esančioms žuvis – žolėms karpiams ar kefalėms (Mo et al., 2014). Laikantis ES maisto saugos politikos „atsargumo principo“, maisto atliekų naudojimas maistui skirtoms žuvis ar vabzdžiams auginti šiuo metu draudžiamas (Fowles & Nansen, 2020).

Vienaląsčiai organizmai / baltymai

Tokie mikroorganizmai kaip mikrodumbliai, jūrų dumbliai (makrodumbliai), mielės, grybai, bakterijos ir kiti alternatyvūs komponentai turi reikšmingą potencialą akvakultūros pašaruose dėl baltymų / aminorūgščių, lipidų ar omega-3 šaltinių. Didėjant šių mikroorganizmų naudojimui akvakultūroje kartu su technologinėmis naujovėmis, taip pat bus galima sumažinti akvakultūros pašarų poveikį aplinkai (Sarker, 2023). Šie vienaląsčiai organizmai laikomi tvariu pašaro šaltiniu, nes greitai auga, sunaudoja labai mažai gėlo vandens ir jiems augti nereikia žemės ūkio paskirties žemės (Albrektsen et al., 2022).

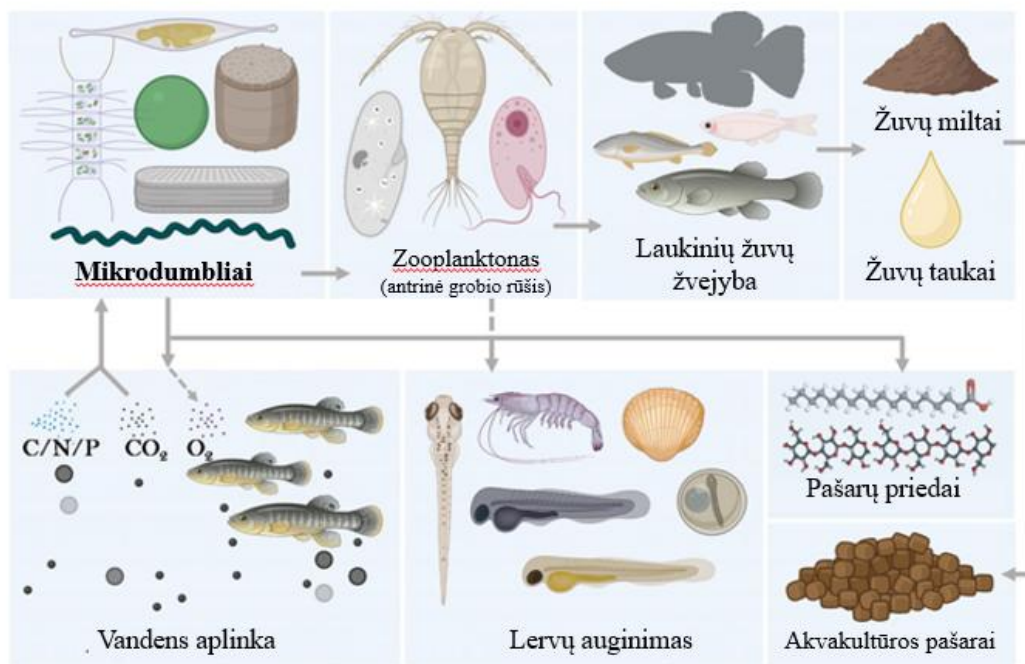
Mikrodumbliai (fitoplanktonas). Akvakultūroje mikrodumbliai atlieka svarbų vaidmenį tiek dėl poveikio vandens aplinkai, tiek kaip maisto medžiagų šaltinis (Wu & Hu, 2023). Mikrodumblių rūšys sudaro mažiau nei 1 proc. Žemės fotosintetinančios biomasės, tačiau prisideda prie maždaug 50 proc. viso biogeninio anglies fiksavimo pasaulyje (Field et al., 1998). Taip yra todėl, kad pasaulinė fitoplanktono populiacija atsinaujina vidutiniškai kas 2–6 dienas (Behrenfeld et al., 2006). Be to, mikrodumbliai yra turtingi omega-3 riebalų rūgščių (PNRR), karotenoidų, nepakeičiamų aminorūgščių, β -1–3-gliukano, mineralų ir vitaminų.

Mikrodumblių baltymai ir aliejai taip pat gali pakeisti ŽMT akvakultūros pašaruose. Mikrodumblių žaliųjų baltymų kiekis siekia 50–70 proc. (Nagappan et al., 2021; Ma & Hu, 2023). Kadangi mikrodumbliai gali patys sintetinti visas aminorūgštis, jų aminorūgščių sudėtis yra puikiai subalansuota akvakultūros gyvūnų mitybai (Becker et al., 2013). Bendras mikrodumblių lipidų kiekis gali siekti iki 45–60 proc. sausos ląstelės masės (Ahmad et al., 2022). Mikrodumbliai taip pat gali sintezuoti omega-3 riebalų rūgštis, todėl jie gali patenkinti akvakultūros gyvūnų būtinų riebalų rūgščių poreikį.

Pradėjus pramoniniu mastu gaminti mikrodumblius, jų naudojimas akvakultūros pašaruose sparčiai plinta. Iš jūrų mikrodumblių rūšių *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis* sp. ir *Schizochytrium* sp. laikomi perspektyviais akvakultūros pašaruose. Teigiama, kad *Isochrysis*



sp. mikrodumbliai gali būti gera ŽMT alternatyva vaivorykštinių upėtakių mityboje ir naudojami kaip omega-3 bei DHR papildai (Sarker et al., 2020). Pastaruoju metu kai kurios akvakultūros pašarų gamybos įmonės pradėjo gaminti DHR turtingą aliejų iš *Schizochytrium* sp. lašišų pašarams (Tocher et al., 2020). Tačiau labai didelės mikrodumblių gamybos sąnaudos šiuo metu riboja jų plačiai paplitusį naudojimą akvakultūroje (Nagappan et al., 2021).



4.2 pav. Mikrodumblių vaidmuo akvakultūroje (pagal Wu & Hu, 2023; sukurta Biorender.com)

Jūrų dumbliai (makroplanktonas). Beveik pusė pasaulinės jūrų dumblių (makrodumblių) akvakultūros produkcijos vertė viršija 11 milijardų JAV dolerių. Šiandien daugiau kaip 99 proc. jūrų dumblių auginama Azijoje, nors pastaruoju metu augana ir Afrikoje (FAO, 2020). Didžioji dalis dumblių – tai plunksninės undarijos (*wakame*), naudojamos žmonių mitybai.

Pastaraisiais metais jūrų dumbliai įgijo reikšmės dėl bioremediacijos savybių, kurios padeda užtikrinti tvarų gamybos procesą. Dumblių maistinė vertė skiriasi priklausomai nuo rūšies (raudonieji, žalieji ar rudieji) bei sezono: raudonuosiuose dumbliuose baltymų kiekis svyruoja nuo 6 iki 38 proc., žaliuosiuose – nuo 3 iki 35 proc., o ruduosiuose – nuo 2 iki 17 proc. Lipidų kiekis atitinkamai siekia <1–13 proc., <1–3 proc. ir <1–10 proc. (Nagappan et al., 2021). Dauguma rūšių turi baltymų, turtingų nepakeičiamų aminorūgščių, ir daug omega-3 (ilgosios grandinės polinesočiųjų riebalų rūgščių). Didžiąją dalį dumblių sudaro angliavandeniai – nuo 15 iki 65 proc., priklausomai nuo rūšies. Žalių skaidulų (polisacharidų) kiekis siekia 25–75 proc. sausos masės, tačiau šias skaidulas plėšriųjų rūšių žuvis sunkiai virškina.



Tyrimai rodo, kad jūrų dumblių, pakeitusių žuvų miltus, maži kiekiai (<10 proc.) pagerina augimo rezultatus ir pigmentaciją (Ragaza et al., 2021). Jei dumblių kiekis pašaruose viršija 10 proc., pastebimas augimo sumažėjimas ir virškinimo pablogėjimas (Qiu et al., 2018). Kad jūrų dumbliai galėtų tapti alternatyva žuvų miltams, jie turėtų būti biologiškai perdirbami, kad būtų galima išskirti ir koncentruoti baltymus (Aasen et al., 2022). Kita perspektyvi bioperdirbimo technologija – fermentacija (Ang et al., 2021). Tačiau šie procesai dar tik tobulinami, o dabartinis ES reglamentas Nr. 68/2013 leidžia naudoti tik džiovintus ir sumaltus dumblius pašarams be papildomo patvirtinimo.

Mielės. Dėl didelio žalių baltymų kiekio (30–60 proc.) mielės laikomos alternatyviu pašarų šaltiniu akvakultūroje. Akvakultūros pašaruose kaip baltymų komponentai daugiausia gali būti naudojami *Saccharomyces cerevisiae*, įvairūs *Aspergillus* ir *Fusarium venenatum*, taip pat kitos padermės, pavyzdžiui, *Candida utilis*, *Candida*, *Hansenula*, *Pichia*, *Torulopsis* ir *Kluyveromyces marxianus* (Jones et al., 2020; Glencross et al., 2020). Mielės, daugiausia *Saccharomyces cerevisiae*, davė teigiamų rezultatų, pasižyminčių naudingu imunostimuliuojamuoju poveikiu, dažniausiai iš dalies pakeičiant žuvų miltus lašišų racione. Jūrinėse mielėse (*C. sake*) yra 55 proc. baltymų ir nemažai omega-3 riebalų rūgščių. Be to, *C. sake* lengvai virškinamos upėtakių, jų galima naudoti net iki 20 proc. viso pašaro sudėties be neigiamo poveikio (Warwas, 2023).

Bakterijos. Bakterijų privalumas – jos greitai auga ant organinių substratų, tokių kaip metanas, metanolis, anglies dioksidas, vandenilis ir cukrus (Matassa et al., 2020). Iš kai kurių bakterijų padermių galima gauti labai didelį žalių baltymų (maždaug 60–82 proc. sausos ląstelės masės) ir nepakeičiamų aminorūgščių kiekį (Ritala et al., 2016). Bakterijų biomasėje yra vidutiniškai 60 proc. baltymų ir apie 10 proc. riebalų, panašiai kaip žuvų miltuose (Albrektsen et al., 2022). Neseniai nustatyta, kad įtraukus purpurinių bakterijų, tokių kaip *Rhodopseudomonas palustris* ir *Rhodobacter capsulatus*, kurios yra naujas atsirandantis mikrobinis baltymų šaltinis, pagerėja krevečių augimo rodikliai, pašarų konversijos santykis ir atsparumas ligoms bei stresui (Alloul et al., 2021). Be to, šių purpurinių fototrofinių bakterijų, pagamintų naudojant nuotekas, kiekis gali būti naudojamas iki 66 proc. žuvų miltų jūrinių ešerių racione be jokio neigiamo poveikio žuvų produktyvumui (Delamare-Deboutteville et al., 2019). Nepaisant šio potencialo, bakterinių baltymų naudojimą stabdo aukšta kaina ir ribotas priėmimas pasaulyje (Sarker et al., 2023).

Vabzdžiai akvakultūros pašaruose

Akvakultūros pašarų pramonė ieško alternatyvų ŽMT. Šiame kontekste vabzdžiai gali būti tvarus baltymų šaltinis akvakultūrai, naudojant maisto atliekas. Nustatyta, kad iš maždaug 1 milijono žinomų vabzdžių rūšių pasaulyje bent 16 gali būti naudojamos kaip alternatyvūs baltymų šaltiniai akvakultūroje (Guerreiro et al., 2020). Aštuonios vabzdžių rūšys parodė labai perspektyvius rezultatus (Alfiko et al., 2022). Tokios rūšys kaip šilkverpis (*Bombyx mori*), juodoji kareivinė musė (*Hermetia illucens*), naminė musė (*Musca domestica*), miltuotis



(*Tenebrio molitor*) ir svirpliai yra svarbiausios. Teigiama, kad šios vabzdžių rūšys turi daug žalių baltymų (42–60 proc.) ir pagal nepakeičiamų aminorūgščių sudėtį lyginamos su žuvų ir sojų miltais (Allegretti et al., 2017). Vabzdžių pagrindu pagamintų pašarų pranašumas – ne tik turimų maistinių medžiagų kiekis, bet ir mažesnis poveikis aplinkai dėl didelio atliekų pavertimo efektyvumo ir šalutinių produktų pavertimo vertingais pašarais.

Tyrimu nustatyta, kad jūrinė musė (*Coelopa frigida*) gali būti auginama rudųjų jūržolių ūkyje naudojant nuotekų vandenyje, o jos lervos gali pakeisti 40 proc. žuvų miltų racione, nesukeliant neigiamo poveikio vaivorykštinių upėtakių augimui ir žarnyno sveikatai (Warwas, 2023). Tyrimuose buvo testuojami skirtinguose vabzdžių vystymosi etapuose – lervų, lėliukių ir suaugėlių – pagaminti pašarai. Nustatyta, kad juodoji kareivinė musė ypač tinka naudoti kaip vabzdžių miltai vaivorykštiniais upėtakiais (*Oncorhynchus mykiss*) ir atlantinėmis lašišoms (*Salmo salar*) (Lock et al., 2018).

Europos Komisija taip pat patvirtino vabzdžių įtraukimą į vandens organizmų racioną (Reglamentas 2017/893/EB, 2017), todėl Europoje įkurta daug įmonių skirtingų vabzdžių rūšims auginti (Mancuso et al., 2019).

Žemo trofinio lygmens jūriniai gyvūnai

Ypatingo susidomėjimo dėl jų potencialo pakeisti ŽMT sulaukia tokie jūriniai gyvūnai kaip midijos, amfipodai ir daugiašerės kirmėlės (*Policheta*). Šie žemo trofinio lygmens organizmai maitinasi pirminiais gamintojais – fitoplanktonu, bakterijomis, dumbliais – bei organinėmis jūrų aplinkos atliekomis.

Žalioji midija (*Perna viridis*) ir mėlynoji midija (*Mytilus edulis*) yra filtruojantys moliuskai, jie sudaro apie 56 proc. visos jūrinių gyvūnų akvakultūros produkcijos (FAO, 2020). Midijos laikomos bioremediatoriais, klestinčiais maistingųjų medžiagų turtingoje aplinkoje ir paverčiančiais atliekų medžiagas baltymais be papildomo šėrimo. Jos sausos masės pagrindu turi 50–70 proc. baltymų ir 5–16 proc. lipidų, panašiai kaip žuvų miltai (Jusadi et al., 2021). Pagrindinė rizika – didelė sunkiųjų metalų kaupimosi tikimybė (Rasidi et al., 2021).

Jūriniai amfipodai – tai daugiau kaip 10 000 rūšių turinti mažų, dažniausiai dugne gyvenančių vėžiagyvių būrio grupė. Jie gali būti naudojami kaip alternatyvus gyvojo pašaro šaltinis galvakojų, krevečių ir jūrų arkliukų akvakultūroje, taip pat kaip dalinis žuvų miltų pakaitalas žuvų ir vėžiagyvių akvakultūroje (Ashour et al., 2021). Amfipodai pasižymi dideliu baltymų, PNRR (EPR, DHR) ir aminorūgščių kiekiu.

Policheta – tai visame pasaulyje paplitusios daugiašerės kirmėlės, gyvenančios dugne ir veikiančios kaip bioremediatoriai, besimaitinančios dumbliais ir pūvančiomis organinėmis medžiagomis. Jos yra svarbus komerciškai svarbių žuvų ir vėžiagyvių grobis (Khan et al., 2018). Tradiciškai jos naudojamos kaip gyvas masalas žvejyboje arba kaip aukštos kokybės maistas specialiuose racionuose (Pombo et al., 2020). *Policheta* turi daug baltymų (55–60 proc. sausos masės), lipidų (12–28 proc. sausos masės) ir PNRRs, taip pat jose gerai subalansuota aminorūgščių, vitaminų ir mineralų sudėtis (Wang et al., 2019).



4.1 lentelė. Kokybinis alternatyvių akvakultūros pašarų sudedamųjų dalių potencialo vertinimas (pagal Shahin et al., 2023)

Alternatyva	Maistinė sudėtis	Tvarumas			Vartotojų požiūris	Komercinis įgyvendinamumas
		Aplinkosauginis	Ekonominis	Socialinis		
Žir G šalutiniai produktai	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Maisto atliekos	↓	↑	↓	↓	↓	↓
Vabzdžiai	↑	↑	↑	↑	↔	↑
Vienaląsčiai organizmai	↑	↑	↓	↑	↑	↓
Jūrų dumbliai	↓	↑	↓	↑	↑	↓
Žemo trofinio lygmens jūriniai gyvūnai	↑	↑	↓	↑	↑	↔

↑ – didelis potencialas / teigiama įtaka; ↓ – ribotas potencialas / neigiama įtaka; ↔ – mišri arba neutrali vertė.

2.2. Akvakultūros pašarų poveikio aplinkai mažinimas

Akvakultūros sektoriuje pašarai sudaro apie 40–60 proc. visų kaštų, o baltymai (žuvų miltai) yra brangiausia maistinė medžiaga. 70 proc. vandens organizmų poreikiams tenkinti sunaudojamo ŽMT gaunama iš žvejybos. Ši situacija dar labiau didina spaudimą žvejybos ištekliams ir kelia grėsmę jų tvarumui.

Akvakultūra ir tvarumo klausimai

Akvakultūros tvarumas gali būti nagrinėjamas trijų pagrindinių dimensijų – ekonominės, aplinkosauginės ir socialinės – požiūriu (Odeja, 2021).

Esminės strategijos, leidžiančios vertinti mitybos ir aplinkos tvarumą akvakultūroje, grindžiamos trimis pagrindiniais kriterijais (Sarker et al., 2023):

1. **Pašarų komponentų virškinamumas.** Pašarų ingredientų virškinamumas yra svarbus parametras, leidžiantis gaminti ekonomiškai efektyvius ir aplinkai tvarius pašarus. Įvertinus pašarų virškinamumą, galima sumažinti jų kaštus ir maistinių medžiagų (pavyzdžiui, fosforo ir azoto) išskyrimą į aplinką, taip prisidedant prie eutrofikacijos mažinimo bei gerinant pašarų konversijos rodiklius.

2. **Pašarų konversijos koeficientas (FCR).** Ekonominis alternatyvių pašarų pranašumas dažnai siejamas su mažesniu pašarų konversijos koeficientu. PKK yra puikus aplinkosauginio našumo rodiklis, nes atspindi fosforo ir azoto atliekų kiekį, galintį prisidėti prie eutrofikacijos, ŠESD emisijos, biologinės įvairovės nykimo ir kito neigiamo poveikio ekosistemoms. Pažymėtina, kad PKK akvakultūroje sumažėjo nuo ~3 iki ~1,35, o lašišų ūkiuose – nuo ~2–2,25 iki ~0,9–1,2, daugiausia dėl geresnių pašarų gamybos sprendimų nuo 1970 m. (Sarker et al., 2023).



3. Gyvavimo ciklo vertinimas (angl. „Life Cycle Assessment“, GCV). GCV yra metodas, leidžiantis išmatuoti maisto sistemų ir akvakultūros poveikį aplinkai. Jo pagalba vertinamos tokios kategorijos kaip tvarių pašarų kūrimas, alternatyvių ingredientų panaudojimas, efektyvus išteklių (žemės, vandens, trąšų) naudojimas, emisijos, susijusios su pasauliniu atšilimu, eutrofikacija, biologinės įvairovės nykimas, išoriniai neigiami padariniai, pavyzdžiui, vandenynų rūgštėjimas. GCV taikymas yra svarbus vertinant naujų baltymų ir riebalų alternatyvų poveikį ŽMT pakeitimui pašaruose.

Akvakultūros pašarų gamybos tvarumas

Pašarų gamyba sudaro didžiausią dalį tiek aplinkosauginio, tiek ekonominio šiuolaikinės akvakultūros poveikio, todėl tvari akvakultūra įmanoma tik naudojant tvarius pašarus (Warwas, 2023). Europos Komisijos naujose gairėse akvakultūra įtraukta į „Nuo ūkio iki stalo“ („Farm to Fork“) strategiją, kuria siekiama paspartinti perėjimą prie tvarios maisto sistemos Europoje. Šioje strategijoje pabrėžiama, kad tvari akvakultūra gali padėti tiekti maistą ir pašarus su mažu anglies pėdsaku, taip pat sukurti darbo vietų ir ekonominių galimybių (Odeja, 2021).

Be to, Europos Komisija rekomenduoja, kad pašarų gamintojai mažintų priklausomybę nuo ŽMT, gautų iš laukinės žvejybos, ir vietoj jų naudotų alternatyvius baltymų šaltinius, tokius kaip dumbliai, vabzdžiai ar kitų pramonės šakų atliekos. Tačiau šiandien daugelyje komercinių akvakultūros pašarų vis dar yra daug ŽMT. Prognozuojama, kad ŽMT paklausa gali viršyti mažų žuvų pasiūlą jau iki 2037 m., o tai rodo, jog pramoniniai pašarai ilgalaikėje perspektyvoje nėra tvarūs (Smárason, 2023).

Norint apsaugoti jūrines ekosistemas ir sumažinti vandenynų išteklių eikvojimą, būtina, kad akvakultūros pašarai būtų tvarūs. Nors pagrindiniai alternatyvūs pašarų ingredientai šiandien apima sojų ir kukurūzų pagrindu sukurtus produktus, jų gamyba kritikuojama dėl netvarumo ir prasto virškinamumo. Dėl šios priežasties vis didesnę svarbą įgyja žiedinė bioekonomika, kuri gali lemti tvarią pašarų pramonės ateitį (Bunting, 2021).

3. Šėrimo valdymo strategijos

3.1. Tikslusis ir prisitaikantis šėrimas

Inovatyvūs metodai, tokie kaip lankstus sudėtinių dalių keitimas, fermentai, optimizuotos mikrobiotos ir genetika, vaidina svarbų vaidmenį siekiant tikslinio mitybos pritaikymo įvairioms akvakultūros rūšims. Tikslusis šėrimas reiškia tokių pašarų sudarymą, kurie atskleistų žuvų ir vėžiagyvių DNR, mikrobiotos ir metabolinių reakcijų potencialą, siekiant užkirsti kelią ligoms ir užtikrinti efektyvų augimą (Howell, 2022).

Šėrimas mikrobiotos pagrindu

Žarnyno mikrobiota vis dar išlieka tarsi „juodoji dėžė“ akvakultūros mitybos srityje. Per pastaruosius penkerius metus išaugo mokslinių tyrimų, nagrinėjančių žarnyno mikrobiotos



vaidmenį akvakultūroje, skaičius. Naujos genetinio sekoskaitos technologijos leido identifikuoti žarnyno mikrobiotos bendrijas daugiau kaip 20 akvakultūroje auginamų žuvų rūšių. Ateityje daugiau dėmesio bus skiriama ne tik mikroorganizmų buvimui, bet ir jų funkcijoms bei poveikiui žuvų žarnyne. Tokie tyrimai padės atskleisti ryšį tarp mikrobinės įvairovės ir metabolitų gamybos bei nustatyti pagrindinius žarnyno sveikatos rodiklius. Dėmesys mikrobiotos funkcijai taip pat prisidės prie maistinių medžiagų virškinamumo ir žuvų augimo gerinimo (Howell, 2022).

Genetikos ir mitybos sankirtoje vis dažniau selekcijos tikslai apima ne tik atsparumą ligoms ar greitesnį augimą, bet ir efektyvesnį maistinių medžiagų įsisavinimą, todėl tikslinio šėrimo metodai pagal genetines savybes įgyja didelę reikšmę.

Šėrimas, paremtas grynąja energija (GE)

Kita tiksliojo šėrimo raidos kryptis apima ne tik ŽMT keitimą alternatyvomis, bet ir visų pašarų ingredientų naudojimą lanksčiai ir tvariai. Akvakultūroje pašarų gamyba daugiausia remiasi virškinamąja energija (VE), tačiau tai nėra tikslus rodiklis, nes žuvims sunkiau nei sausumos gyvūnams įvertinti ne išmatų energijos nuostolius. Tad jei būtų galima naudoti metabolinę energiją (ME) ar grynąją energiją (GE), tai suteiktų reikšmingų privalumų (Groot et al., 2021). Virškinamosios energijos sistema remiasi prielaida, kad visi makronutrientai naudojami vienodai, o grynosios energijos modelis skiria skirtingą energinę vertę baltymams, riebalams ir angliavandeniams. Pastaraisiais metais akvakultūros mitybos specialistai gana sėkmingai plėtojo GE modelius įvairioms žuvų rūšims (Howell, 2022). Kadangi pašarų poveikį aplinkai daugiausia lemia jų sudėtinės dalys, galima sumažinti neigiamą poveikį gaminant aplinkai draugiškesnius mišinius (Wilfart et al., 2023). Kai kurie tyrimai jau integravo šiuos kriterijus į pašarų gamybą (Mackenzie et al., 2016). Pašarų sudarymas pagal ekonominius ir aplinkosaugos kriterijus laikomas inovatyviu sprendžiant gyvulininkystės sektoriaus iššūkius (Garcia-Launay et al., 2018).

Daugiafunkcis (DF) pašarų formavimas

Daugiafunkcis (DF) pašarų formavimas, kuriuo siekiama suderinti mažesnes sąnaudas ir mažesnį poveikį aplinkai, laikomas perspektyviu sprendimu akvakultūros poveikiui mažinti (Wilfart et al., 2023). Garcia-Launay ir kt. (2018) sukūrė daugiafunkcį formavimo modelį, kuris remiasi mažiausių sąnaudų formavimu (atsižvelgiant į maistinių medžiagų ir ingredientų apribojimus), bet įtraukia ir poveikį aplinkosaugai (pavyzdžiui, klimato kaita, nerenovuojamos energijos naudojimas, P poreikis, žemės naudojimas). Vis dėlto žuvų augimą gali reikšmingai paveikti pašarų ingredientų rūšis. Pavyzdžiui, pakeitus visus ŽMT augaliniais ingredientais, vaivorykštinių upėtakių augimas sumažėjo 30 proc. (Lazzarotto et al., 2018). DF formavimas vyksta dviem etapais: pirmiausia nustatoma pagrindinė formulė pagal sąnaudas ir potencialų poveikį, o antrame etape minimizuojama DF funkcija, kurioje įtraukti normalizuoti ekonominiai ir aplinkosaugos rodikliai. Šis metodas buvo išbandytas kiaulių, paukščių ir mėsinių galvijų pašarų gamyboje, daugeliu atvejų aplinkos poveikis sumažėjo 2–48 proc., o



kaina išaugo nežymiai (1–7 proc.). Šis modelis laikomas naudingu įrankiu mažinant akvakultūros poveikį aplinkai nepabloginant žuvų produktyvumo ar smarkiai nedidinant gamybos kaštų (Wilfart et al., 2023).

3.2. Išankstinio apdorojimo technologijos ir fermentuoti pašarai, skirti akvakultūrai

Augalinės kilmės pašarai dažnai naudojami kaip pagrindinis baltymų šaltinis akvakultūros pašaruose dėl jų didelio prieinamumo ir mažos kainos. Tačiau jie dažniausiai turi daug nestruktūrinių polisacharidų (NSP), kurie riboja jų naudojimą, ypač plėšriųjų žuvų pašaruose. Be to, augaliniai pašarai dažnai pasižymi nedideliu skanumu, nesubalansuotu aminorūgščių profiliu ir turi antinutrientinių medžiagų (ANM), kurios riboja jų virškinamumą bei didina išmatų kiekį. Todėl efektyvus šių ingredientų naudojimas akvakultūroje yra itin svarbus.

Pašarų fermentacija – tai ekonomiškai efektyvus technologinis procesas, leidžiantis sumažinti ANM kiekį, kartu pagerinant maistinių medžiagų įsisavinimą ir įvairių biologiškai aktyvių junginių gamybą. Taip didinama pašarų ingredientų maistinė vertė akvakultūroje. Kietosios fazės fermentacijai būdingas mikroorganizmų, tokių kaip siūliniai grybai, naudojimas – jie geba efektyviai įsiskverbti į substratą dėl mažo laisvojo vandens kiekio ir hifų augimo (Šelo et al., 2021). Fermentacijai gali būti naudojami tokie mikroorganizmai kaip *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* ir *Bacillus licheniformis* tiek kietosios, tiek drėgnosios fermentacijos sąlygomis. Šie organizmai gamina įvairius fermentus, tokius kaip fitazės, lipazės, proteazės ir angliavandenius skaidantys fermentai (pavyzdžiui, celiulazės, ksilazės). Grybai ypač efektyviai praturtina lignoceliuliozinius substratus mikrobiniiais baltymais ir fermentais. Taip sumažinamas žalios ląstelienos kiekis ir padidinamas bendras baltymų kiekis, jų tirpumas bei baltymų ir skaidulų virškinamumas (Godoy et al., 2018). Visa tai reikšmingai padidina augalinių pašarų, naudojamų akvakultūroje, maistinę vertę. Jeigu gaminami kietosios fazės fermentuoti pašarai, fermentuotas mišinys džiovinamas aplinkoje ir temperatūroje, kuri nekenkia maistinėms medžiagoms (Vieira et al., 2023; Zengin et al., 2022).

4. Vandenynų rūgštėjimo poveikio mažinimas

Vandenynai yra natūralios karbonatinės buferinės sistemos, todėl jie sugeria didelius anglies kiekius – daug didesnius nei atmosfera ar sausuma. Vandenynai veikia kaip buferis, neutralizuojantis nedidelius sudėties pokyčius. Tačiau kai padidėja atmosferos CO₂ koncentracija, daugiau jo ištirpsta vandenyne, todėl šis tampa rūgštesnis (Ebenezar et al., 2023). Šis procesas mažina jūros vandens pH, karbonato jonų koncentraciją ir kalcio karbonato (CaCO₃) mineralų kiekį, o tai sukelia vadinamąjį vandenynų rūgštėjimą (Reid et al., 2019).

Vienu metu padidėjus CO₂ (sumažėjus pH ir aragonito prisotinimui) ir temperatūrai, kartu keisis druskingumas ir kai kuriais atvejais sumažės deguonies kiekis (Boyd et al. 2015).



Vandenynų rūgštėjimas ir temperatūra yra tarpusavyje susiję. Atsižvelgiant į galimą neigiamą sinergiją, temperatūros didėjimas laikomas vandenynų rūgštėjimo „blogąja dvyne“. Didėjantis rūgštingumo lygis jūros vandenyje taip pat neigiamai veikia vandens rūšių fiziologiją ir medžiagų apykaitą, nes sutrinkdami tarpląsteliniai pernašos mechanizmai. Nustatyta, kad lervų, patekusių į žemesnio pH jūros vandenį, skrandžio pH yra žemesnis, todėl sumažėja virškinimo efektyvumas ir suvartojama daugiau maisto (Stumpp et al., 2013). Dėl šilto klimato sąlygų vandenyje taip pat sumažėtų deguonies kiekis ir sumažėtų fitoplanktono. Planktonas atlieka svarbų vaidmenį švelninant pasaulio klimatą, nes sugeria išmetamą CO₂ kiekį. Fitoplanktonas sudaro pusę pasaulinės fotosintezės ir didele dalimi užkerta kelią pasauliniam atšilimui (Huertas et al., 2011).

4.1. Buferinės medžiagos pašaruose

Buferinių medžiagų įtraukimas į pašarų receptūras padeda neutralizuoti vandenyno rūgštėjimo poveikį akvakultūros rūšių virškinimo fiziologijai. Pašarų mišiniuose esančios buferinės medžiagos neutralizuoja arba stabilizuoja virškinamojo trakto pH ir sudaro optimalias sąlygas pasisavinti maistines medžiagas.

Buferinės medžiagos yra:

- *Dumbliai*: mažina vandenynų rūgštėjimą ir kompensuoja išmetamųjų teršalų kiekį. *Jūros dumbliai* taip pat mažina vandenynų rūgštėjimą, nes iš vandens šalina anglies dioksidą ir veikia kaip vietinis buferis, naudingas daugeliui jūrų rūšių. Jūrų dumbliai taip pat gamina deguonį, todėl mažina negyvų zonų plitimą vandenyje. Didelio masto jūrų dumblių auginimas taip pat tiriamas kaip priemonė anglies dioksido iš vandenyno gelmių šalinti ir angliai kaupti (NOAA Fisheries, 2022).
- *Neorganiniai buferiai*: tai dažniausiai tokie junginiai kaip natrio bikarbonatas (NaHCO₃), kalcio karbonatas (CaCO₃) arba magnio hidroksidas (Mg(OH)₂), kurie paprastai naudojami pH stabilumui palaikyti.
- *Organiniai buferiai*: citrinų rūgšties druskos (pavyzdžiui, natrio citratas) arba organinės rūgštys (pavyzdžiui, skruzdžių arba pieno rūgštys) taip pat gali būti buferinės medžiagos. Jų buferinės savybės paprastai yra specifiskesnės, be to, jos gali palaikyti žarnyno sveikatą veikdamos mikrobų bendruomenes.
- *Fitocheminės medžiagos ir augalinės kilmės buferinės medžiagos*: kai kurie augalai gamina junginius, kurie natūraliai gali buferizuoti pH lygį ir suteikti papildomos naudos, pavyzdžiui, antioksidacinių savybių ar priešuždegiminio poveikio. Jie gali būti naudingi ekologinėse arba tvariose akvakultūros sistemose.

Apibendrinant galima daryti išvadą, kad buferinių medžiagų įtraukimas į akvakultūros pašarų sudėtį yra perspektyvi strategija mažinant vandenynų rūgštėjimo poveikį. Šis metodas ne tik padeda auginamų rūšių sveikatai ir augimui, bet ir didina akvakultūros sistemų atsparumą klimato kaitai.



4.2. Mitybos strategijos atsparumui rūgštėjimui didinti

Akvakultūroje atsparumo rūgštinėms sąlygoms didinimas yra svarbus klausimas, ypač atsižvelgiant į vandenynų rūgštėjimą, siekiant sukurti pašarų ir šėrimo strategijas tvariai akvakultūrai (Parker et al., 2024). Tai gali neigiamai paveikti jūros gyvūniją, ypač rūšis, kurių tinkamas augimas, vystymasis ir sveikata priklauso nuo stabilaus pH lygio, pavyzdžiui, žuvis, vėžiagyvius ir moliuskus. Reikėtų sukurti pašarų ir šėrimo strategijas, kuriomis būtų didinama ištvermė, atsparumas stresui ir gerinama sveikata.

Kai kurios šėrimo strategijos, skirtos rūgštėjimui mažinti, yra šios:

1. *Mineralų naudojimas*: mineralai reikalingi moliuskų ir vėžiagyvių kriauklių vientisumui palaikyti. Žemas pH gali turėti įtakos mikroelementų tirpumui vandenyje, todėl jų pridėjus į pašarus galima palaikyti žuvų ir vėžiagyvių sveikatą. Į pašarus pridėjus biologiškai prieinamų kalcio ir magnio formų, galima padėti šioms rūšims išlaikyti kriaukles ir tinkamai augti.

2. *Vitaminų vartojimas*: vitaminas E yra stiprus antioksidantas, padedantis apsaugoti ląsteles nuo oksidacinės žalos, kurią sukelia aplinkos veiksniai, įskaitant rūgštėjimą. B grupės vitaminai, tokie kaip B1 (tiaminas), B2 (riboflavinas) ir B12 (kobalaminas), atlieka svarbų vaidmenį energijos apykaitoje, nervų sistemos veikloje ir bendroje streso tolerancijoje.

3. *Esminės aminorūgštys ir riebalų rūgštys*: dėl vandenynų rūgštėjimo sukkelto streso gali pakisti medžiagų apykaita ir baltymų sintezė akvakultūros organizme. Tokiomis streso sąlygomis į racioną pridėjus aminorūgščių, pavyzdžiui, metionino, lizino ir treonino, galima palaikyti augimą, audinių atstatymą ir imunines reakcijas, jos yra būtinos uždegimui mažinti, imuninei funkcijai palaikyti ir bendram augimui skatinti. Akvakultūros racionų papildymas EPR ir DHR gali padėti sušvelninti kai kuriuos neigiamus fiziologinius rūgštėjimo padarinius.

4. *Probiotikai ir prebiotikai*: esant pH pokyčiams, patiriamas stresas, todėl gali atsirasti žarnyno mikrobiomo disbalansas arba susilpnėti imunitetas. Prebiotikai taip pat gali pagerinti virškinimą ir bendrą sveikatą, nes jais maitinamos naudingosios žarnyno bakterijos. Skatinant sveikus mikrobiomus, akvakultūros rūšys gali geriau susidoroti su aplinkos poveikiu.

5. *Antioksidantai ir fitocheminės medžiagos*: rūgščioje aplinkoje reaktyviosios deguonies rūšys kaupiasi ir sukelia oksidacinį stresą. Pridėjus natūralių antioksidantų, pavyzdžiui, karotinoidų ir polifenolių, į pašarus gali sumažėti oksidacinė žala ir padidėti atsparumas.

5. Pašarų efektyvumo didinimas

5.1. Ekstruzijos ir perdirbimo technologijos apdorojimas

Ekstruzijos apdorojimas – tai metodas, kuriuo pašaro komponentai ar pats pašaras trumpai termiškai apdorojami veikiant aukšta temperatūra ir slėgiu. Taip pašalinami visi antimaistiniai veiksniai (ANF) ir padidinamas pašaro suvartojimas, maistinių medžiagų



virškinamumas, kartu ir žuvų augimas. Ekstruzijos būdu apdoroti ingredientai leidžia padidinti lipidų kiekį pašare, suželdinti krakmolą, pagerinti baltymų ir energijos virškinamumą. Ekstruzija taip pat svarbi akvakultūros gamyboje, nes teigiamai veikia fizinės pašaro savybės – mažina smulkumą, pagerina plūdrumą arba skendimo savybes.

Fermentų priedų naudojimas

Fermentų priedų naudojimas siekiant pagerinti pašarų ingredientų virškinamumą ir padidinti maistinių medžiagų įsisavinimą yra itin svarbus žuvininkystėje, ypač atsižvelgiant į augimo ir sveikatos išlaikymą kintančiomis aplinkos sąlygomis. Ypač svarbu į ekstruziniu būdu pagamintus pašarus įtraukti fermentų, kurie pagerina fosforo, angliavandenių ir baltymų virškinamumą, nes tai padeda mažinti žuvų išskiriamų teršalų kiekį ir didina aplinkos tvarumą.

Svarbu kurti pašarus, kurie padėtų išlaikyti virškinamumą net pasikeitus vandens temperatūrai, susijusiai su pasauliniu atšilimu. Kai vanduo atšąla, pašaruose esančių riebalų rūgščių lydymosi temperatūra padidėja, todėl riebalų virškinamumas sumažėja – tai blogina pašarų konversijos koeficientą (FCR). Šis poveikis žymiai ryškesnis šalto vandens sąlygomis nei šiltame vandenyje. Todėl būtina pagerinti bendrą riebalų virškinamumą, ypač naudojant lipazės fermentus (Howell, 2022). Proteazės fermentai gali skatinti endogenines peptidazes, pagerindami baltymų virškinimą ir hidrolizuodami baltyminės kilmės antimaistines medžiagas, tokias kaip lektinai, tripsino inhibitoriai, antigeniniai baltymai ir alergeniniai antinutrientiniai baltymai, pavyzdžiui, glicininas, β -konglicininas ir kafrinas (Cowieson, 2008). Naudojant augalinės kilmės pašarus, turtingus nekrakmolingų polisacharidų (NSP), tokius fermentus kaip ksilanazės, gliukanazės ir celiulazės galima panaudoti siekiant padidinti alternatyvių ingredientų maistinių medžiagų virškinamumą ir įsisavinimą (Sarker, 2023).

5.2. Funkciniai pašarų priedai

Funkciniai pašarų priedai – tai priedai, įtraukiami į pašarų sudėtį ne tik tam, kad būtų patenkinti pagrindiniai mitybos poreikiai, kaip įprastiniai pašarai, bet ir tam, kad pagerėtų akvakultūros organizmų augimas ir sveikata. Jų naudojimas akvakultūros pašaruose gerina žarnyno sveikatą, skatina naudingąsias žarnyno bakterijas, didina fermentų gamybą ir stimuliuoja apetitą – visa tai prisideda prie geresnių augimo rezultatų. Be to, šie priedai gali sumažinti neigiamą akvakultūros poveikį aplinkai, gerindami vandens kokybę ir alternatyvių baltymų panaudojimą pašaruose (Onomu & Okuthe, 2024).

Naudojant sausumos augalinės kilmės baltymus kaip dalinį ar visišką žuvų miltų pakaitalą, dažnai būtini pašarų papildai. Antibiotikai ir chemoterapiniai preparatai, naudojami akvakultūroje, gali sukelti antibiotikams atsparių bakterijų padermių atsiradimą ir sunaikinti natūralius mikroorganizmus, taip pat sukelti antibiotikų likučių susikaupimo problemų žuvininkystės produktuose, kurie vėliau vartojami žmonių. Kita vertus, probiotikai, prebiotikai ir fitogeniniai junginiai gali būti naudojami kaip funkciniai pašarų priedai ligų prevencijai ar sumažinimui ir šeimininko imuninei sistemai stiprinti (Van Doan et al., 2020). Vis dėlto vis dar trūksta informacijos apie funkcinis pašarų priedus akvakultūroje, ypač palyginti su kitų



gyvūnų šėrimu, taip pat nepakankamai ištyrinėtas jų ryšys su akvakultūros tvarumu (Onomu & Okuthe, 2024).

Funkcinių pašarų priedų tvarumo vaidmenys siejami su penkiais pagrindiniais jų poveikiais akvakultūrai:

- Geresnis pašarų naudojimas.
- Didesnis tvarių išteklių naudojimo efektyvumas.
- Didesnis atsparumas ligoms ir stipresnė imuninė sistema.
- Didesnis atsparumas parazitams.
- Geresnė vandens kokybė.

Probiotikai, prebiotikai ir simbiotikai

Naudingi mikroorganizmai ir prebiotiniai junginiai pašaruose palaiko žarnyno sveikatą, stiprina imuninę sistemą ir gerina bendrą pašarų panaudojimo efektyvumą esant klimato kaitos keliamiems stresoriams.

Probiotikai. Probiotikais vadinami gyvi pašarų priedai, kurie pagerina žarnyno mikrobinę pusiausvyrą šeimininko organizme (Fuller, 1989). Šios medžiagos prisideda prie augimo ar vystymosi, skatindamos pašarų suvartojimą, panaudojimą arba veikdamos gyvūnų imuninę sistemą (Demir et al., 2003). Probiotikai yra visame pasaulyje pripažintas funkcinis akvakultūros pašarų priedas. Nors egzistuoja daug probiotikų apibrėžimų, pavyzdžiui, „gyvi mikroorganizmai, kurie, vartojami pakankamais kiekiais, turi teigiamą poveikį šeimininko sveikatai“, šie apibrėžimai labiau tinka sausumos gyvūnams ir žmonėms nei vandens gyvūnams. Taip yra todėl, kad akvakultūroje mikroorganizmai ir žuvis egzistuoja toje pačioje aplinkoje – sąveika vyksta ne tik žarnyne, bet ir pačiame vandenyje (Onomu & Okuthe, 2024).

Atsparumas antibiotikams, pesticidams ir dezinfekcinėms medžiagoms vis labiau plinta tarp patogeninių bakterijų, todėl probiotikų tyrimai akvakultūroje tampa svarbia alternatyva antibiotikams, siekiant ekologiškos ir tvarios akvakultūros. Deja, augalinės kilmės ingredientai gali turėti neigiamą poveikį akvakultūros mitybai (Nielsen et al., 2022). Probiotikai stabilizuoja mikrobinę pusiausvyrą žuvų virškinimo trakte, šalindami patogeninius mikrobus ir didindami maistinių medžiagų virškinamumą bei biologinį prieinamumą (Oscar et al., 2020).

Akvakultūroje kaip probiotikai plačiai naudojamos bakterijos, mielės ir dumbliai. Probiotikų poveikis gali būti skirstomas į dvi grupes (Nathanailides et al., 2021):

- Žuvų augimo ir gerovės parametrai, įskaitant augimą, pašarų konversijos rodiklius, žarnyno mikrobiotą, imunitetą ir atsparumą patogenams.
- Aplinkos parametrai, įskaitant vandens kokybę tvenkiniuose ar rezervuaruose, mikrobiotos įvairovę.

Daugybė probiotikų mikroorganizmų buvo išskirti ir įvertinti dėl jų naudojimo infekcinių ligų prevencijai ir kontrolei. Dviejų tyrimų rezultatai, kuriuose buvo naudojami komerciniai probiotikai, parodė, kad jie pagerino reprodukcinius rodiklius, sumažino tiek



vaivorykštinių upėtakių patelių (Akbari Nargesi et al., 2020), tiek Nilo tilapijų (*Oreochromis niloticus*) (El-Kady et al., 2022) bendrą amoniako azoto kiekį ir padidino augimo rodiklius bei pašarų pasisavinimą.

Prebiotikai ir simbiotikai. Prebiotikai – tai nevirškinami pašarų priedai, daugiausia sudaryti iš oligosacharidų, kurie stimuliuoja naudingųjų mikroorganizmų augimą žarnyne, kartu gerindami šeiminko sveikatą (Bozkurt et al., 2014). Kad priedas būtų laikomas prebiotiku, jis turi pasiekti storąją žarną nepakitęs – atsparus skrandžio rūgštims, fermentų hidrolizei ir žarnyno absorbcijai (Davani-Davari et al., 2019). Prebiotikų nauda priklauso nuo fermentacijos metu bakterijų pagamintų šalutinių produktų. Pagrindiniai akvakultūroje naudojami prebiotikai yra manano oligosacharidai (MOS), fruktooligosacharidai (FOS), galaktooligosacharidai (GOS), arabinoksilanų oligosacharidai (AXOS), inulinas ir β -gliukanas.

Probiotikų maišymas su skirtingomis probiotikų padermėmis arba prebiotikais (simbiotikai) teikia didesnę naudą augimo ir sveikatos požiūriu nei naudojant juos atskirai. Manoma, kad simbiotinės kombinacijos papildo viena kitą, taip praplečiamas jų poveikio šeiminkui spektras (Puvanasundram et al., 2021). Widanarni ir kt. (2019) nustatė, kad MOS pridėjimas į *Artemia* sp. pašarus reikšmingai pagerino virškinimo fermentų aktyvumą, augimą, išgyvenamumą ir atsparumą *Vibrio harveyi* infekcijai. Aprūpinant baltąsias tigrines krevetes (*Litopenaeus vannamei*) 1,5 g/kg β -1.3 gliukanu ir fruktooligosacharidais, pagerėjo augimo rezultatai, antioksidacinis aktyvumas, nespecifinis imunitetas ir atsparumas ligoms (Eissa et al., 2023).

Fitogeniai. Fitogeniniai priedai – tai pašarų priedų grupė, gaunama iš augalų lapų, stiebų, šaknų, sėklų, gumbų, vaisių, krūmų ir prieskonių. Paprastai jie skatina apetitą, stiprina naudingąsias žarnyno bakterijas ir naudojami ūkiuose gyvuliams dėl antioksidacinių, antimikrobinių, antikancerogeninių, analgezinių ir antiparazitinių savybių. Kadangi juose yra aktyviųjų junginių, jie taip pat gali turėti toksinį poveikį. Jų savybės ir veiksmingumas labai skiriasi priklausomai nuo naudojamos augalo dalies, ekstrahavimo technikos ir koncentracijos, derliaus sezono bei geografinės vietovės (Onomu & Okuthe, 2024).

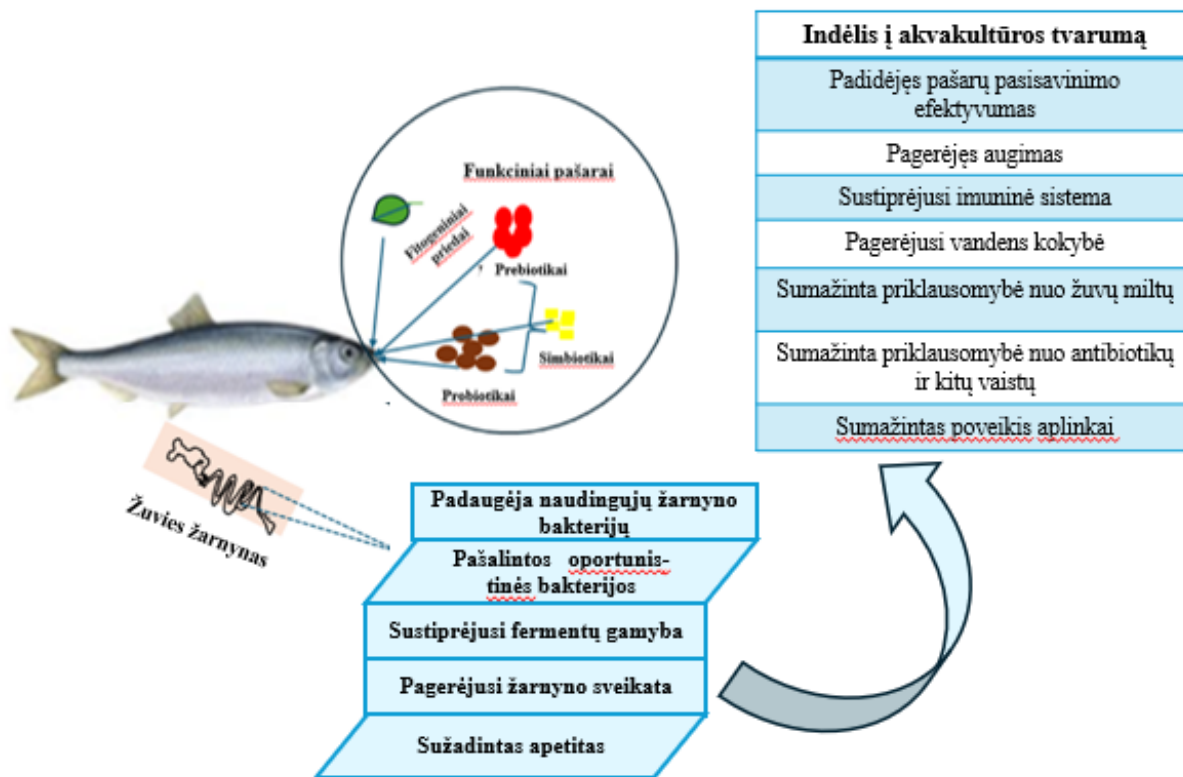
Viename tyrime du fitogeniniai pašarų priedai – vienas turtingas karvakrolio, kitas – timolio – pagerino vaivorykštinių upėtakių (*Oncorhynchus mykiss*) pašaro pasisavinimą, palyginti su kontroliniu racionu, bei padidino antioksidacinę apsaugą (Giannenas et al., 2012). Taip pat buvo reguliuota žarnyno mikrobinė bendrija – neigiamai paveikiant anaerobinius mikroorganizmus. Abdel-Latif ir kt. (2020) tyrė čiobrelių eterinio aliejaus (OEO) įtaką karpų (*Cyprinus carpio* L.) jaunikliams – žuvims, gavusioms OEO, buvo nustatyti reikšmingai pagerėję žarnyno morfometrijos rodikliai, palyginti su kontrole.



Funded by
the European Union



Skaitmeninė mėlynoji karjera įveikus anglies krizę – akvakultūros mokymo programos naujovės [DiBluCa]
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247



4.4 pav. Funkcinių pašarų priedų poveikis akvakultūroje (adaptuota pagal Onomu & Okuthe, 2024)

Ghafariarsani ir kt. (2022) tyrė kvercetino, čiobrelų eterinio aliejaus ir vitamino C įtaką paprastųjų karpių racionui. Jie nustatė, kad žuvis, šertoms kvercetinu papildytu racionu, padidėjo antioksidantų (katalazės, superoksido dismutazės, glutatono peroksidazės ir glutatono reduktazės) kiekis serume ir kepenyse pasibaigus 60 dienų bandymui. Yousefi ir kt. (2021) tyrė mairūnų ekstrakto įtaką paprastiesiems karpiais (*Cyprinus carpio*). Didžiausias galutinis svoris, svorio prieaugis ir specifinis augimo greitis bei mažiausias PKK (pašaro konversijos rodiklis) nustatyti tada, kai į pašarą buvo pridėta 200 mg/kg mairūnų ekstrakto.

Antistresiniai pašarų priedai. Vienas svarbiausių klimato kaitos padarinių akvakultūroje – stresas, kylantis dėl aplinkos pokyčių. Pastaraisiais metais daugėja tyrimų apie streso mažinimą žuvis. Be naujų technologijų diegimo, gerinančių aplinkos sąlygas akvakultūroje, svarbu į pašarą įtraukti naudingų priedų, padedančių sumažinti streso atsaką į tipinius streso veiksnus. Tyrimais nustatyta, kad įvairūs priedai žuvų racione gali sumažinti imuninės, mitybinės ir metabolinės sistemos pokyčius, susijusius su endokrininiu atsaku. Pašarų priedų biocheminė prigimtis ir fiziologinis veikimas stipriai įtakoja streso atsaką – jie gali veikti kaip neurotransmiteriai ar hormonų pirmtakai, energijos substratai, kofermentai ar kiti būtini junginiai, kurie sukelia kompleksinius atsakus organizmo lygmeniu (Herrera et al., 2019).

Tarp priedų, mažinančių streso fiziologinį poveikį, galima paminėti lipidus ir riebalų rūgštis, vitaminus, mineralus, aminorūgštis, nukleotidus, prebiotikus ir antioksidantus. Ding ir



kt. (2022) tyrė sintetinių polinesočiųjų riebalų rūgščių (PNRR) įtaką koralams – buvo nustatyta, kad papildytas racionas pagerino lervų vystymąsi ir įsitvirtinimą, sumažino superoksido dismutazės, katalazės aktyvumą ir mirtingumą streso metu. Kitame tyrime buvo tiriamas *Astragalus membranaceus* (žioveinio) ir *Glycyrrhiza glabra* (saldymedžio) imunomoduliacinis poveikis ešeriams (*Perca flavescens*). Nustatyta, kad šie augaliniai papildai reikšmingai pagerino augimą, antioksidacinį ir imuninį atsaką – tai laikoma natūraliais streso mažinimo būdais (Elabd et al., 2016).

Santrauka

Didėjant pasauliniam atšilimui gali pakilti vandens temperatūra, dėl to padidės akvakultūros rūšių medžiagų apykaitos greitis, todėl būtina keisti pašarų sudėtį, kad būtų patenkinti padidėję maistinių medžiagų poreikiai. Siekiant prisitaikyti prie kintančių medžiagų apykaitos poreikių ir užtikrinti optimalų rūšių augimą bei sveikatą, reikėtų koreguoti baltymų, lipidų ir angliavandenių santykį pašaruose. Kadangi klimato kaita veikia žuvų išteklius, naudojamus žuvų miltams ir taukams gaminti, tvariai akvakultūrai vis svarbesni tampa alternatyvūs baltymų šaltiniai, tokie kaip vabzdžių miltai, dumbliai ir augalinės kilmės baltymai. Siekiant sumažinti ekologinį pėdsaką, būtina keisti pašarų sudėtį, pavyzdžiui, naudoti atliekų pagrindu gautus ingredientus ir optimizuoti pašarų konversijos koeficientą.

Pažangios šėrimo technologijos, tokios kaip automatiniai šėrimo įrenginiai ir realaus laiko stebėseną, yra svarbios siekiant optimizuoti pašarų paskirstymą, sumažinti nuostolius ir užtikrinti efektyvų išteklių naudojimą. Taip pat būtina koreguoti šėrimo dažnį ir pašarų kiekius, kad jie atitiktų kintantį rūšių apetitą ir augimo greitį dėl pakitusios temperatūros. Į pašarų sudėtį turėtų būti įtraukti buferiniai junginiai, kurie padėtų kompensuoti vandenynų rūgštėjimo poveikį akvakultūros rūšių virškinimo fiziologijai. Taip pat naudinga kurti šėrimo strategijas, kurios didina rūšių atsparumą rūgštinėms sąlygoms – pavyzdžiui, įtraukiant mineralus ir vitaminus, palaikančius atsparumą stresui.

Be to, labai svarbu naudoti fermentinius priedus, kurie gerina pašarų ingredientų virškinamumą ir maistinių medžiagų pasisavinimą – tai leidžia maksimaliai padidinti augimą ir sveikatą kintančiomis aplinkos sąlygomis. Naudingųjų mikroorganizmų ir prebiotinių junginių įtraukimas į pašarus, siekiant palaikyti žarnyno sveikatą, stiprinti imunitetą ir didinti bendrą pašarų efektyvumą globalinio atšilimo sukeltų stresorių sąlygomis, dar labiau pagerina šėrimo efektyvumą.

Literatūra

Aasen, I. M., Sandbakken, I. S., Toldnes, B., Roleda, M. Y., & Slizyte, R. (2022). Enrichment of the protein content of the macroalgae *Saccharina latissima* and *Palmaria palmata*. *Algal research*, 65, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102727>

Abdel-Latif, H. M., Abdel-Tawwab, M., Khafaga, A. F., & Dawood, M. A. (2020). Dietary oregano essential oil improved the growth performance via enhancing the intestinal morphometry and hepato-renal



functions of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture*, 526, 735432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735432>

Ahmad, A., W. Hassan, S., & Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521–9547. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>

Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental management*, 63, 159–172. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3>

Akbari Nargesi, E., Falahatkar, B., & Sajjadi, M. M. (2020). Dietary supplementation of probiotics and influence on feed efficiency, growth parameters and reproductive performance in female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock. *Aquaculture Nutrition*, 26(1), 98–108. <https://doi.org/10.1111/anu.12970>

Albrektsen, S., Kortet, R., Skov, P. V., Ytteborg, E., Gitlesen, S., Kleinegris, D., ... & Øverland, M. (2022). Future feed resources in sustainable salmonid production: A review. *Reviews in aquaculture*, 14(4), 1790–1812. <https://doi.org/10.1111/raq.12673>

Alfiko, Y., Xie, D., Astuti, R. T., Wong, J., & Wang, L. (2022). Insects as a feed ingredient for fish culture: Status and trends. *Aquaculture and fisheries*, 7(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.10.004>

Allegretti, G., Schmidt, V., & Talamini, E. (2017). Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production. *World's poultry science journal*, 73(4), 928–937. <https://doi.org/10.1017/S004393391700054X>

Alloul, A., Wille, M., Lucenti, P., Bossier, P., Van Stappen, G., & Vlaeminck, S. E. (2021). Purple bacteria as added-value protein ingredient in shrimp feed: *Penaeus vannamei* growth performance, and tolerance against *Vibrio* and ammonia stress. *Aquaculture*, 530, 735788. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735788>

Amin, M. N., Barnes, R. K., & Adams, L. R. (2014). Effect of temperature and varying level of carbohydrate and lipid on growth, feed efficiency and nutrient digestibility of brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill, 1814). *Animal feed science and technology*, 193, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.04.016>

Amin, M. N., Carter, C. G., Katersky Barnes, R. S., & Adams, L. R. (2016). Protein and energy nutrition of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) at optimal and elevated temperatures. *Aquaculture nutrition*, 22(3), 527–540. <https://doi.org/10.1111/anu.12274>

Ang, C. Y., Yong, A. S. K., Azad, S. A., Lim, L. S., Zuldin, W. H., & Lal, M. T. M. (2021). Valorization of macroalgae through fermentation for aquafeed production: A review. *Fermentation*, 7(4), 304. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040304>

Ashour, M., Abo-Taleb, H. A., Hassan, A. K. M., Abdelzaher, O. F., Mabrouk, M. M., Elokaby, M. A., & Mansour, A. T. (2021). Valorization use of amphipod meal, *Gammarus pulex*, as a fishmeal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. *Journal of marine science and engineering*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/jmse9121336>

Becker, E. W. (2013). Microalgae for aquaculture: nutritional aspects. *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*, 671–691. ISBN:9780470673898.

Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., & Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>

Blacher, E., Levy, M., Tatirovsky, E., & Elinav, E. (2017). Microbiome-modulated metabolites at the interface of host immunity. *The journal of immunology*, 198(2), 572–580. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1601247>



Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Davis, R. P. (2022). The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. *Food security*, 14(3), 805–827. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01246-9>

Bozkurt, M., Aysul, N., Küçükyılmaz, K., Aypak, S., Ege, G., Catli, A. U., ... & Çınar, M. (2014). Efficacy of in-feed preparations of an anticoccidial, multienzyme, prebiotic, probiotic, and herbal essential oil mixture in healthy and *Eimeria* spp. – infected broilers. *Poultry science*, 93(2), 389–399. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03368>

Bunting, M. (2021). *Making fish feed greener: by-products the key to a sustainable aquaculture industry*. 22 September 2021. <https://disruptr.deakin.edu.au/environment/making-fish-feed-greener-by-products-the-key-to-a-sustainable-aquaculture-industry/>

Cheung, W. W. L., Maire, E., Oyinlola, M. A., Robinson, J. P. W., Graham, N. A. J., Lam, V. W. Y., McNeil, M. A., & Hicks, C. C. (2023). Climate change exacerbates nutrient disparities from seafood. *Nature Climate Change*, 13, 1242–1249. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01822-1>

Cottrell, R. S., Blanchard, J. L., Halpern, B. S., Metian, M., & Froehlich, H. E. (2020). Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature food*, 1(5), 301–308. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>

Cowieson, A. J., & Ravindran, V. (2008). Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy, minerals and amino acids. *British poultry science*, 49(1), 37–44. <https://doi.org/10.1080/0007166070181298>

Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S. J., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>

Delamare-Deboutteville, J., Batstone, D. J., Kawasaki, M., Stegman, S., Salini, M., Tabrett, S., & Hülsen, T. (2019). Mixed culture purple phototrophic bacteria is an effective fishmeal replacement in aquaculture. *Water research X*, 4, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100031>

Demir, E., Sarica, Ş., Özcan, M. A., & Sui Mez, M. (2003). The use of natural feed additives as alternatives for an antibiotic growth promoter in broiler diets. *British poultry science*, 44(S1), 44–45. <https://doi.org/10.1080/713655288>

Ding, D. S., Wang, S. H., Sun, W. T., Liu, H. L., & Pan, C. H. (2022). The effect of feeding on *briareum violacea* growth, survival and larval development under temperature and salinity stress. *Biology*, 11(3), 410. <https://doi.org/10.3390/biology11030410>

Ebenezzar, S., Singh, D. K., Sahoo, S., Prabu Linga, D., & Pal, A. K. (2023). *Outlook of Climate Change and Fish Nutrition*. Editors: Archana Sinha, Shivendra Kumar, Kavita Kumari. Springer, ISBN 978-981-19-5499-3, (eBook).

Eissa, E. S. H., Ahmed, R. A., Abd Elghany, N. A., Elfeky, A., Saadony, S., Ahmed, N. H., Sakr, S. E. S., Dayrit, G. B., Tolenada, C. P. S., Atienza, A. A. C., Mabrok, M., & Ayoub, H. F. (2023). Potential symbiotic effects of β -1,3 glucan, and fructooligosaccharides on the growth performance, immune response, redox status, and resistance of pacific white shrimp, *litopenaeus vannamei* to *Fusarium solani* infection. *Fishes*, 8(2), 105. <https://doi.org/10.3390/fishes8020105>

Elabd, H., Wang, H. P., Shaheen, A., Yao, H., & Abbass, A. (2016). Feeding *Glycyrrhiza glabra* (liquorice) and *Astragalus membranaceus* (AM) alters innate immune and physiological responses in yellow perch (*Perca flavescens*). *Fish & shellfish immunology*, 54, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.04.024>

El-Kady, A. A., Magouz, F. I., Mahmoud, S. A., & Abdel-Rahim, M. M. (2022). The effects of some commercial probiotics as water additive on water quality, fish performance, blood biochemical parameters, expression of growth and immune-related genes, and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 546, 737249. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737249>



FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*. FAO: Rome, Italy. ISBN 978-92-5-132692-3.

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237–240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>

Fowles, T. M., & Nansen, C. (2020). Insect-based bioconversion: value from food waste. *Food waste management: solving the wicked problem*, 321–346. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20561-4_12

Froehlich, H. E., Jacobsen, N. S., Essington, T. E., Clavelle, T., & Halpern, B. S. (2018). Avoiding the ecological limits of forage fish for fed aquaculture. *Nature sustainability*, 1(6), 298–303. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0077-1>

Fuller, R. (1989). Probiotics in man and animals. *The Journal of applied bacteriology*, 66(5), 365–378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1989.tb05105.x>

Garcia-Launay, F., Dusart, L., Espagnol, S., Laisse-Redoux, S., Gaudre, D., Meda, B., & Wilfart, A., (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British journal nutrition*, 120, 1298–1309. <https://doi.org/10.1017/s0007114518002672>

Gardiner, G. E., Metzler-Zebeli, B. U., & Lawlor, P. G. (2020). Impact of intestinal microbiota on growth and feed efficiency in pigs: A review. *Microorganisms*, 8(12), 1886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121886>

Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P. P., De Angelis, A., ... & Roncarati, A. (2020). Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Italian journal of animal science*, 19(1), 360–372. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1743209>

Geda, F., Rekecki, A., Decostere, A., Bossier, P., Wuyts, B., Kalmar, I. D., & Janssens, G. P. J. (2012). Changes in intestinal morphology and amino acid catabolism in common carp at mildly elevated temperature as affected by dietary mannanoligosaccharides. *Animal feed science and technology*, 178(1–2), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.09.008>

Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Javahery, S., & Van Doan, H. (2022). Effects of dietary vitamin C, thyme essential oil, and quercetin on the immunological and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture*, 553, 738053. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738053>

Giannenas, I., Triantafyllou, E., Stavrakakis, S., Margaroni, M., Mavridis, S., Steiner, T., & Karagouni, E. (2012). Assessment of dietary supplementation with carvacrol or thymol containing feed additives on performance, intestinal microbiota and antioxidant status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 350, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.027>

Glencross, B. D., Huyben, D., & Schrama, J. W. (2020). The application of single-cell ingredients in aquaculture feeds-a review. *Fishes*, 5(3), 22. <https://doi.org/10.3390/fishes5030022>

Godoy M. G., Amorim G. M., Barreto M. S., & Freire D. M. G. (2018). Chapter 12 – Agricultural Residues as Animal Feed: Protein Enrichment and Detoxification Using Solid-State Fermentation. In A. Pandey, C. Larroche, C. R. Soccol (eds.), *In Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 235–256). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00012-8>

Groot, R., Lyons, P., & Schrama, J. W. (2021). Digestible energy versus net energy approaches in feed evaluation for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 274, 114893. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114893>

Guerreiro, I., Castro, C., Antunes, B., Coutinho, F., Rangel, F., Couto, A., ... & Enes, P. (2020). Catching black soldier fly for meagre: Growth, whole-body fatty acid profile and metabolic responses. *Aquaculture*, 516, 734613. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734613>



Guillen, A. C., Borges, M. E., Herrerias, T., Kandalski, P. K., de Arruda Marins, E., Viana, D., ... & Donatti, L. (2019). Effect of gradual temperature increase on the carbohydrate energy metabolism responses of the antarctic fish *notothenia rossii*. *Marine environmental research*, 150, 104779. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104779>

Hanachi, P., Karbalaie, S., Walker, T. R., Cole, M., & Hosseini, S. V. (2019). Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (*Cyprinus carpio*). *Environmental science and pollution research*, 26, 23777–23787. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05637-6>

Herrera, M., Mancera, J. M., & Costas, B. (2019). The use of dietary additives in fish stress mitigation: comparative endocrine and physiological responses. *Frontiers in endocrinology*, 10, 447. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00447>

Hilborn, R., Banobi, J., Hall, S. J., Pucylowski, T., & Walsworth, T. E. (2018). The environmental cost of animal source foods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(6), 329–335. <https://doi.org/10.1002/fee.1822>

Howell, M. (2022). *An insider's view of advances in aquaculture nutrition*. 23 September 2022. <https://thefishsite.com/articles/an-insiders-view-of-advances-in-aquaculture-nutrition-alltech-coppens>

Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., ... & Strugnell, J. M. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One earth*, 1(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>

Huertas, I. E., Rouco, M., Lopez-Rodas, V., & Costas, E. (2011). Warming will affect phytoplankton differently: evidence through a mechanistic approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1724), 3534–3543. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0160>

Huguet, C. T., Norambuena, F., Emery, J. A., Hermon, K., & Turchini, G. M. (2015). Dietary n-6/n-3 LC-PUFA ratio, temperature and time interactions on nutrients and fatty acids digestibility in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 436, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.11.011>

Idenyi, J. N., Eya, J. C., Nwankwegu, A. S., & Nwoba, E. G. (2022). Aquaculture sustainability through alternative dietary ingredients: Microalgal value-added products. *Engineering microbiology*, 2(4), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100049>

Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current opinion in biotechnology*, 61, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>

Jusadi, D., Ekasari, J., Suprayudi, M. A., Setiawati, M., & Fauzi, I. A. (2021). Potential of underutilized marine organisms for aquaculture feeds. *Frontiers in marine science*, 7, 609471. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.609471>

Khan, M. A., Das, S. K., & Bhakta, D. (2018). Food and feeding habits, gastro-somatic index and gonado-somatic index of *Scylla serrata* from Hooghly-Matlah estuary of West Bengal, India. *Journal of the marine biological association of india*, 60(1), 14. <https://doi.org/10.6024/jmbai.2018.60.1.1994-02>

Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. *PLoS One*, 13(1), e0190730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190730>

Legrand, T. P., Wynne, J. W., Weyrich, L. S., & Oxley, A. P. (2020). A microbial sea of possibilities: current knowledge and prospects for an improved understanding of the fish microbiome. *Reviews in aquaculture*, 12(2), 1101–1134. <https://doi.org/10.1111/raq.12375>

Li, Y., Kortner, T. M., Chikwati, E. M., Belghit, I., Lock, E. J., & Kroghdahl, Å. (2020). Total replacement of fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal does not compromise the gut health of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 520, 734967. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734967>



- Lock, E. J., Biancarosa, I., & Gasco, L. (2018). Insects as raw materials in compound feed for aquaculture. *Edible insects in sustainable food systems*, 263–276. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_16
- Ma, M., & Hu, Q. (2024). Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: prospects and challenges. *Reviews in aquaculture*, 16(2), 818–835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
- Mackenzie, S. G., Leinonen, I., Ferguson, N., & Kyriazakis, I. (2016). Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *British journal of nutrition*, 115(10), 1860–1874. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000763>
- MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific reports*, 10(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>
- Mancuso, T., Pippinato, L., & Gasco, L. (2019). The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. *Calitatea*, 20(S2), 374–381. <https://www.researchgate.net/publication/332504133>
- Matassa, S., Papirio, S., Pikaar, I., Hülsen, T., Leijenhurst, E., Esposito, G., ... & Verstraete, W. (2020). Upcycling of biowaste carbon and nutrients in line with consumer confidence: the “full gas” route to single cell protein. *Green chemistry*, 22(15), 4912–4929. <https://doi.org/10.1039/D0GC01382J>
- Messeder, T. (2021). *Innovation opportunities in European Aquaculture*. KTN AgriFood and EIT Food. March 2021.
- Mo, W. Y., Cheng, Z., Choi, W. M., Man, Y. B., Liu, Y., & Wong, M. H. (2014). Application of food waste-based diets in polyculture of low trophic level fish: Effects on fish growth, water quality and plankton density. *Marine pollution bulletin*, 85(2), 803–809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.020>
- Nadermann, N., Seward, R. K., & Volkoff, H. (2019). Effects of potential climate change-induced environmental modifications on food intake and the expression of appetite regulators in goldfish. *Comparative biochemistry and physiology part a: molecular & integrative physiology*, 235, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.06.001>
- Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., ... & Kumar, G. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of biotechnology*, 341, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Nasser, N., Abiad, M. G., Babikian, J., Monzer, S., & Saoud, I. P. (2018). Using restaurant food waste as feed for Nile tilapia production. *Aquaculture research*, 49(9), 3142–3150. <https://doi.org/10.1111/are.13777>
- Nathanailides, C., Kolygas, M., Choremi, K., Mavraganis, T., Gouva, E., Vidalis, K., & Athanassopoulou, F. (2021). Probiotics Have the Potential to Significantly Mitigate the Environmental Impact of Freshwater Fish Farms. *Fishes*, 6(4), 76. <https://doi.org/10.3390/fishes6040076>
- Nielsen, T. B., Würtz, A. M. L., Tjønneland, A., Overvad, K., & Dahm, C. C. (2022). Substitution of unprocessed and processed red meat with poultry or fish and total and cause-specific mortality. *British Journal of Nutrition*, 127(4), 563–569. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001252>
- NOAA Fisheries. (2022). *Climate Resilience and Aquaculture. Fact Sheet 2022*. www.fisheries.noaa.gov/aquaculture
- Ojeda, J. (2021). *Can sustainable aquaculture help to achieve the UN SDGs?* 17 August, 2021. <https://www.eitfood.eu/blog/can-sustainable-aquaculture-help-to-achieve-the-un-sdgs>
- Onomu, A. J., & Okuthe, G. E. (2024). The Role of Functional Feed Additives in Enhancing Aquaculture Sustainability. *Fishes*, 9(5), 167. <https://doi.org/10.3390/fishes9050167>



- Oscar, E. V., Joshua, E. O., Felix, E., & Eyerituvie, A. F. (2020). A Review on the Application and Benefits of Probiotics Supplements in Fish Culture. *Oceanography & Fisheries Open Access Journal*, 11(4), 62–65. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2020.11.555817>
- Parker, L. M., Scanes, E., O'Connor, W. A., Dove, M., Elizur, A., Pörtner, H. O., & Ross, P. M. (2024). Resilience against the impacts of climate change in an ecologically and economically significant native oyster. *Marine pollution bulletin*, 198, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115788>
- Pombo, A., Baptista, T., Granada, L., Ferreira, S. M., Gonçalves, S. C., Anjos, C., ... & Costa, J. L. (2020). Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. *Reviews in aquaculture*, 12(1), 107–121. <https://doi.org/10.1111/raq.12307>
- Porteus, C. S., Hubbard, P. C., Uren Webster, T. M., van Aerle, R., Canário, A. V., Santos, E. M., & Wilson, R. W. (2018). Near-future CO₂ levels impair the olfactory system of a marine fish. *Nature climate change*, 8(8), 737–743. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0224-8>
- Puvanasundram, P., Chong, C. M., Sabri, S., Yusoff, M. S., & Karim, M. (2021). Multi-strain probiotics: Functions, effectiveness and formulations for aquaculture applications. *Aquaculture reports*, 21, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100905>
- Qiu, X., Neori, A., Kim, J. K., Yarish, C., Shpigel, M., Guttman, L., ... & Davis, D. A. (2018). Evaluation of green seaweed *Ulva* sp. as a replacement of fish meal in plant-based practical diets for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Journal of applied phycology*, 30, 1305–1316. <https://www.researchgate.net/publication/320042463>
- Ragaza, J. A., Hossain, M. S., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Kotzamanis, Y., ... & Kumar, V. (2021). Brown seaweed (*Sargassum fulvellum*) inclusion in diets with fishmeal partially replaced with soy protein concentrate for Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) juveniles. *Aquaculture nutrition*, 27(4), 1052–1064. <https://doi.org/10.1111/anu.13246>
- Rasidi, R., Jusadi, D., Setiawati, M., Yuhana, M., Zairin Jr, M., & Sugama, K. (2021). Dietary Supplementation of humic acid in the Feed of juvenile asian seabass, *Lates calcarifer* to counteract possible negative effects of Cadmium Accumulation on Growth and Fish Well-being when Green Mussel (*Perna viridis*) is used as a Feed ingredient. *Aquaculture research*, 52(6), 2550–2568. <https://doi.org/10.1111/are.15104>
- Reid, G. K., Gurney-Smith, H., Marcogliese, D. J., Knowler, D., Benfey, T., Garber, A. F., Forster, I., Chopin, T., Brewer-Dalton, K., Moccia, R. D., Flaherty, M. S., Smith, C. T., de Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: considering biological response and resources. *Aquaculture environment interactions*, 11, 569–602. <https://doi.org/10.3354/aei00332>
- Rimoldi, S., Torrecillas, S., Montero, D., Gini, E., Makol, A., Valdenegro, V. V. et al. (2020). Assessment of dietary supplementation with galactomannan oligosaccharides and phytogenics on gut microbiota of European sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) fed low fishmeal and fish oil based diet. *PLoS ONE* 15(4), e0231494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231494>
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein – state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
- Sandblom, E., Gräns, A., Axelsson, M., & Seth, H. (2014). Temperature acclimation rate of aerobic scope and feeding metabolism in fishes: implications in a thermally extreme future. *Proceedings of the royal society b: biological sciences*, 281(1794), 20141490. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1490>
- Sarker, P. K. (2023). Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. *Microorganisms*, 11(2), 439. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020439>
- Sarker, P. K., Fournier, J., Boucher, E., Proulx, E., de la Noüe, J., & Vandenberg, G. W. (2011). Effects of low phosphorus ingredient combinations on weight gain, apparent digestibility coefficients, non-fecal



phosphorus excretion, phosphorus retention and loading of large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal feed science and technology*, 168, 241–9. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2011.04.086>

Sarker, P. K., Kapuscinski, A. R., McKuin, B., Fitzgerald, D. S., Nash, H. M., & Greenwood, C. (2020). Microalgae-blend tilapia feed eliminates fishmeal and fish oil, improves growth, and is cost viable. *Scientific reports*, 10(1), 19328. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75289-x>

Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Koceva Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. (2021). A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>

Sepulveda, J., & Moeller, A. H. (2020). The effects of temperature on animal gut microbiomes. *Frontiers in microbiology*, 11, 384. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00384>

Shahin, S., Okomoda, V. T., Ma, H., & Ikhwanuddin, M. (2023). Sustainable alternative feed for aquaculture: state of the art and future perspective. *Planetary sustainability*, 1(1), 62–96. <https://www.researchgate.net/publication/373874626>

Sharma, J., Singh, S. P., & Chakrabarti, R. (2017). Effect of temperature on digestive physiology, immune-modulatory parameters, and expression level of Hsp and LDH genes in *Catla catla* (Hamilton, 1822). *Aquaculture*, 479, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.05.031>

Siikavuopio, S.I., James, P., Lysne, H., & Saather, B. J. (2012). Effects of size and temperature on growth and feed conversion of juvenile green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*). *Aquaculture*, 354–355, 27–30. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.036>

Smárasón, B. Ö. (2023). *Why are sustainable feed need? Eit Food*. 01.07.2023. <https://www.eitfood.eu/blog/fish-feed-why-we-need-sustainable-alternatives>

Stumpp, M., Hu, M., Casties, I., Saborowski, R., Bleich, M., Melzner, F., & Dupont, S. (2013). Digestion in sea urchin larvae impaired under ocean acidification. *Nature climate change*, 3(12), 1044–1049. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2028>

Tait, J. (2021). *New approach to feed production can transform climate impact of industries including fish farming*. <https://www.sps.ed.ac.uk/news-events/news/new-approach-feed-production-can-transform-climate-impact-industries-including>

Tocher, D. R., Betancor, M. B., Sprague, M., Olsen, R. E., & Napier, J. A. (2019). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: Bridging the gap between supply and demand. *Nutrients*, 11(1), 89. <https://doi.org/10.3390/nu11010089>

Trinh, L. T., Bakke, I., & Vadstein, O. (2017). Correlations of age and growth rate with microbiota composition in Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae. *Scientific reports*, 7(1), 8611. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09073-9>

Van Doan, H., Hoseinifar, S. H., Tapingkae, W., Seel-Audom, M., Jaturasitha, S., Dawood, M. A., & Esteban, M. Á. (2020). Boosted growth performance, mucosal and serum immunity, and disease resistance Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings using corn-cob-derived xylooligosaccharide and *Lactobacillus plantarum* CR1T5. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 12, 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100953>

Vieira, L., Filipe, D., Amaral, D., Magalhães, R., Martins, N., Ferreira, M., ... & Peres, H. (2023). Solid-state fermentation as green technology to improve the use of plant feedstuffs as ingredients in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Animals*, 13(17), 2692. <https://doi.org/10.3390/ani13172692>

Volkoff, H. (2019). Feeding and its regulation. In *Climate change and non-infectious fish disorders* (pp. 87–101). Wallingford UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786393982.0087>

Warwas, N. (2023). *Novel Marine Ingredients for Aquaculture - Fish Nutrition, Physiology and Intestinal Health*. Doctoral thesis, University of Gothenburg Faculty of Science, Department of Biological and



Funded by
the European Union



Skaitmeninė mėlynoji karjera įveikus anglies krizę – akvakultūros mokymo programos naujovės [DiBluCa]
2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

Environmental Sciences. Institutionen för biologi och miljövetenskap. ISBN 978-91-8069-513-8 978-91-8069-514-5

Widanarni, W., Taufik, A., Yuhana, M., & Ekasari, J. (2019). Dietary mannan ligosaccharides positively affect the growth, digestive enzyme activity, immunity and resistance against vibrio harveyi of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae. *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 19, 271–278. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_4_01

Wilfart, A., Garcia-Launay, F., Terrier, F., Soudé, E., Aguirre, P., & Skiba-Cassy, S. (2023). A step towards sustainable aquaculture: Multiobjective feed formulation reduces environmental impacts at feed and farm levels for rainbow trout. *Aquaculture*, 562, 738826.

Yadav, S., & Jha, R. (2019). Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0310-9>

Yousefi, M., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Rashidian, G., & Van Doan, H. (2021). Effects of dietary marjoram, *Origanum majorana* extract on growth performance, hematological, antioxidant, humoral and mucosal immune responses, and resistance of common carp, *Cyprinus carpio* against *Aeromonas hydrophila*. *Fish & shellfish immunology*, 108, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.11.019>

Zengin, M., Sur, A., İlhan, Z., Azman, M. A., Tavşanlı, H., Esen, S., Bacaksız, O. K., Demir, E. (2022). Effects of fermented distillers grains with solubles, partially replaced with soybean meal, on performance, blood parameters, meat quality, intestinal flora, and immune response in broiler. *Research in veterinary science*, 150, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.06.027>

Zhang, Z., Liu, H., Jin, J., Zhu, X., Han, D., & Xie, S. (2024). Towards a low-carbon footprint: Current status and prospects for aquaculture. *Water biology and security*, 3, 1–15, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100290>

Ziv-Douki, H. (2020). Combining strengths for greater impact. *Cargill aqua nutrition sustainability report 2020. Healthy seafood for future generations*. <https://www.cargill.com/doc/1432196768685/cargill-aqua-nutrition-sustainability-report-2020.pdf>