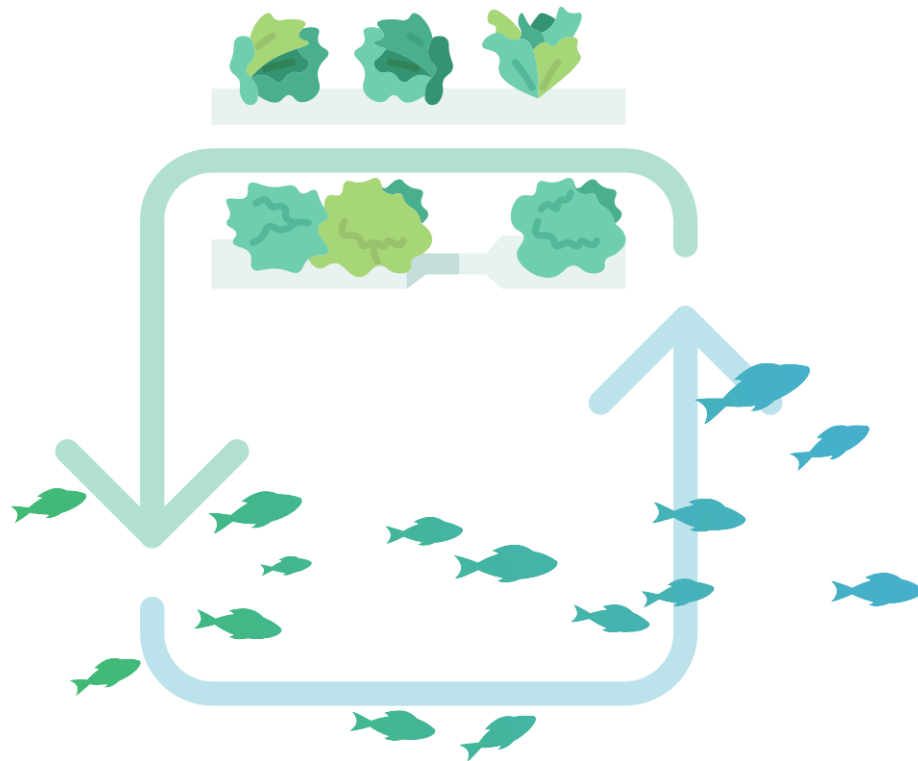


Ūdens kvalitātes parametri akvaponikā



Saturs

1.	Ievads	4
1.1.	TransFarm projekts.....	4
1.2.	Ūdens kvalitāte akvaponikā	5
2.	Ūdens kvalitātes parametri	6
2.1.	Temperatūra.....	6
2.2.	Skābeklis.....	8
2.3.	pH.....	11
2.4.	Ūdens cietība.....	14
2.5.	Galvenā barības viela - slāpeklis.....	15
3.	Mikroorganismi akvaponikā	19
3.1.	Aļģes.....	20
3.2.	Citas baktērijas	21
3.3.	Pelējuma sēnes	24
4.	Ūdens avoti	25
5.	Ūdens apstrāde	27
5.1.	Ūdens kvalitātes regulēšana un ar to saistītu problēmu novēršana	28
5.2.	Ūdens kvalitātes uzraudzība un kontrole	29
	Atsauces	31

Kopsavilkums

Akvaponika ir sistēma, kas apvieno akvakultūras un hidroponikas principus. Zivis, kas barojas ar zivju barību, izdala atkritumus, un, pateicoties mikroorganismu vielmaiņas aktivitātei, šie atkritumi tiek pārveidoti par slāpekļa formu, kas ir viegli pieejama augiem. Galvenais elements, kas savieno visus trīs dzīvos organismus akvaponikas sistēmā, ir ūdens. Ūdens ir zivju un mikroorganismu dzīves vide, kā arī augu barošanās vide, un ūdens kvalitāte ietekmē visus šos organismus. Atsevišķām akvakultūras un hidroponikas tehnoloģijām ir īpašas ūdens kvalitātes prasības, kas piemērotas konkrētai zivju sugai vai augu sugai, savukārt akvaponikā jāatrod kompromiss, kas būtu piemērots zivīm, augiem un mikroorganismiem. Šo trīs organismu grupu starpā pastāv cieša simbioze, lai nodrošinātu viena otru ar nepieciešamajām barības vielām. Šajā ziņojumā apkopoti svarīgākie ūdens kvalitātes parametri akvaponikas sistēmā. Informācija par tādiem ūdens kvalitātes parametriem kā pH, izšķīdušais skābeklis, ūdens cietība, elektrovadītspēja, temperatūra un slāpekļa cikls ir aprakstīta no katra šajā sistēmā iekļautā organisma viedokļa. Aprakstīta arī ūdens kvalitātes uzraudzība un problēmu novēršana, pamatojoties uz biežāk sastopamajām problēmām, kas novērojamas šādās sistēmās. Šajā ziņojumā ir iekļauta vispārīga informācija uzņēmējiem un personām, kas interesējas par akvaponikas sistēmas izveidi un to uzsākšanu.

Atslēgas vārdi: *TransFarm, akvaponika, ūdens, kvalitāte, parametri*

Šajā ziņojumā iekļautā informācija ir dažādu grāmatu un zinātnisko rakstu apkopojums, atsaucies uz šajā ziņojumā izmantotajiem avotiem ir atrodamas nodaļā "Atsauces".

Šī ziņojuma tapšanu atbalsta Interreg Centrālā Baltijas Jūras reģiona projekts CB0100007 "TRANSborder cooperation for circular soil-less FARMing systems - TransFarm".



UNIVERSITY
OF LATVIA



Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

COMPANION
KOOPERATIV UTVECKLING

1. Ievads

1.1. TransFarm projekts

Pārtikas nozare saskaras ar vairākām vides un sociālām problēmām: Lauksaimniecība ir nozare, ko īpaši ietekmē klimata pārmaiņas, mūsu jūras ir pārzvejotas, un tiek lēsts, ka pasaules iedzīvotāju skaits turpinās pieaugt un 2050. gadā sasniegs aptuveni 9,7 miljardus cilvēku. Baltijas jūras reģiona valstis ir ļoti atkarīgas no pārtikas importa, jo īpaši dārzeņu, augļu un zivju; pēdējos gados pieredzētā pandēmija un karš Ukrainā ir atklājuši nepieciešamību pēc pašpietiekamām pārtikas sistēmām. Turklāt lauksaimniecība un akvakultūra ir vieni no galvenajiem Baltijas jūras eutrofikācijas veicinātājiem.

Lai atbildētu uz šiem izaicinājumiem, TransFarm projekta galvenais mērķis ir tuvināt pārtikas ražošanu patērētājiem, veicinot bezaugsnes lauksaimniecības metožu izmantošanu. Šādas sistēmas ir iespējams izmantot pielāgotās telpās ar kontrolētu mikroklimatu un iegūt ražu visu gadu. Bezaugsnes lauksaimniecības piemēri ir hidroponika, kurā augus audzē ūdenī, un akvaponika, kas apvieno hidroponiku ar akvakultūru.

Akvaponika ir apļveida, slēgta cikla sistēma, kurā ūdens no zivju audzētavas tiek izmantots augu audzēšanai. Zivju atkritumi ūdenī tiek mikrobioloģiski pārveidoti ar biofiltra palīdzību, tos absorbē augi, un tad tīrāks ūdens tiek novadīts atpakaļ zivīm. Sistēmai ir apļveida ūdens plūsma, kas ļauj atkārtoti izmantot barības vielas, neradot barības vielu emisijas vidē. Tā kā zivis, augi un mikroorganismi akvaponikas sistēmā darbojas ciešā simbiozē, netiek izmantotas antibiotikas vai pesticīdi, kas savukārt nodrošina tīrāku un veselīgāku produkciju.

TransFarm demonstrēs akvaponikas sistēmu iespējas Zviedrijā, Igaunijā un Latvijā, kā arī testēs alternatīvus ūdens avotus, piemēram, lietus ūdeni un reģenerētu pelēko ūdeni: projekta partneri no šīm valstīm uzbūvēs demonstrējumu iekārtas ar atšķirīgām īpašībām un mērķiem. Pieredzes apmaiņa dažādos demonstrācijas objektos veicinās zināšanu pārnesi, un šie objekti būs iespēja iedvesmot un izglītēt nākamās akvaponikas lauksaimniekus. Demonstrējumu izveidē un uzraudzībā iegūtās zināšanas ļaus izstrādāt izglītojošus materiālus, kas būs pieejami visiem akvaponikā ieinteresētajiem dalībniekiem.

Projekta ietvaros tiks pētīti arī uzņēmējdarbības modeļi, īstenoti pasākumi, lai informētu patērētājus par akvaponikas produktu kvalitāti, izglītotu uzņēmējus, kuri vēlas izveidot akvaponikas sistēmu, kā arī informētu ierēdņus un politikas veidotājus par to, kā apļveida bezaugsnes saimniekošanas metodes samazina ietekmi uz vidi.

TransFarm projekta ilgums ir trīs gadi (2023-2026), to koordinē **Turku Ekonomikas skola, Turku Universitātē** (Turku, Somija). Projekta partneri ir **Igaunijas Dzīvības Zinātņu Universitāte** (Tartu, Igaunija), **Latvijas Universitāte** (Rīga, Latvija), **Campus Roslagen** un **Coompanion Roslagen & Norrort** (Norrträlje, Zviedrija).

TransFarm projektu finansē ES Interreg Centrālā Baltijas programma, projekta kopējais budžets ir 1,87 miljoni eiro, ES finansējums ir 1,5 miljoni eiro.

1.2. Ūdens kvalitāte akvaponikā

Akvaponika ir ilgtspējīga un radoša pieeja pārtikas ražošanai, kas apvieno akvakultūru un hidroponiku, lai izveidotu funkcionējošu ekosistēmu. Šīs sarežģītās sistēmas pamatā ir ūdens. Ūdens kvalitātei ir izšķiroša nozīme akvaponikā, kur zivis un augi mijiedarbojas slēgtā sistēmā. Tās nozīmi var saskatīt sarežģītajā līdzsvarā, kas nepieciešams, lai uzturētu ideālus apstākļus barības vielu aprītei, augu augšanai un zivju veselībai. Tāpēc akvaponikas entuziastiem, pētniekiem un praktiķiem ir būtiski izprast ūdens kvalitātes rādītājus.

pH līmenis ir parametrs, kas norāda ūdens skābuma vai sārmainības pakāpi. Precīza līdzsvara nodrošināšana starp pH līmeni 6,5 un 7,5 ir būtiska, lai saglabātu barības vielu pieejamību un veicinātu mikrobu aktivitāti, kas ir ļoti svarīgi elementi zivju un augu veselībai un dzīvotspējai. **Temperatūra** ir būtisks faktors, kas ietekmē vielmaiņas ātrumu, barības vielu uzsūkšanos un vispārējo vides kvalitāti. Konsekventa uzraudzība ir ļoti svarīga, lai novērstu jebkādas iespējamus ekstrēmus apstākļus, kas varētu izraisīt zivju un augu diskomfortu vai bojājumus. **Amonjaka** un **nitrītu** līmenis ir būtiski slāpekļa cikla rādītāji. Ir svarīgi uzraudzīt un uzturēt zemu šo savienojumu līmeni, lai novērstu negatīvās ietekmes uz zivju populāciju un saglabātu līdzsvarotu sistēmu. **Nitrāti**, kas ir slāpekļa cikla gala produkts, darbojas kā galvenais barības vielu avots augiem. Optimāla līdzsvara uzturēšana ir ļoti svarīga, lai nodrošinātu funkcionējošu akvaponikas ekosistēmu, neapdraudot neviena elementa labklājību. Atbilstošs **izšķīdušā skābekļa** līmenis ir nepieciešams gan ūdens organismu, piemēram, zivju, gan augu vispārējai veselībai un dzīvotspējai. Nepietiekams skābekļa līmenis var izraisīt zivju stresu, palēninātu augšanu un pat nāvi, svarīgi ir izmantot piemērotas aerācijas un skābekļa piegādes metodes. Lai noteiktu ūdenī izšķīdušo jonu un minerālvielu daudzumu, kā galvenos rādījumus izmanto elektrovadītspēju un kopējo izšķīdušo vielu daudzumu. Pastāvīga uzraudzība palīdz uzturēt optimālu barības vielu līdzsvaru, tādējādi novēršot jebkādu nelīdzsvarotību vai iespējami kaitīgu vielu līmeni akvaponikas sistēmā.

Akvaponikas sistēmās esošajām **baktērijām** ir būtiska funkcija slāpekļa ciklā, jo tās pārveido zivju atkritumus par svarīgākajām barības vielām (nitrātiem), kas ir nepieciešamas augu augšanai. Šīs labvēlīgās baktērijas darbojas kā bioloģiskie filtri, uzlabojot ūdens kvalitāti, noārdot kaitīgos savienojumus un novēršot iespējamus zaudējumus, kas svarīgas zivju bojāejas gadījumā. Baktērijām ir nozīme pH līmeņa uzturēšanā, sistēmas stabilizēšanā pret vides izmaiņām un amonjaka likvidēšanā, tādējādi veicinot gan zivju, gan augu vispārējo labklājību un pielāgošanās spēju. Noturīgas mikrobioloģiskās ekosistēmas izveide akvaponikas sistēmās ir būtiskākais elements, kas ietekmē gan augus, gan zivis.

Akvaponikas sistēmas potenciāls ir atkarīgs no rūpīgas ūdens kvalitātes parametru kontroles. Nodrošinot sistēmas veselību un produktivitāti, mēs veicinām arī plašāku ilgtspējības un atbildīgas pārtikas ražošanas mērķu sasniegšanu. Lai pilnībā izmantotu akvaponikas sistēmas piedāvātās priekšrocības, kā pārtikas ražošanas metodi, ir būtiski izprast ūdens kvalitātes parametrus.

2. Ūdens kvalitātes parametri

2.1. Temperatūra

Akvaponikas sistēmas sastāvdaļas un īpašības ietekmē ūdens temperatūra. Parasti kompromisa diapazons ir no 18 līdz 30 °C. Temperatūra ietekmē gan amonjaka toksiskumu (jonizāciju), gan izšķīdušā skābekļa (DO) līmeni; paaugstinot temperatūru, palielinās nejonizētā (toksiskā) amonjaka daudzums un samazinās DO līmenis.

Ūdens temperatūra ietekmē augus akvaponikā vairāk nekā gaisa temperatūra. Lielākajai daļai dārzeņu piemērota temperatūra ir no 18 līdz 30 °C. Tomēr daži dārzeņi ir daudz piemērotāki audzēšanai šaurākos temperatūras diapazonos. Gurķi un salāti ir tikai daži no vēsā gadalaika dārzeņiem, kas labi aug 8-20 °C temperatūrā. Savukārt siltā laika garšaugiem un dārzeņiem, piemēram, bazilikam, kāpostiem un okrai, nepieciešama temperatūra no 17 līdz 30 °C. Ja temperatūra ir augstāka par 26 °C, lapu zaļumi sāk bālēt, radot sēklas un ziedus, kas tos padara rūgtus un nederīgus izmantošanai pārtikā, tirdzniecībai. Augi izjūt karstuma stresu ūdens temperatūras paaugstināšanās dēļ. Kad augs tiek pakļauts silta ūdens iedarbībai, tas slēdz saknes un pāriet uz izdzīvošanas režīmu. Dažas karstuma stresa pazīmes ir vīšana, zems izšķīdušā skābekļa līmenis, augu ziedēšanas un augļu veidošanās pārtraukšana, mīkstas, brūnas, gļotainas saknes, salātu augu izstīdēšana (izstiepšanās un sēklu veidošanās), kā arī kalcija uzsūkšanās ierobežojumi augiem. Gaisa mitrums un gaisa temperatūra arī ietekmē to, kādā līmenī karstuma stresu augi izjūt.

Tā kā zivis ir aukstasiņu organismi, tās ir mazāk spējīgas pielāgoties dažādām ūdens temperatūrām. Zivis var iedalīt trīs kategorijās: aukstā, vēsā un siltā ūdenī dzīvojošas zivis. Tropu zivis, piemēram, tilapijas, parastās karpas, bieži vien labi jūtas ūdenī, kura temperatūra ir no 22 līdz 32 °C. Savukārt aukstā ūdens sugas, piemēram, foreles, dod priekšroku temperatūrai no 10 līdz 18°C. Piemēram, parastajām karpām ir lielāks temperatūras tolerances diapazons no 5 līdz 30°C nekā citām mērenā ūdens sugām (1. tabula). Optimāla temperatūra katrai sugai ir nepieciešama, lai nodrošinātu ātrāku augšanas tempu, efektīvu barības konversiju un samazinātu slimību risku. Augstāka ūdens temperatūra var palielināt elpošanas ātrumu un vielmaiņu. Augstāka ūdens temperatūra nozīmē, ka būs pieejams mazāk izšķīdušā skābekļa (DO), tomēr paaugstinātā temperatūrā zivju pieprasījums pēc DO palielinās. Būtisks akvaponikas komponents ir ūdens temperatūras pielāgošana tieši zivīm un tās uzturēšana 2 grādu pēc Celsija robežās (t. i., augsta temperatūras kontroles pakāpe). Tas ir tāpēc, ka zivīm, kurām ir optimāla vielmaiņa un barības konversija, ja ūdens temperatūra ir precīza un saglabājas tuvu ideālajam vidējam līmenim, ir labāki augšanas rādītāji un stabila, paredzama izdalīto atkritumu slodze, kas veicina augu kultūru augšanu.

Tabula 1. Organismi un to optimālie temperatūras diapazoni akvaponikas sistēmās.

Organisma veids	Optimālais T diapazons, °C	Piemērs
Silto ūdeņu zivis	22-32	Tilapijas, karpas, asari, zuši, vēži, stores
Aukstā ūdens zivis	10-18	Lašveidīgie
Siltā laika augi	23-28	Kāposti, baziliks
Vēsā laika augi	17-25	Salāti
<i>Nitrobacter</i> spp.	25-29	
<i>Nitrosomonas</i> spp.	21-29	
Pārklāšanās temperatūra, °C	18-30	Lielākā daļa augu un zivju

Baktērijām un akvapponikai kopumā būtiska ir ūdens temperatūras uzturēšana. Baktēriju augšanai un produktivitātei ideālais temperatūras diapazons ir 17-34 °C. Norādītais temperatūras diapazons norāda optimālus apstākļus nitrificējošo baktēriju darbībai, tomēr, ja temperatūra pazemināsies, nitrifikācijas efektivitāte samazināsies, bet neapstāsies - pie 4°C baktērijas kļūst neaktīvas. Ir zināms, ka temperatūras, kas ir zemākas par 0°C un augstākas par 49°C, iznīcina nitrifikācijas baktērijas. Ziemas laikā sistēmu pārvaldību būtiski ietekmē zemas temperatūras, ja sistēmas ir pakļautas ārējiem laikapstākļiem.

Nemot vērā katras organismu grupas - zivju, augu, baktēriju - optimālo augšanas un izdzīvošanas temperatūru, jāizvēlas sugas, kurām ir atbilstoši un samērojami apstākļi. Ja tiek izmantota sistēma, kas ir vairāk pakļauta ārējo laikapstākļu izmaiņām, augu un zivju sugas izvēle ir rūpīgi jāizvērtē, tāpēc ieteicams izmantot akvapponikas sistēmas iekštelpās, kur klimatu var regulēt visa gada garumā.

Pētījums!

Ūdens temperatūras ietekme uz augšanas rādītājiem, barības vielām un mikrobu dinamiku akvapponikas sistēmās

Akvapponikas sistēmā, kas ražo brūnās foreles un saldo baziliku, tika aplūkota zemās ūdens temperatūras 11°C salīdzinājumā ar 21°C ietekme uz barības vielu plūsmu, augu un zivju augšanu, kā arī mikrobu dinamiku. Iegūtie dati parādīja, ka akvapponikas sistēmās zivju un augu augšanu būtiski ietekmē ūdens temperatūra. Aplūkojamā akvapponikas sistēma konstatēja, ka liekā ūdens siltuma izmantošana 21 °C temperatūrā ir piemērotāka kultūrai, jo zivis un augi šajā temperatūrā auga ātrāk. Sistēmas mikrobioloģiskās īpašības, biofiltra efektivitāti un barības vielu uzņemšanu negatīvi ietekmēja ūdens, kas bija 11 °C. Tika pierādīts, ka baziliks ir dārzeņkopības kultūra, ko var audzēt akvapponikas sistēmā. Rezultāti arī parādīja, ka zemā ūdens temperatūrā, izvēloties zivju barību un optimizējot barības vielu līmeni, jāievēro arī augu prasības. Šajā gadījumā augu un zivju attiecība bija 15:8, taču nepieciešami turpmāki pētījumi, lai noteiktu citas attiecības, kas saistītas ar barības vielām. Vēl viens būtisks faktors augstākas temperatūras izmantošanai akvapponikas sistēmā ir izaudzēto zivju un augu izmērs.

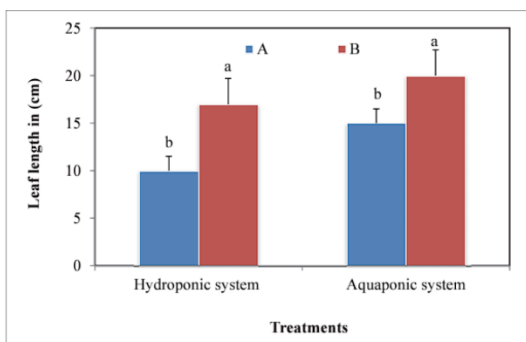


FIGURE 1. Effect of water temperature A = 11°C or B = 21°C in the hydroponics (control) system and the aquaponics system on leaf length (in cm) of sweet basil. Treatment means were separated using Tukey's HSD, with $P < 0.05$ considered significant. Each bar represents mean $\pm$ standard error. $n = 13$.

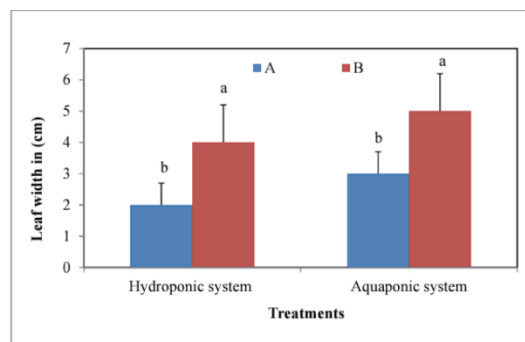


FIGURE 2. Effect of water temperature A = 11°C or B = 21°C in the hydroponics (control) system and the aquaponics system on leaf width (in cm) of sweet basil. Treatment means were separated using Tukey's HSD, with $P < 0.05$ considered significant. Each bar represents mean $\pm$ standard error. $n = 13$.

Khalil, S. (2018). Growth performance, nutrients and microbial dynamic in aquaponics systems as affected by water temperature. Eur. J. Hort. Sci, 83, 388-394.

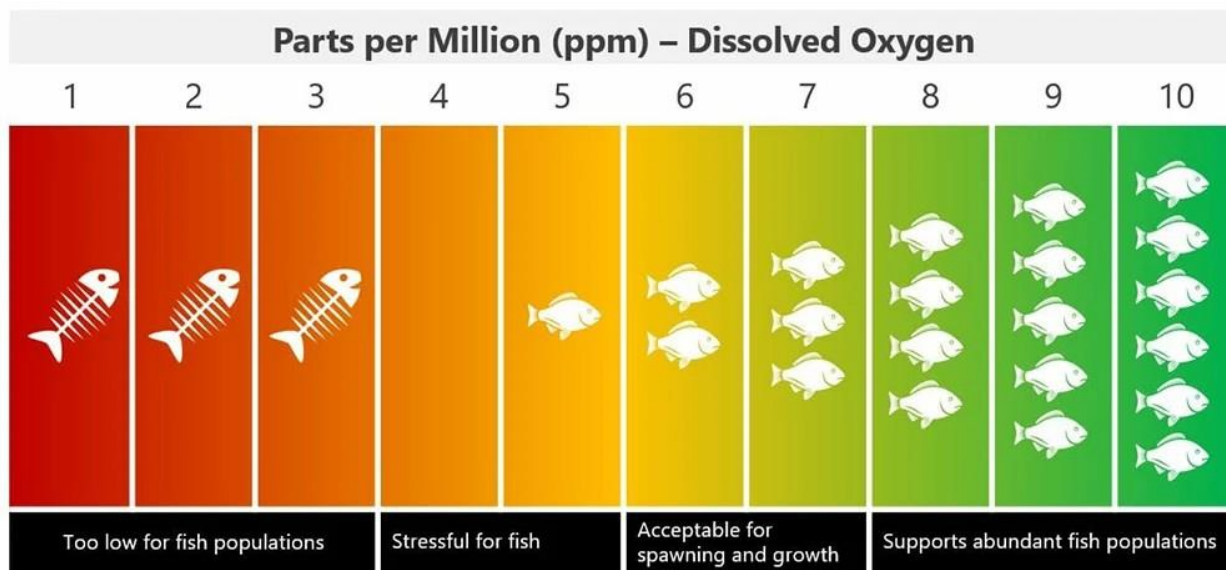
2.2. Skābeklis

Definīcija

Izšķīdušais skābeklis ūdenī attiecas uz skābekļa daudzumu, kas atrodas ūdenī, parasti apkārtējās vides temperatūrā. Tas ir izšķirošs faktors ūdens organismu izdzīvošanai, jo lielākajai daļai ūdens organismu, piemēram, zivīm, baktērijām un dažiem bezmugurkaulniekiem, ir nepieciešams skābeklis, lai tie spētu atjaunoties un veikt vielmaiņas procesus.

Izšķīdušā skābekļa līmeni ūdenī parasti mēra miligramos litrā (mg/L), procentos no piesātinājuma līmeņa vai miljondaļās (ppm). Piesātinājuma līmenis ir maksimālais skābekļa daudzums, ko ūdens var saturēt noteiktā temperatūrā un spiedienā. Tas mainās atkarībā no temperatūras un sāļuma, aukstāks ūdens var saturēt vairāk izšķīdušā skābekļa nekā siltāks ūdens.

Viens no būtiskākajiem zivju augšanas faktoriem ir izšķīdušais skābeklis (DO), kas ir svarīgs arī nitrificējošajām baktērijām, kuras zivju atkritumus pārvērš augiem uztveramās barības vielās. Lai uzturētu veselību un augšanu, siltūdens zivīm ir nepieciešams vairāk nekā 5 daļas uz miljonu (ppm) DO, ko var lietot aizvietojami ar miligramiem uz litru (mg/L). Savukārt aukstūdens zivīm nepieciešams vairāk nekā 6,5 ppm DO. Lai gan tilapijas un dažas karpu sugas var panest pazeminātu DO līmeni, tas ietekmēs to augšanas ātrumu (1. attēls). Zivju skābekļa patēriņu nosaka to lielums, suga, aktivitātes līmenis (barošanās un vairošanās) un ūdens temperatūra. Lielākas zivis, piemēram, parasti uzņem vairāk skābekļa nekā mazākas zivis. Savukārt mazākas zivis patērē vairāk skābekļa uz vienu svara vienību.



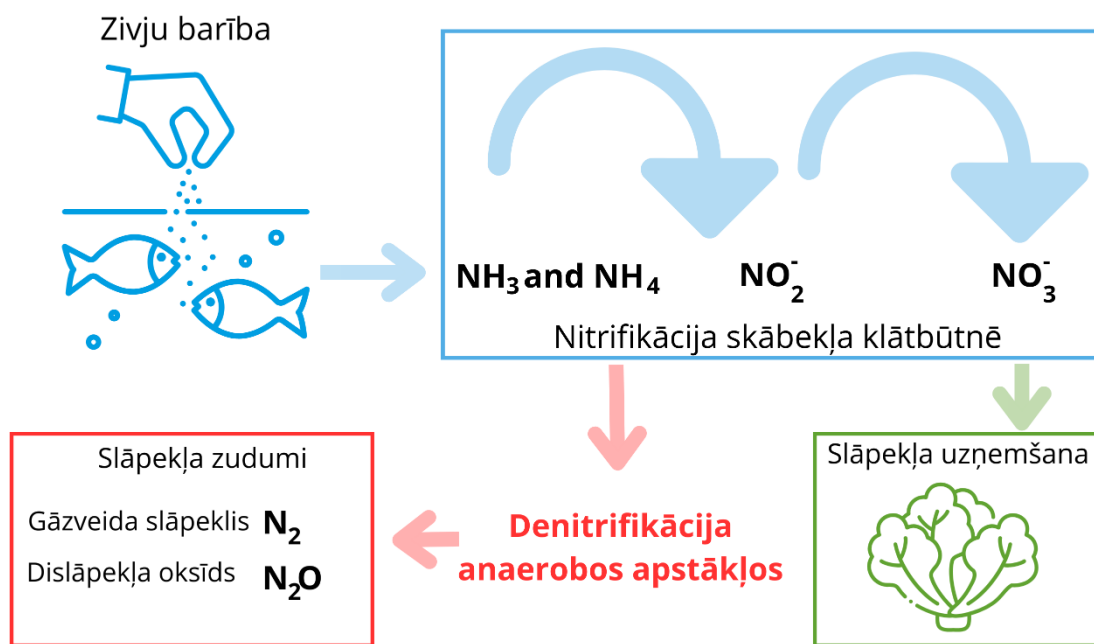
Attēls 1. Izšķīdušā skābekļa (DO) līmenis, kas nepieciešams veselīgas zivju populācijas uzturēšanai akvaponikas sistēmās. Vērtības izteiktas ppm (mg DO/L ūdens)¹.

¹ <https://atlas-scientific.com/blog/dissolved-oxygen-in-water-ppm-for-fish/>

Akvaponikas sistēmās ieteicams uzturēt DO līmeni 5-6 ppm vai vairāk. Jaunajā sistēmā skābekļa līmenis jāuzrauga bieži, bet pēc tam, kad ir izveidoti labvēlīgi apstākļi un sistēma ir nobalansēta (piemēram, izveidoti atbilstoši zivju krājumi un barošana, nodrošināta atbilstoša aerācija), DO mērījumi nav jāveic tik bieži. Amatieru akvakultūras audzētājiem, kas audzē zivis ar zemu zivju blīvumu, parasti nav problēmu ar zemu DO līmeni. Komerciālos uzņēmumos ar augstu zivju blīvumu šī problēma ir biežāk sastopama. Ja DO līmenis ir pārāk zems, palieliniet sistēmas aerāciju, pievienojot vairāk gaisa akmeņu vai izmantojot lielāku sūkni. Nav iespējams pievienot pārāk daudz skābekļa, jo, ūdenim piesātinoties, tas viss vienkārši iztvaikos atmosfērā. Skābekļa šķīdība ūdenī samazinās, palielinoties temperatūrai, kas norāda uz nepieciešamību nodrošināt nemainīgu ūdens temperatūru sistēmā.

Izņēmums attiecībā uz DO līmeni un tā ietekmi uz ūdens ķīmisko sastāvu var būt dziļūdens kultūrās (DWC – *deep water cultures*), kas klātas ar peldošiem materiāliem, tādējādi ierobežojot CO₂ šķīdību ūdenī, kas kombinācijā ar O₂ daudzumu var izraisīt nelielu ūdens pH paaugstināšanos.

Difūzijas, aerācijas, fotosintēzes, elpošanas un sadalīšanās procesi ietekmē izšķīdušā skābekļa daudzumu. Tādējādi sāļuma, temperatūras un spiediena svārstības parasti izraisa ūdenī izšķīdušā skābekļa satura svārstības.



Attēls 2. Mikrobu aktivitāte ar skābekli bagātos un anoksiskos apstākļos.

DO ir arī svarīgs faktors, kas ietekmē nitrifikācijas procesu akvaponikas sistēmā. Biofiltros, kur nitrifikācija ir visaktīvākā, notiek intensīva aerācija, kas ūdenī ievada skābekli, un tad nitrifikācijas baktērijas patērē izšķīdušo skābekli, lai oksidētu amonjaku. Bez pastāvīgas skābekļa piegādes nitrifikācijas reakcija būtībā apstājas. Optimālais DO līmenis nitrifikācijai ir 4-8 mg/L (4-8 ppm). Ja skābekļa līmenis ir zemāks (mazāks par 2 ppm), nitrifikācija ievērojami samazinās. Zema DO koncentrācija var radīt labvēlīgus apstākļus cita veida baktērijām - denitrifikācijas baktērijām (2. attēls). Šī baktērija var pārvērst vērtīgo augu barības vielu slāpekli atpakaļ par potenciāli kaitīgu amonjaku un tālāk par slāpekļa gāzi vai slāpekļa oksīdu, kas iztvaiko atmosfērā. Denitrifikācija būtībā izraisa slāpekļa zudumus sistēmā, tādējādi tā var potenciāli apturēt augu augšanu (2. attēls).

Arī augu saknēm, kas ir tiešā kontaktā ar ūdeni, nepieciešams minimāls DO līmenis. Augi parasti ir izturīgāki pret zema skābekļa satura apstākļiem nekā zivis vai akvaponiskās sistēmas darbībā iesaistītās baktērijas, tāpēc ir daudz svarīgāk nodrošināt mikrobu kopienas un, pats galvenais, zivju prasības. Akvaponikas sistēmās izšķīdušā skābekļa prasības augiem bieži vien ir līdzīgas tām, kādas tiem nepieciešamas tradicionālajās hidroponikas sistēmās. Gan zivis, gan augi akvaponikā ir atkarīgi no ūdenī izšķīdušā skābekļa, lai attīstītos. Ideālais izšķīdušā skābekļa līmenis augiem akvaponikā parasti ir no 5 līdz 8 miligramiem uz litru (mg/L), tomēr var pieļaut arī zemāku līmeni.

Vēl viena gāze, kas izšķīdusi akvaponikas sistēmā, ir oglekļa dioksīds (CO_2). Zivju elpošanas rezultātā ūdenī izdalās oglekļa dioksīds (CO_2). Paaugstināts ūdenī izšķīdušā CO_2 līmenis kavē CO_2 difūzijas procesu no zivju asinsrites. Paaugstināts oglekļa dioksīda līmenis zivju asinsritē izraisa asins pH samazināšanos, kas samazina hemoglobīna spēju saistīt skābekli. Ūdenī oglekļa dioksīds samazina pH, saskaroties ar ūdeni, nepārtraukti disociējot par ogļskābi (H_2CO_3). Palielinot zivju blīvumu, izdalās vairāk oglekļa dioksīda, tādējādi samazinot kopējo pH līmeni. Šī parādība pastiprinās, ja zivis ir aktīvākas, piemēram, paaugstinātas temperatūras gadījumā. Līdzīgi kā skābekļa, arī CO_2 šķīdība samazinās, paaugstinoties ūdens temperatūrai. Jebkura gāzes pārvades vai aerācijas ierīce, kas ir pakļauta atmosfēras iedarbībai, neizbēgami izraisa CO_2 izvadīšanu. Augstas caurlaidības sistēmās un liela mēroga akvaponikas sistēmās kā papildu moduli var pievienot atgāzēšanas ierīci, kas palīdz atbrīvot izšķīdušo CO_2 , tomēr parasti pietiekama atgāzēšana tiek panākta ar biofiltru vai ūdens strūklu starp dažādām sistēmas daļām. Tas atkal parāda, ka ir nepieciešama pareiza zivju tvertnes, biofiltra un kopumā visas sistēmas aerācija ne tikai, lai nodrošinātu pietiekamu DO līmeni, bet arī lai nodrošinātu CO_2 izdalīšanos.

2.3. pH

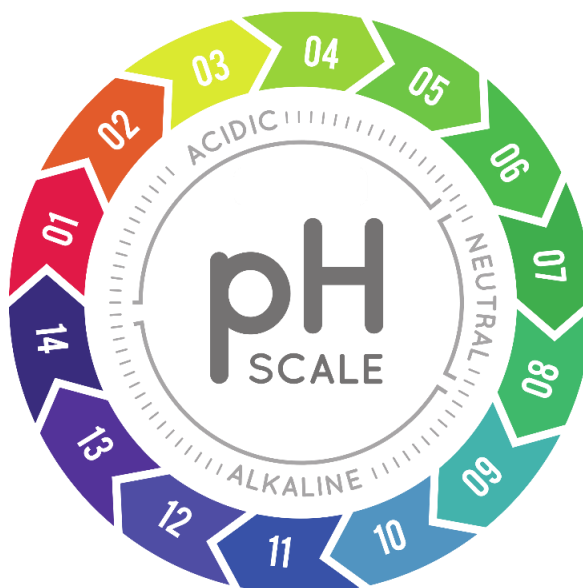
Definīcija

pH ir ūdens šķīduma skābuma vai bāziskuma mērījums. Terminu “pH” pirmo reizi izmantoja dāņu bioķīmiķis Søren Peter Lauritz Sørensen, kurš to ieviesa 1909. gadā. pH skala ir logaritmiskā skala, kas svārstās no 0 līdz 14, 7 uzskatot par neitrālu. Šķīdumu, kura pH ir zemāks par 7, uzskata par skābu, bet šķīdumu, kura pH ir lielāks par 7, – par bāzisku vai sārmainu. Šķīduma pH vērtība ir atkarīga no šķīdumā esošo ūdeņraža jonu (H^+) koncentrācijas. Zems pH nozīmē, ka ir augsta H^+ jonu koncentrācija, bet augsts pH nozīmē, ka ir zema H^+ jonu koncentrācija. Šķīduma pH var izmērīt, izmantojot pH metru vai pH indikatorpapīru. pH ir liela nozīme daudzos bioloģiskos un ķīmiskos procesos, un pareizas pH balansa saglabāšana akvapponikas sistēmās ir izšķiroša veiksmīgai augu un zivju attīstībai.

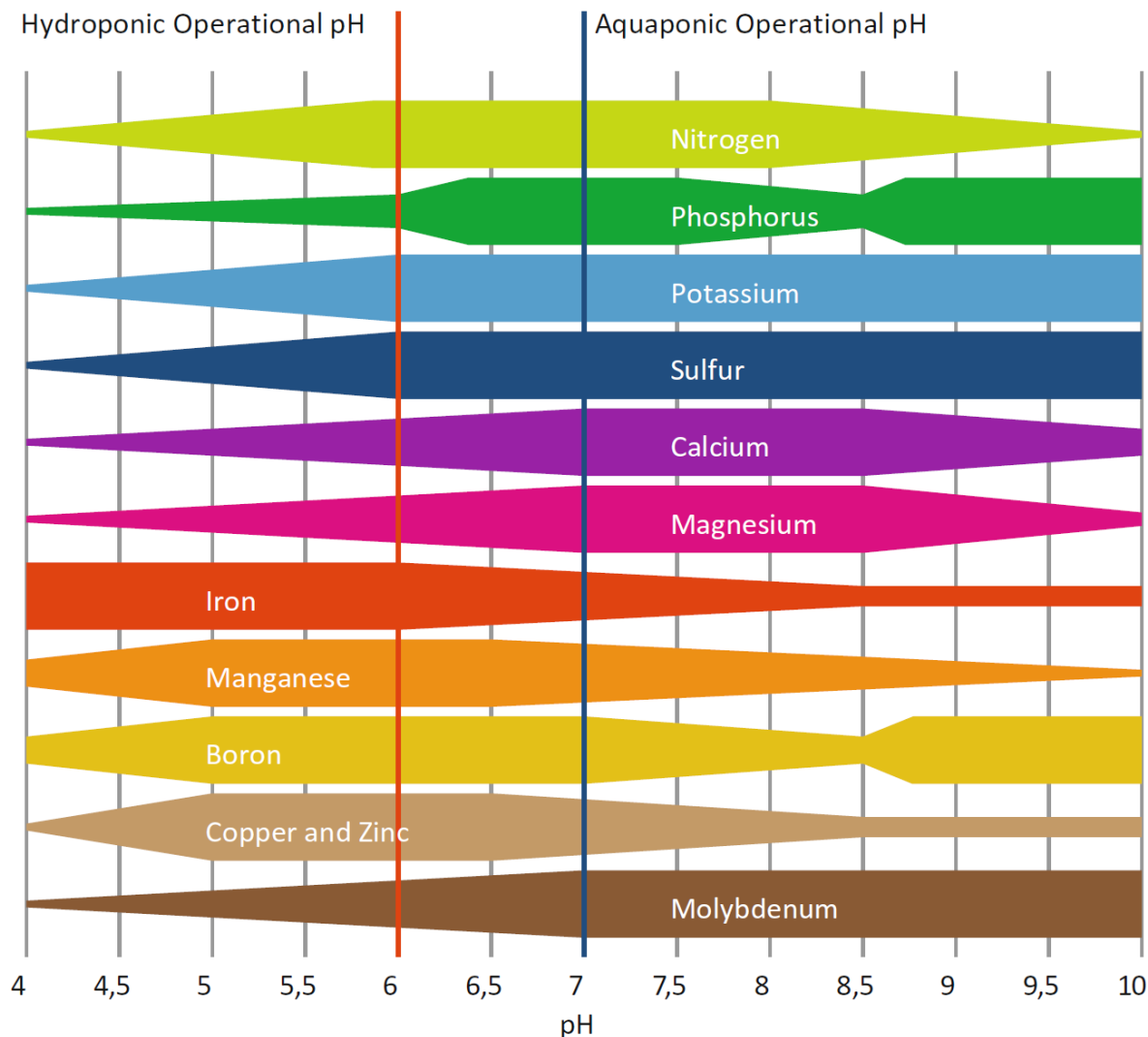
Ūdens pH hidroponikā ir būtisks, lai augi varētu uzņemt barības vielas (3. attēls). Pamatojoties uz sistēmas ūdens pH, pētījumi liecina, ka noteiktas barības vielas ir pieejamas noteiktā pH diapazonā. Līdz ar to pH ir jāneregulē līdz vērtībai, kas maksimāli palielina barības vielu maisījuma pieejamību (4. attēls). Ir jāatrod pH vērtības kompromiss, jo dažādas jonu barības vielu formas ir pieejamākas pie dažādiem pH līmeņiem. Lai maksimāli palielinātu barības vielu pieejamību, hidroponikas nozarē pH parasti regulē no 4,5 līdz 6,0 (skāba vide), jo īpaši sterilizētās hidroponikas un substrāta kultūru sistēmās.

No otras puses, recirkulācijas akvakultūras sistēmās pH tiek noteikts zivju augšanai un labturībai labvēlīgākā līmenī. Zivju augšanai aptuvenais noteiktais pH līmenis ir 7,5, kas ir arī optimālais pH līmenis mikrobu augšanai, jo īpaši nitrifikācijas baktērijām, kuras zivju atkritumus pārvērš mazāk toksiskā slāpekļa formā, kas ir vieglāk pieejama augiem.

Tā kā akvapponikā izmantotajiem organismiem ir atšķirīgas pH prasības, rodas ar pH saistītas grūtības. Ja saldūdens zivju sugu recirkulācijas akvakultūras sistēmām (RAS) parasti ir nepieciešams pH no 7,0 līdz 8,0, tad hidroponiski audzētiem augiem parasti ir nepieciešami pH rādītāji no 4,5 līdz 6,0. Šajās vidēs ir jānodrošina arī mikroorganismu, kas zivju atkritumos potenciāli bīstamos savienojumus pārveido mazāk bīstamās formās, klātbūtne. Rezultātā jebkurš noteiktais pH līmenis ir kompromiss starp mikrobu, zivju un augu prasībām. Tas apstiprina apgalvojumu, ka akvapponiskajā sistēmā nav iespējams panākt ideālu pH līmeni visām dzīvajām būtnēm, kas varētu izraisīt palēninātu augu augšanu. Tāpēc, pielāgojot sistēmas pH tā, lai netiktu ietekmēta ne augu, ne zivju augšana, tādējādi apgrūtinot to optimālo augšanu, jāņem vērā barības vielu pieejamība.



Attēls 3. pH skala, kurā norādītas skābuma un sārmainības vērtības diapazonā no 1 līdz 14 pH.



Attēls 4. Barības vielu pieejamība atkarībā no ūdens vides pH².

Hidroponikas un akvakultūras optimālās pH atšķirības, iespējams, ir viena no galvenajām problēmām akvapponikas sistēmās. pH nesaderība abās sistēmās liecina, ka, iespējams, šo problēmu varētu atrisināt atdalītas akvapponikas sistēmas. Šādā sistēmā ūdens netiek atkārtoti izmantots/recirkulēts atpakaļ zivju tvertnē, bet gan izmantots kā barības vielām bagāts ūdens augiem, pēc tam to novadot vidē. Lai gan šāds risinājums ļautu izvairīties no suboptimāla pH līmeņa, tajā nav ņemta vērā vajadzība pēc specifiska mikrobioma sistēmā. Ūdens recirkulācija ir nepieciešama, lai izveidotu funkcionējošu biofiltra mikrobiomu, kas efektīvi pārveido zivju atkritumus par augiem pieejamām barības vielām. Turklāt šādās sistēmās augi var veidot būtisku simbiozi ar baktērijām, kas savukārt var palīdzēt asimilēt barības vielas no recirkulētā ūdens. Akvapponikas sistēmās barības vielas augiem galvenokārt ražo zivis, nevis piegādā tās kā mēslojumu (kā hidroponikas sistēmās), tāpēc dažādas nitrificējošo baktēriju sugas (*Nitrosomonas* spp. un *Nitrobacter* spp.) ir būtisks elements akvapponikas funkcionēšanā. Sarežģītā simbioze starp augiem un mikrobiem ir

² Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future (Akvapponikas pārtikas ražošanas sistēmas: kombinētas akvakultūras un hidroponiskās ražošanas tehnoloģijas nākotnei) (p. 619). Springer Nature.

veiksmīgas darbības atslēga, un šī apvienība var nodrošināt pat labākus augu augšanas rādītājus nekā standarta hidroponika.

Pētījums!

pH ietekme uz gurķu augšanu un barības vielu pieejamību akvaponikas sistēmā ar minimālu suspendēto daļiņu aizvākšanu

Rakstā pētīta pH ietekme uz barības vielu pieejamību un uzņemšanu atsaistītā akvaponiskā sistēmā. Pētījums tika veikts, izmantojot akvakultūras notekūdeņus no tilapijas kultūras tvertnēm četros pH apstrādes veidos: pH 5,0, 5,8, 6,5 un 7,0, ko izmanto gurķu kultūras apūdeņošanai. Rezultāti parādīja, ka pH praktiski neietekmē augšanas ātrumu vai ražību divu veģetācijas periodu laikā. Tomēr vairāku barības vielu pieejamību un uzņemšanu ietekmēja pH. Sistēmā izmantotā kalcija sulfāta un magnija oksīda šķīdība palielinājās, samazinoties pH līmenim, kā rezultātā pie zemāka pH tika novērots lielāks kalcija un magnija daudzums. pH ietekmēja arī fosfora asimilāciju augu audos, paaugstinot fosfora uzņemšanu pie augsta pH līmeņa. Tomēr augsts pH līmenis (7,0) samazināja fosfora uzņemšanu. Nitrātu asimilācija lapu audos būtiski atšķīrās ar pH, uzrādot vislielāko asimilāciju pie pH 5,8 un viszemāko pie pH 6,5. Kalcija uzņemšana uzrādīja visaugstāko līmeni pie pH 6,5. Barības vielu koncentrācija akvakultūras notekūdeņos tika uzskatīta par zemu salīdzinājumā ar hidroponiskajiem šķīdumiem, bet lapu audu elementārā analīze bija ieteicamajos diapazonos.

Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. *Horticulturae*, 6(1), 10.

2.4. Ūdens cietība

Definīcija

Kopējā ūdens cietība ir divvalento katjonu, galvenokārt kalcija un magnija, kopējās koncentrācijas mērījums ūdenī. To parasti izsaka kalcija karbonāta ekvivalenta vienībās, un to izmanto, lai novērtētu ūdens spēju veidot katlakmens nogulsnes un tā ietekmi uz dažādiem rūpniecības, sadzīves un vides procesiem.

Šis mērījums kvantitatīvi izsaka kopējo minerālvielu saturu ūdenī, un tas ir svarīgs dažādiem pielietojumiem, tostarp ūdens attīrīšanai, lauksaimniecībai, kā arī, lai novērtētu ūdens piemērotību konkrētiem lietojumiem. Kopējo ūdens cietību var klasificēt kā "mīkstu" (zema cietība) vai "cietu" (augsta cietība), pamatojoties uz klātesošo kalcija un magnija jonu koncentrāciju.

Ūdens cietību var izteikt un aprakstīt divos veidos - nekarbonātu cietība un karbonātu cietība. Nekarbonāta cietībai nav būtiskas ietekmes uz akvaponikas procesu, taču karbonāta cietība ietekmē ūdens sārmainību, tāpēc tā var mainīt pH.

Nekarbonāta cietība ir ūdenī esošo kalcija (Ca^{2+}) un magnija (Mg^{2+}), kā arī, lai gan ar mazāku ietekmi, dzelzs (Fe^{+}) jonu daudzums. Šo jonu koncentrāciju parasti mēra mg/L vai ppm. Šo jonu daudzums ūdenī lielā mērā ir atkarīgs no ūdens avota - lielāks Ca un Mg daudzums parasti ir ūdenī, kas iegūts no kaļķakmens ūdens slāņiem. Savukārt lietus ūdenim ir zems ūdens cietības līmenis. Abi elementi būtiski ietekmē gan zivis, gan augus akvaponikas sistēmā.

Karbonātu cietība ir ūdenī izšķīdušo karbonātu (CO_3^{2-}) un bikarbonātu (HCO_3^{-}) daudzums, ko mēra mg/L CaCO_3 . Karbonātiem šķīdumos (ūdenī) ir sārmains pH. Ūdenī karbonāti darbojas kā buferis, neļaujot strauji mainīties pH. Ūdeņraža joni (H^{+}), kas izdalās no akvaponikas sistēmā radušās skābes, saistās ar ūdenī esošajiem karbonātiem vai bikarbonātiem, tādējādi novēršot straujas pH izmaiņas. Nitrificējošās baktērijas ražo slāpekļskābi (HNO_3), kas disociējas ūdeņraža un nitrātu jonos - nitrātus augi asimilē, bet ūdeņraža jonus ne, un tie var strauji samazināt sistēmas pH. Ja karbonātu cietība akvaponikas sistēmā ir zema, H^{+} joni uzkrājas un samazina pH (kļūst skābi), traucējot visas sistēmas darbību, tāpēc ir svarīgi, lai karbonātu un bikarbonātu koncentrācija būtu līdzsvarota.

Izvairīties no karbonātu un bikarbonātu noplicināšanās akvaponikas sistēmā var regulāri papildinot sistēmu ar svaigu ūdeni no vēlamā ūdens avota vai pievienojot bikarbonātus. Ūdens cietības regulēšanu var panākt, izmantojot filtrēšanas sistēmas, kas izveidotas, lai sagatavotu ienākošo ūdeni atbilstoši katras atsevišķas sistēmas vajadzībām. Optimālā kopējās cietības vērtība (nekarbonātu un karbonātu cietības summa) akvaponikā ir 60-140 mg/L (2. tabula). Ūdens mīkstināšanai ir iespējams pievienot ķīmiskās vielas, tomēr ir jāizvairās no ūdens sāļuma palielināšanas vai citiem savienojumiem, kas potenciāli varētu kaitēt zivīm un augiem.

Tabula 2. Ūdens cietības līmeņi, pamatojoties uz kalcija karbonāta koncentrāciju.

Ūdens cietības līmenis	Koncentrācija (mg/L)
Mīksts	0-60

Vidēji ciets	60-120
Ciets	120-180
Ļoti ciets	>180

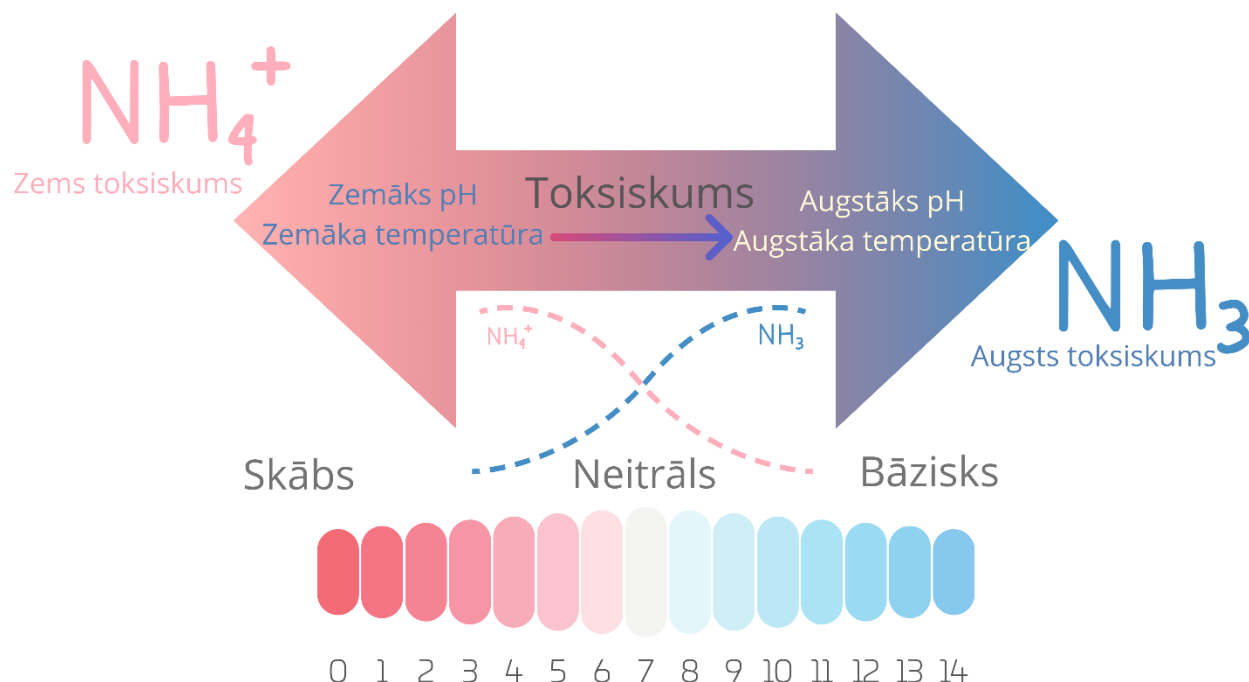
2.5. Galvenā barības viela- slāpeklis

Definīcija

Slāpeklis ir viena no svarīgākajām barības vielām jebkurā dzīvajā organismā - tas ir būtiska dezoksiribonukleīnskābes (DNS), ribonukleīnskābes (RNS), aminoskābju sastāvdaļa, kas ir olbaltumvielu pamatelementi. Slāpeklis dažādās formās ir sastopams akvaponikas sistēmā, pirmkārt, kā amonjaks (NH_3) vai amonijijs (NH_4^+); ar laiku akvaponikas sistēmā baktērijas sāks vairoties un pārvērtīs amonjaku/amoniju nitrītā (NO_2^-) un pēc tam nitrātā (NO_3^-). Funkcionējoša slāpekļa cikla izveide ir vissvarīgākais process akvaponikā.

Akvaponikas kontekstā barības ķēdes komponenti, proti, primārie ražotāji un patērētāji, parasti ir telpiski nodalīti attiecīgi akvakultūras un hidroponikas nodalījumos. Mikroorganismi nodrošina sinerģisko efektu, kas ļauj efektīvi izmantot barības vielas. Slāpeklis akvaponikas sistēmā tiek ievadīts ar zivju barību, galvenokārt olbaltumvielu veidā. Šīs olbaltumvielas zivis patērē un pēc tam izvada kā amonjaku (NH_3) un amoniju (NH_4^+). Palielinoties olbaltumvielu saturam barībā, attiecīgi palielinās slāpekli saturošu vielu pieejamība sistēmā. Aptuveni 30% olbaltumvielu zivis izmanto vielmaiņas procesiem un augšanai, bet atlikušo daļu zivis izdala kā atkritumus. Zivis slāpekli saturošas ķīmiskās vielas izvada caur žaunām, kā arī ar urīnu un ekskrementiem, galvenokārt amonjaka veidā, kas sastāv gan no nejoniētā amonjaka, gan amonija joniem.

Amonjaks var pastāvēt divos dažādos stāvokļos: nejoniētā, apzīmēts kā NH_3 , un jonizētā, apzīmēts kā NH_4^+ , kas bieži tiek dēvēts par amonija jonu. Nejoniētā amonjaka toksiskums zivīm ir labi dokumentēts, savukārt jonizēts amonjaks parasti netiek uzskatīts par toksisku zivīm. Līdzsvara attiecība starp NH_3 un NH_4^+ ūdens šķīdumos ir atkarīga no pH un temperatūras apstākļiem (5. attēls). Ja pH līmenis ir vienāds ar vai zemāks par 7,0, lielākā daļa amonjaka, proti, vairāk nekā 95 %, ir netoksiskā stāvoklī amonija jonu (NH_4^+) veidā. Paredzams, ka, paaugstinoties pH līmenim, ievērojami palielināsies netoksiskā un toksiskā amonjaka attiecība. Attiecību starp NH_3 un NH_4^+ ietekmē arī ūdens temperatūra, jo siltākā ūdenī ir augstāka NH_3 koncentrācija, kas ir bīstamāka forma, salīdzinot ar vēsāku ūdeni, pie noteikta pH līmeņa. Amonjaka šķīdība ūdenī ir zemāka salīdzinājumā ar NH_4^+ jonu šķīdību. Rezultātā NH_3 ātri pārvēršas gāzveida stāvoklī un pēc tam izdalās no ūdens, radot raksturīgu amonjaka smaku.



Attēls 5. Amonjaka un amonija koncentrācijas atkarība no temperatūras un pH.

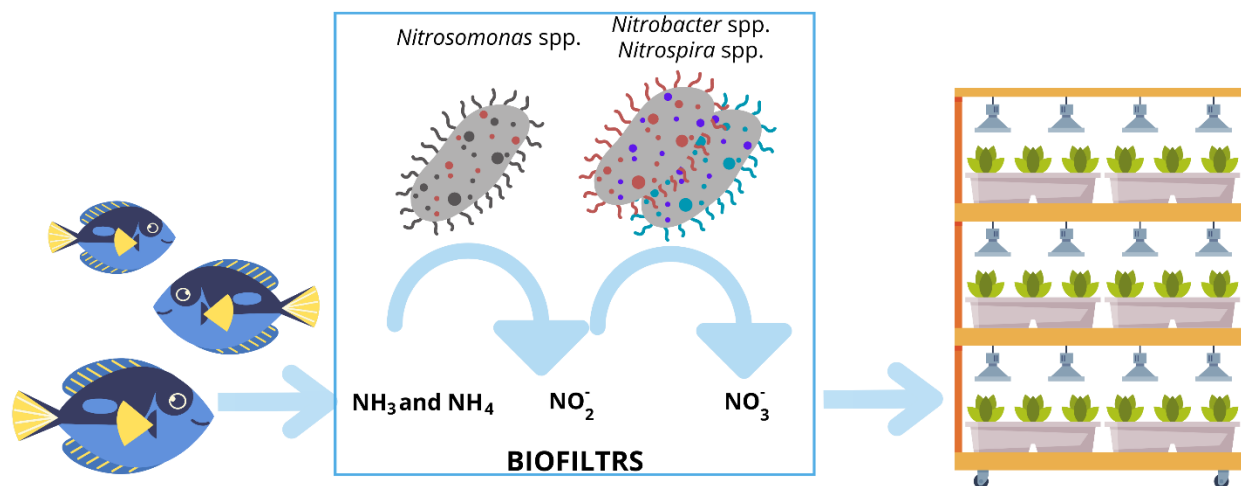
Lai gan parasti tiek uzskatīts, ka amonijam ir zema toksicitāte attiecībā uz sistēmā esošajiem organismiem, amonjaks ir ļoti kaitīgs, tāpēc tas ir jāizvada no sistēmas vai jāpārvērš nitrātu veidā. Nitrifikācijas procesa starpproduktam, kas pazīstams kā nitrīts (NO_2^-), ir ievērojams toksiskuma līmenis attiecībā uz zivīm. Ir aprēķināts, ka nitrīti zivīm ir aptuveni 100 reižu kaitīgāki nekā nitrāti. Amonjaks ietekmē zivju centrālo nervu sistēmu, savukārt nitrīts izraisa problēmas, kas saistītas ar skābekļa piesaistīšanu. Ir konstatēts, ka atsevišķas zivju sugas ir tolerantas pret nitrātu koncentrāciju līdz 300 mg/L un vairāk. Turpretī amonjaka un nitrītu tolerances vērtības ir daudz zemākas - attiecīgi 0,07 mg/L un 1 mg/L. Turklāt jāatzīmē, ka nitrītus un amonjaku neuzskata par augiem labvēlīgākajiem slāpekļa avotiem. Patiesībā augi parasti dod priekšroku amonijam un nitrātiem kā galvenajiem slāpekļa avotiem, jo šie savienojumi ir labvēlīgāki to augšanai un attīstībai. Ir konstatēts, ka paaugstināta nitrātu koncentrācija, kas pārsniedz 250 mg/L, nelabvēlīgi ietekmē augu augšanu, veicinot pārmērīgu veģetatīvo attīstību un potenciāli bīstamu nitrātu uzkrāšanos augu lapās. Šī uzkrāšanās rada ievērojamu risku cilvēku veselībai. Ieteicams uzturēt nitrātu līmeni 5-150 mg/L robežās un veikt ūdens nomaiņu, ja līmenis pārsniedz šo robežu. Amonjaka un nitrītu klātbūtne liecina, ka biofiltros pilnībā nenotiek pārveides process, kas pazīstams kā nitrifikācija. Ir ļoti svarīgi nekavējoties risināt šo problēmu, uzlabojot nitrifikācijas baktēriju aktivitāti, ko var panākt ar aerāciju.

Definīcija

Nitrifikācija ir bioloģisks process slāpekļa ciklā, kas ir būtisks reducētā slāpekļa (amonjaka un amonija) veida pārvēršanai oksidētā veidā (nitrātā), kas ir stabilāks un mazāk toksisks. Pēc tam nitrātu var uzņemt augi, nodrošinot tiem slāpekļa avotu augšanai. Šis process palīdz arī likvidēt lieko amonjaku ūdenī, kas ir svarīgi vides un ūdens kvalitātes uzturēšanai. Nitrifikācijas procesu veic noteikta veida baktērijas, galvenokārt *Nitrosomonas* un *Nitrobacter*, lai gan var iesaistīt arī citus mikroorganismus.

Ja netiek novērsta zivju izdalītā amonjaka uzkrāšanās, tas var izraisīt zivju mirstību. Saistībā ar akvaponikas sistēmām ir vērts atzīmēt, ka zivju izdalītais amonjaks tiek efektīvi likvidēts, pateicoties nitrificējošo baktēriju darbībai. Šīs baktērijas veicina divpakāpju procesu, ko sauc par nitrifikāciju, kurā amonjaks tiek pārvērsts nitrātu slāpekļī. Sākotnēji amonjaka un amonija pārvēršanu nitrītos (NO_2^-) veicina dažādas baktēriju sugas, proti, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* un *Nitrosovibrio* spp. Minētās procedūras laikā ir nepieciešama skābekļa klātbūtne, samazinās sārmainība, rodas skābe ūdeņraža jonu (H^+) veidā un pazeminās pH līmenis. Otrajā posmā nitrītu (NO_2^-) pārvēršanu nitrātos (NO_3^-) veicina dažādas baktēriju sugas, proti, *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* un *Nitrospina*. Jāatzīmē, ka nitrīti ir īpaši bīstami zivīm. Pašreizējā izpratnē liecina, ka *Nitrospira* ir visaptverošs nitrifikators, kas nozīmē, ka tā ir iesaistīta gan nitrītu, gan nitrātu veidošanā. Šī procesa otrajā posmā arī ir nepieciešama skābekļa klātbūtne, un tā rezultātā samazinās pH. Līdz ar to ir ļoti svarīgi uzraudzīt ūdens cietību, lai ņemtu vērā nitrifikācijas ietekmi un karbonātu buferspēju. Šajā reakcijā radušies nitrāti nav toksiski un darbojas kā augu barības vielu avots akvaponikas sistēmas hidroponiskajā aspektā (6. attēls).

Nitrifikācija ir visefektīvākā apstākļos, ko raksturo augsts izšķīdušā skābekļa līmenis un zema organisko vielu koncentrācija, ko galvenokārt veido neizēstie zivju milti/barība un uzkrātie cietie atkritumi. Ja skābekļa līmenis ir nepietiekams, nitrifikācijas process var palēnināties vai pilnībā apstāties, kā rezultātā amonjaka līmenis var palielināties līdz tādām līmenim, kas rada toksicitātes risku ūdens organismiem, jo īpaši zivīm. Amonjaka pārvēršana par nitrītiem parasti ir nitrifikācijas procesa posms, kas visvairāk ierobežo kopējo transformācijas ātrumu. Šo parādību var izskaidrot ar atšķirīgo baktēriju augšanas ātrumu, amonjaku oksidējošās baktērijas, piemēram, *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosovibrio* sp., un nitrītus oksidējošās baktērijas, tostarp *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus* u. c., aug un dalās ar dažādu ātrumu. Atšķirīgie augšanas tempi izraisa daļēju nitrifikāciju, jo īpaši sistēmas darbības sākumposmā, kā rezultātā uzkrājas nitrītu joni (NO_2^-), līdz nitrificējošie mikroorganismi pilnībā nostiprinās, izveidojot stabilu populāciju, un šis process var ilgt līdz pat četrām nedēļām. Baktērijas lielākoties veido un apdzīvo biofilmu, kas piestiprinās pie biofiltrā esošā materiāla. Tomēr tās var novērot arī citos sistēmas nodalījumos, piemēram, peldošās gultnes kamerās vai augšanas substrāta slāņos.



Attēls 6. Baktēriju sugas biofiltrā, kas iesaistītas nitrifikācijas procesā.

Amonjaka un nitrītu likvidēšanas procesu akvaponikas sistēmās parasti sauc par biofiltrāciju (6. attēls). Biofiltrācija kalpo kā izšķirošais savienojums starp akvaponikas sistēmas zivjaudzētavas (akvakultūras)

elementu un hidroponisko elementu. Nitrificējošo baktēriju aktivitāte ievērojami samazinās, ja tās tiek pakļautas paaugstinātai amonjaka koncentrācijai. Amonjakam piemīt antimikrobiālas īpašības, un tas var kavēt nitrificējošo baktēriju darbību, ja tā koncentrācija pārsniedz 4 mg/L, tādējādi samazinot to efektivitāti. Situācija potenciāli var eksponenciāli pasliktināties, ja nepietiekama izmēra biofiltru pārslogo amonjaks, izraisot baktēriju bojāeju un turpmāku amonjaka līmeņa paaugstināšanos. Ja zivju audzēšanas komponentā nav stabila un darbotiespējīga biofiltra, veidojas atkritumproduktu uzkrāšanās, nepietiekama augu barības vielu veidošanās un pasliktinās sistēmas darbība.

Biofiltrs kalpo kā dzīvotne nitrificējošo mikroorganismu kolonizācijai (7. attēls). Atsevišķos gadījumos atsevišķi izdalīta biofiltra izmantošana var nebūt nepieciešama, piemēram, plostu un ar substrātu pildītās akvaponikas sistēmās, jo pieejamais virsmas laukums un citas sastāvdaļas, var būt piemērotas baktēriju kolonizācijai. Tomēr ir vērts atzīmēt, ka lielākajā daļā šo sistēmu turpina izmantot biofiltru, lai veicinātu organisko vielu sadalīšanos un uzlabotu mikroelementu un ūdenī izšķīdušā skābekļa klātbūtni. Saistībā ar barības vielu plēves tehnikas (NFT – *nutrient film technique*) sistēmām patiešām ir svarīgi iekļaut atsevišķu biofiltru. Pārāk liels biofiltrs nerada kaitējumu akvaponikas sistēmai. Lai gan ir tiesa, ka liels biofiltrs var radīt papildu izdevumus, ir pierādījies, ka lieka biofiltrācijas jauda daudzos gadījumos ir noderīga, lai novērstu sistēmas kļūmes.



Attēls 7. Biofiltrs akvaponikas sistēmai Roslagenas Universitātes studentu pilsētiņā, Norteljē.

Pieņemot, ka ir ievēroti galvenie ūdens kvalitātes faktori, tostarp pH, izšķīdušā skābekļa līmenis, temperatūra un virsmas laukums, var secināt, ka baktērijas ir izveidojušas noturīgas kolonijas un darbojas efektīvi. Ņemot vērā baktēriju nozīmi akvaponikā, ir nepieciešams novērtēt to vispārējo veselības stāvokli viscaur akvaponikas sistēmai. Baktērijas ir mikroskopiski organismi, kurus nevar novērot ar neapbruņotu aci, tāpēc vizuālai noteikšanai ir nepieciešams izmantot mikroskopu. Pastāv vienkārša pieeja baktēriju darbības uzraudzībai, kas ietver amonjaka, nitrītu un nitrātu līmeņa novērtēšanu. Šī metode ļauj iegūt

vērtīgu informāciju par baktēriju kolonijas vispārējo veselību. Labi funkcionējošā un sabalansētā akvaponikas sistēmā amonjaka un nitrītu līmenis obligāti jāuztur 0-1 mg/L robežās. Abu šo elementu klātbūtne norāda uz iespējamām problēmām ar nitrificējošajām baktērijām. Pastāv divi izplatītākie skaidrojumi šīs parādības rašanās iemesliem. Sākotnēji var novērot, ka biofiltra jauda ir nepietiekama, lai uzņemtu pašreizējo zivju un zivju barības daudzumu. Līdz ar to pastāv nelīdzsvarotība, kas izraisa zivju izdalīto barības vielu pārpilnību. Lai risinātu šo problēmu, viens no iespējamajiem risinājumiem ir vai nu palielināt biofiltra izmērus, vai samazināt zivju populāciju, vai arī mainīt zivju barošanas režīmu. Reizēm šī problēma var rasties, ja sistēmas sākotnējais līdzsvars tiek izjaukts zivju augšanas un to pastiprinātas barošanās dēļ, kas pārsniedz biofiltra ietilpību, kura izmērs paliek nemainīgs. Turklāt gadījumā, ja sistēma ir proporcionāla, ir ticams, ka var būt traucēta pašu baktēriju funkcionalitāte. Šis novērojums var liecināt par iespējamu problēmu saistībā ar ūdens kvalitāti.

Baktēriju koloniju veidošanās fenomenu akvaponikas sistēmas sākotnējās uzstādīšanas laikā parasti dēvē par biofiltra izveidi vai cikliskumu. Cikliskums ir būtiska sākotnējā procedūra akvaponikas sistēmas izveidē. Cikla pabeigšana ir atkarīga no patstāvīgas nitrificējošo baktēriju kopienas izveidošanās. Bez šī izšķirošā soļa augu augšana kļūst neiespējama, un vide var kļūt kaitīga zivju labklājībai. Ieteicams uzsākt sistēmas cikliskuma procesu bez zivju klātbūtnes, līdz biofiltros izveidojas stabils mikrobioms. Lai veicinātu nitrificējošo baktēriju kopienu veidošanos, ir pieejamas komerciālas mikrobu sabiedrību starteru kombinācijas. Tas, savukārt, samazina laiku, kas nepieciešams, lai šīs baktērijas sasniegtu atbilstošu populācijas lielumu sistēmā un biofiltros.

Denitrifikācija ir process, kurā nitrāti (NO_3^-) pārveidojas par nitrītiem (NO_2^-), slāpekļa oksīdu (NO), dislāpekļa oksīdu (N_2O) un galu galā par slāpekļa gāzi (N_2) vidē, kurai raksturīgs izšķīdušā skābekļa trūkums (anoksiska vai anaeroba vide) vai ļoti zems tā daudzums (2. attēls). Denitrifikācija ir bioloģisks process, ko veic denitrifikatori, kas ietver dažādas arheju un fakultatīvi heterotrofu baktēriju taksonomiskās grupas. Tā kā dažu slāpekļa gāzu iedarbība kā siltumnīcefekta gāzes ir lielāka nekā CO_2 , ir svarīgi samazināt N_2O veidošanos, lai optimizētu N asimilācijas ātrumu augu biomasā.

3. Mikroorganismi akvaponikā

Akvaponika ir simbiotiska sistēma, kas galvenokārt sastāv no zivīm, nitrificējošiem mikroorganismiem un augiem. Tomēr laika gaitā daudzi papildu organismi var piedalīties šīs konkrētās vides veidošanā un ietekmēšanā. Dažiem dzīvniekiem, piemēram, sliekām, var būt labvēlīga loma, palīdzot zivju atkritumu sadalīšanās procesā. Biofiltros dzīvo daži organismi, jo īpaši dažādi vēžveidīgie, kurus var klasificēt kā labdabīgas būtnes, kas aktīvi neveicina vai netraucē sistēmas darbību kopumā. Akvaponikā apdraudējumu rada dažādi organismi, tostarp parazīti, kaitēkļi un cita veida baktērijas. Šo organismu pilnīga izskaušana ir sarežģīts uzdevums, jo akvaponikas sistēmām raksturīga ir nesterilitāte. Lai mazinātu šo nelielo risku potenciālo pāraugšanu bīstamās invāzijās, ir obligāti jāpieņem optimāla pārvaldības pieeja, kas ietver izturīgu zivju un augu audzēšanu. To var panākt, rūpīgi uzturot apstākļus ar augstu skābekļa saturu un nodrošinot plašu piekļuvi visām nepieciešamajām barības vielām. Šādā veidā organismi spēj aizsargāties pret infekcijām vai slimībām, izmantojot savu imūnsistēmu.

3.1. Aļģes

Definīcija

Aļģes ir daudzveidīga fotosintētisko organismu grupa, kas pārsvarā dzīvo ūdens apstākļos, bet var augt arī sauszemes un pat ekstremālā vidē. To lielums var būt no mikroskopiskiem vienzūnas organismiem līdz lieliem daudzšūnu organismiem. Tā kā aļģēm trūkst daudzu specializētu struktūru un audu, kas sastopami augos, piemēram, sakņu, kātu un lapu, tās nav klasificētas kā augi.

Aļģes cita starpā ietver taksonomiskās kategorijas, kas sastāv no zaļajām, sarkanajām, brūnajām un diatomiem. Tās izceļas ar spēju iegūt enerģiju ar hlorofila un citu pigmentu palīdzību, pārvēršot oglekļa dioksīdu un ūdeni esošos organiskos savienojumus, cukuros.

Akvaponiskās sistēmas darbību var negatīvi ietekmēt aļģu attīstība. Tā kā aļģes ir fotosintezējoši organismi, tās var ātri un viegli attīstīties ūdenī, ja tām ir pieejama gaissma. Aļģu augšanu parasti ietekmē pH, DO un slāpekļa saturs ūdenī. Tas ir gandrīz pašsaprotami, ka tās veidosies akvaponiskajā sistēmā, jo tās dabiski sastopamas visos ūdens avotos. Akvaponikas sistēmās aļģes ir bieži sastopamas, lai gan parasti tās tiek kontrolētas, regulējot temperatūru, fotoperiodu un gaismas intensitāti dienas laikā. Aļģu augšana var liecināt par sistēmā neizmanto tu slāpekli, kas nozīmē, ka zivis ražo vairāk slāpekļa savienojumu, nekā augi leļpus sistēmas var uzņemt.

Aļģu morfoloģija ietver dažādas formas, tostarp vienzūnu, ko sauc par fitoplanktonu, un daudzšūnu organismus, ko sauc par makroaļģēm. Ātri augošs fitoplanktons var ātri savairoties un iekrāsot ūdeni zaļā krāsā, bet makroaļģes veido garus pavedienus, kas var pieķerties akvārija vai augšanas tvertņu dibenam. Aļģu attīstība var mainīt ūdens ķīmisko sastāvu un radīt problēmas sūkņu un filtru darbības mehānismiem. Aļģes konkurē par barības vielām ar citiem sistēmas organismiem, atkarībā no sugas tās var izmantot nitrātus un amoniju kā slāpekļa avotus. Dienā tās rada skābekli, bet naktī izmanto to enerģijai. Ekstrēmos apstākļos anoksisks ūdens, kas rodas, aļģēm naktī patērējot skābekli, var nogalināt zivis, jo tiek patērēts liels daudzums DO. Pavedienvēda aļģes var arī kļūt ļoti lielas, un bieži vien tās ir grūti sadalāmas. Tas norāda, ka aļģu uzkrāšanās var kaitēt sūkņiem un filtriem, apdraudot sistēmas funkcionalitāti.

Lielākoties, lai uzraudzītu aļģu augšanu, pietiek vizuāli pārbaudīt tādas akvaponikas sistēmas daļas kā zivju tvertnes sienas, sūkņu un filtru apkārtni, kā arī augu saknes (8. attēls). Lai izvairītos no nevajadzīgas aļģu augšanas, ir svarīgi akvaponikas sistēmas daļas nosegt ar gaismu bloķējošu materiālu vai vākiem, kas novērsīs arī ūdens iztvaikošanu visā sistēmā. Tā kā augu audzēšanai izmantotie gaismas avoti (lampas) bieži vien atrodas tuvu ūdenim, ir svarīgi sistēmu veidot tā, lai gaissma tieši nespīdētu uz ūdens. Atstājot atklātu ūdeni bez pārklājuma, piemēram, barības vielu plēves gultnēs vai savākšanas tvertnē, var strauji palielināties aļģu augšana un līdz ar to arī ātra barības vielu uzņemšana, tāpēc kultivējamiem augiem būs mazāk barības. Tā kā zivju tvertne, visticamāk, būs pakļauta gaismas iedarbībai, sistēmā neizbēgami attīstīsies aļģu augšana, tāpēc, tiklīdz aļģu augšana kļūs pamanāmāka, ir nepieciešams sistēmu iztīrīt.



Attēls 8. Aļģu augšana akvaponikas mikroaļģu augšanas kanālā, kas ir pakļauts gaismas iedarbībai (pa labi), aļģu augšana dziļūdens kultūras daļā, kas nav pārklāta ar putupolistirolu (pa kreisi).

Pētījums!

Mikroaļģu kultivācija akvaponikas sistēmā

Šajā pētījumā novērtē *Hlorella* sp. mikroaļģu funkciju peldošā plota akvaponikas sistēmā amonjaka regulēšanai. Akvaponikas sistēmu darbības laikā tika novērots aļģu biomasas pieaugums, dārzeņu raža un sistēmai būtisko barības vielu izvadīšana. Sistēmā veidojās $4,15 \pm 0,19$ g sausas aļģu biomasas/m² · dienā, darbojoties ar pilnu jaudu, kas ir nav uzskatāms par ļoti augstu ražību, jo augšanas apstākļi galvenokārt ir pielāgoti zivju un dārzeņu augšanai. Tomēr tika atklāts, ka aļģes var regulēt amonjaka daudzumu, jo tās savai augšanai dod priekšroku amonjaka slāpeklim, nevis nitrātu slāpeklim, un tās var arī neitralizēt nitrificējošo baktēriju radītās pH svārstības.

Akvaponikas sistēmas aļģu komponente piedāvā daudzas priekšrocības. Aļģes regulāras darbības laikā var veidot skābekli, līdzsvarot pH līmeni un regulēt amonjaka līmeni sistēmā. Tā kā aļģes satur vairāk slāpekļa nekā dārzeņi, tās var efektīvāk uzņemt slāpekli, vienlaikus tām ir mazāka ražība, kas ir līdzvērtīga dārzeņu produkcijai un ekonomiski neizdevīga audzētājiem. Turklāt aļģes konkurē ar dārzeņiem par platības un visa veida slāpekļa rezervju izmantošanu, ne tikai nitrātu slāpekli. Aļģēm ir īpaša funkcija akvaponiskās sistēmas ūdens attīrīšanas procesā, un, ja apstākļi to atļauj, tās var pievienot sistēmas galā, lai izvadītu vēl vairāk amonjaka. Kopumā aļģes ir efektīvāks slāpekļa uzņēmējs, kā dārzeņi.

Addy, M. M., Kabir, F., Zhang, R., Lu, Q., Deng, X., Current, D. & Ruan, R. (2017). Co-cultivation of microalgae in aquaponic systems. *Bioresource Technology*, 245, 27-34.

3.2. Citas baktērijas

Heterotrofiskās baktērijas

Akvaponikā piedalās ievērojama baktēriju kopiena, un daudzi mikroorganismi veido simbiotiskas attiecības. Heterotrofās baktērijas izmanto organisko oglekli kā galveno barības avotu un galvenokārt ir iesaistītas cieto atkritumu, kas iegūti no zivīm un augiem, sadalīšanas procesā (3. tabula). Heterotrofās baktērijas metabolizē cietos zivju atkritumus procesā, ko sauc par mineralizāciju. Šis process veicina svarīgu

mikroelementu izdalīšanos, kurus var izmantot augi akvaponikas sistēmās. Heterotrofās baktērijas kopā ar dažām dabā sastopamām sēnītēm palīdz sadalīt zivju atkritumu cietao sastāvdaļu. Tādējādi cietajos atkritumos iesprostotās barības vielas nonāk ūdenī. Mineralizācijas procesam ir būtiska nozīme, jo tas ļauj augiem piekļūt barības vielām, kas cietā veidā nav pieejamas. Lai atvieglotu barības vielu pieejamību augu saknēm, atkritumiem ir obligāti jāpakļaujas molekulārās sadalīšanās procesam vienkāršākās sastāvdaļās. Heterotrofajām baktērijām piemīt spēja iegūt barības vielas no visdažādākajām organiskajām vielām, tostarp, bet ne tikai, no cietiem zivju atkritumiem, neapēsta zivju barības, atmirušām augu daļām, nokaltušām augu lapām un pat mirušiem baktēriju organismiem. Akvaponiskās iekārtas dod baktērijām dažādus barības avotus, jo tā ir atvērta sistēma attiecībā uz izejvielām, kas nav sterilas. Bioloģisko atkritumu izmantošana kā vide heterotrofu baktēriju augšanai var izraisīt to koncentrācijas palielināšanos, kas galu galā var novest pie paaugstināta skābekļa patēriņa un samazināt biofiltra veiktspēju. Atšķirībā no nitrificējošajām baktērijām heterotrofajām baktērijām piemīt daudz augstāks vairošanās ātrums, kas, pēc aplēsēm, ir 40 reižu lielāks. Heterotrofajām baktērijām augšanai nepieciešami līdzīgi vides apstākļi kā nitrificējošajām baktērijām, jo īpaši vidē ar paaugstinātu izšķīdušā skābekļa daudzumu. Heterotrofajām baktērijām ir raksturīga kolonizācija visās sistēmas sastāvdaļās, ar ievērojamu koncentrāciju reģionos, kur parasti uzkrājas cietie atkritumi. Šie organismi iesaistās simbiotiskās attiecībās ar citām baktērijām, lai veicinātu cietao atkritumu sadalīšanos. Šīs sabiedrības klātbūtne var efektīvi mazināt cietao atkritumu uzkrāšanos.

Sulfātus reducējošās baktērijas

Nitrificējošām un mineralizējošām baktērijām (heterotrofajām baktērijām) ir labvēlīga loma akvaponikas sistēmās, tomēr daži baktēriju celmi var radīt kaitīgu ietekmi. Viens no kaitīgo baktēriju grupas piemēriem ir sulfātu reducējošās baktērijas. Šīs baktērijas parasti atrodas vidē, kurā nav skābekļa, t. s. anaerobos apstākļos, kur tās iegūst enerģiju, izmantojot redoks reakciju, kurā iesaistīts sērs. Tabulā ir norādītas baktēriju sugas, kas atbild par šo procesu. Problēma slēpjas faktā, ka šajā procesā rodas sērūdeņradis (H_2S), kas ir ļoti bīstama viela ūdens organismiem, piemēram, zivīm. Sēra reducējošās baktērijas ir plaši izplatītas un dzīvo dažādās ūdens vidēs, piemēram, ezeros, sāļajos purvos un grīvās visā pasaulē. Turklāt tām ir nozīmīga loma dabiskajā sēra ciklā. Šīs baktērijas ir atbildīgas par sērūdeņraža smaržu (sapuvušu olu smaku), kā arī par nogulšņu pigmentāciju, kam raksturīgs pelēcīgi melns tonis. Viena no akvaponikā sastopamajām problēmām ir cietao atkritumu uzkrāšanās tādā ātrumā, kas pārsniedz heterotrofisko baktēriju un ar tām saistīto sabiedrību spēju tos efektīvi pārstrādāt un mineralizēt. Šī nelīdzsvarotība var radīt anaerobos apstākļus, kas veicina sulfātu reducējošo baktēriju augšanu. Sistēmās ar lielu zivju blīvumu zivju radītais ievērojamais cietao atkritumu daudzums pārsniedz mehānisko filtru spēju tos savlaicīgi efektīvi attīrīt. Līdz ar to šāda situācija veicina baktēriju vairošanos un turpmāku to kaitīgo metabolītu veidošanos. Daudzos gadījumos ekspansīvās akvaponikas sistēmās ir degazācijas tvertne, lai sērūdeņradi droši izvadītu atpakaļ atmosfērā. Mazāka mēroga sistēmās atgāzēšanas process netiek uzskatīts par vajadzīgu. Tomēr pat ierobežota mēroga sistēmās, konstatējot kaitīgo aromātu, kas atgādina olu vai neattīrītu notekūdeņu aromātu, ir nepieciešams īstenot piemērotus pasākumus efektīvai pārvaldībai. Šīs baktērijas aug tikai anaerobā vidē, lai mazinātu to izplatīšanos, ir obligāti jānodrošina pietiekama aerācija un ar skābekli piesātināta ūdens plūsma, kā arī jāuzlabo mehāniskā filtrēšana, lai kavētu nogulšņu uzkrāšanos.

Denitrificējošās baktērijas

Denitrifikācijas procesu veicina mikroorganismu grupa, kas jebkurā akvaponikas sistēmā tiek uzskatīta par nevēlamu. Baktēriju sugas, kas atbild par šo procesu, ir norādītas 3. tabulā. Šīs baktērijas, līdzīgas sulfātu reducētājiem, tās dzīvo anaerobā vidē. Tās veicina nitrātu, kas ir svarīgākā augu barības viela, pārvēršanu

gaisa slāpekļi, padarot to augiem nepieejamu. Denitrifikācijas procesa rezultātā slāpekļa daudzums var ievērojami samazināties - no 25 % līdz 60 %. Šīs baktērijas ir plaši izplatītas dažādās vidēs, un tām ir liela ekoloģiska nozīme. Tomēr šo baktēriju klātbūtne akvaponikas sistēmās var potenciāli samazināt efektivitāti, izsmelot slāpekļa savienojumus. Nepietiekama skābekļa pievade sistēma bieži rada problēmas peldošās gultnēs, jo īpaši tajās, kurām raksturīgi iegareni kanāli. Par iespējamu problēmu var liecināt tas, ka augiem parādās slāpekļa deficīta simptomi, pat ja sistēma ir sabalansēta un ja nitrātu daudzums ūdenī ir ārkārtīgi mazs. Liela mēroga akvaponikas sistēmās ir iespējams iekļaut atsevišķu denitrifikācijas tvertni. Tomēr ieteicams par prioritāti noteikt rūpīgu nitrātu asimilēšanu, ko veic augi, tādējādi pārvēršot šīs vērtīgās barības vielas biomasā, nevis ļaujot tām izdalīties gāzes veidā.

Tabula 3. Baktēriju sugas un to funkcijas akvaponikas sistēmā³.

Mikrobioloģiskais process	Ģints
Nitrifikācija	
-Amonjaka oksidēšana	<i>Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosolobus, Nitrosovibrio</i>
-Ammonjaka oksidēšana ar arheju palīdzību	<i>Trosopumilus, Nitrososphaeras</i>
-Nitrītu oksidēšanās	<i>Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, Nitrospina</i>
-Pilnīga amonjaka oksidācija	<i>Nitrospira</i>
Denitrifikācija	<i>Dokdonella, Thermomonas</i>
Mineralizācija	<i>Pseudomonas, Flavobacterium, Sphingobacterium, Arcobacter</i>
Anaerobā amonija oksidācija (Anammox)	<i>Brocadia</i>
Sulfātu reducēšana	<i>Fusibacter, Bacteroides, Desulfovibrio, Dethiosulfovibrio</i>
Organiskā fosfora mineralizācija	<i>Modestobacter</i>
Dzelzs reducēšana	<i>Acidibacter</i>
Slāpekļa saistīšana	<i>Pontibacter, Pseudonocardia</i>

Kaitīgie mikroorganismi

Nevēlamās, kaitīgās vai patogēnās baktērijas ir tās, kas izraisa augu, zivju un cilvēku slimības. Papildu informāciju par zivju un augu patogēniem var atrast informatīvajos materiālos "Zivis akvaponikā - izvēle, prasības un ierobežojumi" un "Augi akvaponikā - izvēle, prasības un ierobežojumi". Kopumā efektīvu bezaugsnes lauksaimniecības metožu ieviešanai ir izšķiroša nozīme bakteriālo infekciju mazināšanā. Patogēnu izplatības novēršanu sistēmā var panākt, izmantojot dažādus pieejas. Pirmkārt, un galvenokārt, ir ļoti svarīgi par prioritāti noteikt labu darbinieku higiēnas praksi. Tas ietver pienācīgas personīgās tīrības uzturēšanu un atbilstošu sanitāro protokolu ievērošanu. Turklāt ir svarīgi īstenot stratēģijas, lai novērstu sistēmas piesārņošanu, ko izraisa grauzēji un to ekskrementi. Liela mēroga siltumnīcās izvietotās akvaponikas sistēmās ir svarīgi nodrošināt, lai savvaļas zīdītāji, kā arī mājdzīvnieki, piemēram, suņi un kaķi, netiktu pie sistēmas, lai līdz minimumam samazinātu patogēnu iekļūšanas risku. Obligāti jāizvairās no tāda ūdens izmantošanas, kas ir piesārņots vai nav pienācīgi sagatavots. Visbeidzot, ir ļoti svarīgi apzināties, ka jebkura sistēmā izmantotā dzīvā barība var potenciāli kalpot par patogēnu mikroorganismu pārnēsātāju, piemēram, tārpi, kas izmantoti kā zivju barība no cita avota. Arī tad, ja stādi tiek piegādāti un izmantoti akvaponikas sistēmās, jāuzmanās, lai vīrusu vai baktēriju piesārņojums netiktu pārnests no augu

³ Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). Kompleksais mikrobioms akvaponikā: baktēriju ekosistēmas nozīme. *Annals of Microbiology*, 71(1), 1-13.

audzētavām, jo to audzēšanai tiek izmantoti dažāda veida substrāti, piemēram, augsne vai komposts, kas bieži satur arī patogēnus organismus. Īpaši svarīgi ir atturēties no lietus ūdens izmantošanas, kas savākts no jumtiem, kuri ir piesārņoti ar putnu ekskrementiem, ja vien ūdenim nav veiktas atbilstošas attīrīšanas procedūras. Būtiska problēma, kas saistīta ar siltasiņu dzīvniekiem, ir iespējamā *Escherichia coli* pārnešana, savukārt putni bieži ir *Salmonella* spp. patogēno baktēriju pārnēsātāji. Ievērojot profilakses pasākumus, ir obligāti jānodrošina, lai akvaponikas ūdens nenonāktu saskarē ar augu lapotni, tas var mazināt daudzas augu saslimšanas un līdz minimumam samazina zivju ūdens piesārņojuma risku saistībā ar cilvēku produkciju, jo īpaši, ja produkcija ir paredzēta lietošanai pārtikā neapstrādātā veidā. Pirms lietošanas pārtikā dārzeni ir rūpīgi jānotīra neatkarīgi no tā, vai tie audzēti ar akvaponikas vai tradicionālām metodēm. Akvaponikas kontekstā ir plaši atzīts, ka vispārīgi pieņemtās higiēnas prakses ievērošana kalpo kā efektīvs līdzeklis infekciju rašanās un izplatīšanās novēršanai.

Bioloģiskās drošības pasākumu īstenošana var efektīvi mazināt patogēno mikroorganismu ievazāšanas risku. Viena no ieteicamajām praksēm ir karantīnas pasākumu īstenošana jauniegūtajām zivīm vai augiem pirms to ievietošanas sistēmā. Turklāt ir svarīgi ievērot stingrus higiēnas standartus attiecībā uz aprīkojumu un apstrādes protokoliem. Regulāras sistēmas uzturēšanas prakses īstenošana, piemēram, filtru tīrīšana un atbilstoša plūsmas ātruma uzturēšana, var efektīvi mazināt baktēriju problēmas, veicinot stabilas un līdzsvarotas ekosistēmas izveidi un uzturēšanu.

3.3. Pelējuma sēnes

Definition

Fungi in aquaponics are a varied collection of eukaryotic microorganisms from the fungi kingdom that play a role in the biological activities of the system. Fungi are commonly found in the growth media and biofilter components. They have a crucial function in breaking down organic matter that comes from uneaten fish feed, fish waste, and decaying plant material. Fungi, acting as decomposers, aid in the transformation of intricate organic molecules into more basic ones, so releasing nutrients like nitrogen and phosphorus. Effective control of fungal populations is crucial for sustaining a harmonious and flourishing aquaponics system, promoting optimal plant development and fish well-being. Pathogenic fungus in aquaponics can primarily endanger both the plant and fish components of the system.

Sēnēm ir būtiska nozīme sarežģītu organisko vielu sadalīšanās procesā un barības vielu papildināšanā, tās pārstrādājot. Celulolītiskās sēnes, piemēram, *Aspergillus*, *Penicillium* un *Trichoderma*, paātrina dabisko sadalīšanās procesu. Akvaponikas sistēmā ir konstatētas arī tādas sēņu sugas kā *Candida albicans*, *C. parapsilosis*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *Rhizopus*, *Fusarium* spp., *Trichoderma* un *Penicillium* spp. - šīs sugas neietekmē zivju labsajūtu. Ūdens pelējuma sēnītēm, lai gan tās galvenokārt ir saprofitiskas, piemīt spēja kolonizēt dažādas sistēmas komponentes un veidot parazītiskas asociācijas ar dzīvniekiem, kas būtiski ietekmē bioloģisko produktivitāti.

Sēnītes labi attīstās tumšā, mitrā vidē, kur tās izdala hidrolītiskus fermentus, lai iegūtu barības vielas no atmirušas biomasas, izmantojot tās kā oglekļa un enerģijas avotu savai attīstībai un lai vairotos. Efektīvai sēnīšu populāciju kontrolei ir izšķiroša nozīme harmoniskas un plaukstošas akvaponikas sistēmas uzturēšanā, veicinot optimālu augu attīstību un zivju labklājību.

Sēnītes akvaponikas sistēmā ir vairāk saistītas ar augu vai zivju slimībām. Akvaponikas sistēmas iekštelpās ir tendētas uz sēnīšu slimībām, piemēram, miltrasu, kas ātri izplatās visā augu populācijā, piemēram, gurķos un salātos. Tā kā akvaponikas sistēmas, kas tiek turētas telpās, veicina mitru vidi, ir ārkārtīgi svarīgi telpā uzturēt atbilstošu mitrumu un ventilāciju, lai izvairītos no ātras sēnīšu slimību izplatīšanās. Sēnīšu uzliesmojuma gadījumos var izmantot fungicīdus, tomēr lielākajai daļai sēnīšu, kas inficē, piemēram, augus, redzamie simptomi parādās, kad augs jau ir pilnībā inficēts, un augi ir jāiznīcina. Lai izvairītos no sēnīšu izraisītām slimībām, īpaši jāuzmanās no inficētas augsnes, augu vai citu priekšmetu ieviešanas, kas varētu ienest patogēnās sēnītes, kuras varētu izraisīt produkcijas bojāeju.

Pētījums!

Entomopatogēnu un mikroparazītisku sēņu izmantošana miltrasas novēršanai akvaponikā

Konstatēts, ka entomopatogēnās un mikoparazītiskās sēnītes ir droši bioloģiskie kontroles līdzekļi dažādiem kaitēkļiem. Šajā pētījumā tika noteikts, cik labi mikoparazītiskā sēnīte *Trichoderma virens*, entomopatogēnās sēnītes *Lecanicillium attenuatum* un *Isaria fumosorosea* kavē *Podosphaera xanthii* (miltrasa) augšanu. Turklāt, ievadot trīs sēnīšu biokontroles līdzekļus akvaponiskajā ūdenī un novērojot to attīstību un izdzīvošanu, tika novērotas iespējamās negatīvās sekas uz sistēmu. Rezultāti parādīja, ka apstrādājot inficētās lapas ar 10^7 CFU/mL trīs biokontroles sēnes būtiski samazināja miltrasu. Apstrādājot lapas ar *L. attenuatum*, tika novērots slimības samazinājumu par 85% siltumnīcas apstākļos (relatīvais mitrums 65-73%). 32% infekcijas samazinājumu panāca izmantojot *I. fumosorosea*. Turklāt tika novērots, ka *L. attenuatum* sporas ir visnoturīgākās uz lapām, sporu populācija pieauga no 7,3 CFU līdz $9,54 \times 10^3$ CFU/mL. Savukārt trīs pārbaudīto entomopatogēno sēnīšu sporas hidroponikas ūdenī pēc 96 stundām krasi samazinājās par vairāk nekā 99%. Pēc 96 stundām sākotnējā *L. attenuatum* sporu koncentrācija 10^7 CFU/mL tika samazināta līdz 4×10^3 CFU.



FIGURE 4 Efficacy of microbiological agents, *L. attenuatum* on cucumber leaves artificially infected with powdery mildew. (A) leaves treated with 0.05% tween 80 solution (control) after 20 days of the treatment, and (B) leaves treated with *L. attenuatum* after 20 days. Both treatments were applied 48 hours before the inoculation of *P. xanthii*. Other pictorial presentation showing a comparisons of TVI and IFR-treated leaves can be found in the Figure 1 of the supplementary material.

Folorunso, E. A., Bohata, A., Kavkova, M., Gebauer, R., & Mraz, J. (2022). Potential use of entomopathogenic and mycoparasitic fungi against powdery mildew in aquaponics. *Frontiers in Marine Science*, 9, 992715.

4. Ūdens avoti

Ūdens ir galvenā vide, ko izmanto akvaponikas sistēmās, jo tas ir kopīgs starp abiem galvenajiem sistēmas komponentiem (zivīm un augiem), tas ir galvenais barības vielu resursu nesējs sistēmā un nosaka vispārējo ķīmisko vidi, kurā tiek audzētas zivis un augi. Izmantotā ūdens avots ietekmē iekārtas ūdens ķīmisko

sastāvu. Akvaponikas sistēmā ūdens avots un tā ķīmiskais, fizikālais un bioloģiskais sastāvs būtiski ietekmē sistēmu, jo tas nosaka svarīgāko ūdens kvalitātes parametrus. Lai pārlicinātos, ka ūdens ir drošs lietošanai, vienmēr jāveic jaunu ūdens avotu pH, cietības, sāļuma (izšķīdušo sāļu koncentrācijas), hlora (ja tiek izmantots krāna ūdens) un jebkādu piesārņotāju (smago metālu, mikrobioloģiskā piesārņojuma) pārbaude.

Centralizētais ūdens

Pašvaldību, jeb centralizētā ūdens avoti bieži tiek apstrādāti ar dažādām ķīmikālijām, lai iznīcinātu mikrobus. Hlors un hloramīni ir galvenie ūdens attīrīšanā izmantotie savienojumi. Šo ķīmikāliju klātbūtne akvaponikas ekosistēmā apdraud zivju, augu un baktēriju labsajūtu, jo tām piemīt toksiskas īpašības. Šīs ķīmikālijas tiek īpaši izmantotas, lai iznīcinātu baktērijas ūdenī, taču to izmantošana negatīvi ietekmē akvaponikas vides vispārējo veselību. Var iegādāties hlora testēšanas komplektus, un, ja tiek konstatēts paaugstināts hlora daudzums, pirms ūdens izmantošanas tas ir jāattīra. Vienkārša pieeja ietver ūdens uzglabāšanu pirms izmantošanas, tādējādi veicinot visa hlora izkļiedēšanos atmosfērā. Šis process var ilgt vairāk nekā 48 stundas, lai gan tas var notikt ātrāk, ja ūdeni intensīvi papildina ar skābekli. Hloramīniem piemīt lielāka stabilitāte, un tiem ir mazāka tendence izdalīties. Sistēmā kopumā nav ieteicams aizstāt vairāk par 10 % kopējā ūdens tilpuma, pirms tam neveicot testēšanu. Ūdens kvalitāte ir atkarīgā no ūdens ieguves avota un sagatavošanas metodēm.

Visbiežāk Eiropas Savienībā ūdens no krāna tiek sagatavots tā, lai tas būtu drošs lietošanai pārtikā, kas nozīmē, ka tā kvalitāte būs pietiekama arī akvaponikas sistēmai. Dzeramo ūdeni Eiropā iegūst no ezeriem, upēm vai gruntsūdeņiem, un tas tiek attīrīts, lai atbilstu dzeramā ūdens direktīvām. Dzeramo ūdeni filtrē caur smilšu, grants un membrānu filtriem, lai atdalītu daļiņas, baktērijas un citus piemaisījumus, pēc tam ūdeni dezinficē, izmantojot hlorēšanu, UV starojumu vai ozonēšanu. Ja nepieciešams, tiek korigēts krāna ūdens pH līmenis, un kvalitāte tiek uzraudzīta visa procesa laikā, līdz tiek sasniegts patērētājs. Pārvaldes iestāžu noteiktie stingrie standarti liecina, ka krāna ūdens ir viens no piemērotākajiem ūdens avotiem nelielām akvaponikas sistēmām.

Pazemes ūdens avoti

No urbumiem ņemta ūdens kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no pamatiežu materiāla un infiltrācijas avotiem ūdens slānī. Ja pamatieži ir kaļķakmens, tad ūdenī, iespējams, būs diezgan augsta kopējā cietība, kas var ietekmēt ūdens pH. Augsta nekarbonātu cietība ir atrodama tādos ūdens avotos kā kaļķakmens ūdens slāņi un/vai upju gultnes, jo kaļķakmens pamatā sastāv no kalcija karbonāta (CaCO_3). Ūdens, kas iegūts no kaļķakmens pamatiežu akmeņiem/ūdens slāņiem, parasti ir ar augstu karbonāta cietības koncentrāciju - aptuveni 150-180 mg/L. Ūdens cietība akvaponikā nav būtiska problēma, jo sārmainību dabiski neitralizē slāpekļskābe, ko rada nitrificējošās baktērijas. Tomēr, ja cietības līmenis ir ļoti augsts un nitrifikācija ir minimāla nelielās zivju biomasas dēļ, tad ūdens var palikt nedaudz bāzisks (pH 7-8) un pretoties dabiskajai tendencei akvaponikas sistēmās kļūt skābam nitrifikācijas cikla un zivju respirācijas rezultātā. Šādā gadījumā var būt nepieciešams izmantot ļoti nelielu daudzumu skābes, lai samazinātu sārmainību pirms ūdens pievienošanas sistēmai, lai novērstu pH svārstības sistēmā.

No urbumiem iegūtā ūdens kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no katra konkrētā reģiona ģeomorfoloģiskā sastāva. Dažos reģionos var būt ūdens ar paaugstinātu sāļumu vai izšķīdušu minerālvielu saturu. Dažos reģionos var būt paaugstināts dzelzs vai sulfātu saturs. Šādos gadījumos jāizmanto virkne īpašu filtru, lai no ievadītā ūdens atdalītu šos jonus. Šādu sistēmu izmaksas var palielināt kopējās ekspluatācijas izmaksas, tāpēc rūpīgi jāizvērtē, vai citi ūdens avoti nebūtu lietderīgāki izmantošanai akvaponikā. Filtrēšanas

sistēmas ir jānomaina, tiklīdz ir izsmelta maksimālā attīrīšanas jauda, tādējādi izmaksas regulāri varētu vēl vairāk palielināties. Lai nodrošinātu ievadītā ūdens kvalitāti, pirms izmantošanas sertificētās/akreditētās laboratorijās jāpārbauda izmantojamais ūdens, ja rodas aizdomas (ūdenim ir dzelzs, sēra smaka).

Lietus ūdens

Lietus ūdens ir ļoti noderīgs ūdens avots akvaponikai. Lietus ūdens parasti saglabā neitrālu pH un satur minimālu karbonātu un izšķīdušo minerālvielu daudzumu, kā arī nenožīmīgu sāļumu. Šāds sastāvs ir ideāli piemērots sistēmas papildināšanai un novērš sāļuma uzkrāšanos laika gaitā. Tomēr dažos reģionos, piemēram, Austrumeiropā, Amerikas Savienoto Valstu austrumu daļā un dažās Dienvidaustrumāzijas daļās, nokrišņu pH būs nedaudz skābāks. Bieži vien ir ieteicams savākt un uzglabāt lietus ūdeni, vienlaikus paaugstinot kopējo ūdens cietību, pievienojot minerālvielas, lai uzlabotu bufer spēju. Lietus ūdens savākšanas ieviešana efektīvi samazinās iekārtas ekspluatācijas izdevumus, vienlaikus veicinot arī lielāku ilgtspējību. Lietus ūdeni parasti savāc zemē ierakstos septiņos, lai uzturētu zemu temperatūru un nodrošinātu, ka tajā nenonāk gaisma, tādējādi novēršot aļģu augšanu. Lietus ūdens parasti nesatur mikroorganismus, tomēr tvertnes vai rezervuāri, ko izmanto lietus ūdens uzglabāšanai, var veicināt mikroorganismu augšanu. Lietojot lietus ūdeni, ir jāievēro piesardzība - savākšanas sistēma jāsigatavo tā, lai nebūtu iespējama saskare ar savvaļas dzīvniekiem, kā arī citiem iespējamā piesārņojuma avotiem, piemēram, tuvumā esošo koku lapām, rūpnīcu klātbūtni, kas ar savām emisijām rada smalkas daļiņas. Vēl viens svarīgs aspekts, kas jāņem vērā, izmantojot lietus ūdeni, ir tā sezonālā pieejamība un temperatūras atšķirības, izvairoties no liela ūdens daudzuma pievienošanas sistēmai ar ievērojami atšķirīgu temperatūru (aukstāku vai siltāku).

5. Ūdens apstrāde

Ūdens dezinfekcija

Gan baktēriju, gan vīrusu organismi var radīt ievērojamas problēmas akvaponikas sistēmās. Lai gan sistēma darbojas cikliski un teorētiski spēj sevi uzturēt, ir gadījumi, kad patogēnu risks var palielināties. Visizplatītākās ūdens dezinfekcijas metodes ir apstrāde ar ozonu un UV starojumu. UV starojums, ja tas tiek izstarots ar noteiktu intensitāti, spēj noārdīt bioloģisko materiālu, piemēram, patogēnu un vienkāršu organismus, DNS. Akvaponikā UV gaisma parasti atrodas kompakta cauruļvada daļā, kas izvietota starp mehānisko filtrēšanas ierīci un biofiltru vai novietota pirms savākšanas tvertnes. Lai panāktu optimālu veikspēju, ir ļoti svarīgi UV lampu novietot aiz mehāniskās filtrēšanas sistēmas, lai novērstu šķēršļus, ko rada suspendēti materiāli. Ozons (O_3) var efektīvi samazināt infekcijas un citus nevēlamus organismus. Kad ozons nonāk saskarē ar ūdeni, tas pakļaujas procesam, ko sauc par šķelšanos, kā rezultātā veidojas skābekļa molekulas (O_2) un reaktīva skābekļa forma, ko sauc par brīvo skābekļa radikāli ($O_2^{\cdot-}$). Šis radikālis ķīmiski reaģē ar organiskajiem savienojumiem un oksidē tos. Turklāt ozona molekulas radikāļi mērķē un iznīcina arī baktērijas, planktonu un pavedienveida aļģes, uzbrūkot to bioloģisko šūnu sienām. Tomēr ozonam piemīt ievērojama reaktivitāte, un tas var potenciāli bojāt biofiltru esošās nitrificējošās baktērijas, kā arī pārmērīgas ievadīšanas gadījumā negatīvi ietekmēt zivju žaunas. Tādēļ deva ir pastāvīgi jāregulē. Pastāv kombinēti risinājumi, kuros apvienota ozona un UV apstrāde - tas palīdz efektīvāk likvidēt ozona atlikumus. Speciālas ozonēšanas ierīces rada papildu izdevumus un papildu uzraudzību par to funkcionalitāti, dozēšanu, kā arī nepieciešamību pēc atsevišķas tvertnes, kurā notiktu deozonēšana pirms ūdens ielaišanas atpakaļ sistēmā.

Lai mērķtiecīgi samazinātu mikroorganismu līmeni ūdenī, var izmantot ķīmiskos līdzekļus. Bieži izmanto ūdeņraža peroksīdu (H_2O_2), tomēr pārmērīgas devas var būtiski kaitēt zivju labsajūtai un var kaitēt

mikroorganismiem filtrā. Ūdeņraža peroksīdu galvenokārt izmanto tukšo tvertņu un citu iekārtu dezinfekcijai sistēmas neaktivitātes periodos, kad nav zivju vai izveidoto biofiltru.

Tā kā visas iepriekš minētās dezinfekcijas metodes var ietekmēt akvaponikas sistēmas vispārējo veselību, tostarp zivis, augus un biofiltru kolonizējošos mikroorganismus, ir ieteicams izvairīties no šo risinājumu izmantošanas mazāka mēroga iekārtās, jo dezinfekcijas līdzekļu kumulatīvā iedarbība var sabojāt sarežģīto simbiotisko mijiedarbību. Uzsākot akvaponikas sistēmu, vispirms ieteicams izveidot apstākļus, kurus var uzskatīt par higiēniskiem un zināmā mērā aseptiskiem. Telpa jādezinficē un jāievieš higiēnas prakse (roku, apavu higiēna, aizsargapģērbs u.c.), lai izvairītos no dezinfekcijas metodēm, kas var kaitēt jau izveidotai sistēmai.

5.1. Ūdens kvalitātes regulēšana un ar to saistītu problēmu novēršana

Ūdens kvalitāte akvaponikas sistēmā ir būtisks parametru kopums, kas tieši ietekmē visu sistēmā iesaistīto organismu - augu, zivju un mikroorganismu - veselību un labklājību. Zemāk ir apkopotas visbiežāk sastopamās ar ūdens kvalitāti saistītās problēmas, tostarp iespējamie risinājumi un veidi, kā regulēt attiecīgo parametru (4. tabula).

Tabula 4. Ūdens kvalitātes parametri un problēmu novēršana.

Parametrs	Problēma	Risinājums
Izšķīdušais skābeklis	Zems izšķīdušā skābekļa līmenis	- Samazināt zivju krājumu apjomu - Palielināt aerāciju (vairāk gaisa akmeņu, lielāki sūkņi) - Ja apkārtējās vides temperatūra ir paaugstinājusies, tad skābekļa izšķīdināšanas ūdenī dēļ ir nepieciešama intensīvāka aerācija. - Zivju populācijas maiņa (lielākas zivis patērē vairāk skābekļa)
	Pārāk zems pH (skābs)	- Pakāpeniski pievienojiet NaHCO_3 vai K_2CO_3 (izšķīdinātu ūdenī), līdz tiek sasniegts optimālais pH - Pievienojiet bikarbonātus - Pievienojiet svaigu ūdeni (atkarībā no ūdens cietības)
pH	Pārāk augsts pH (bāzisks)	Pievienojiet skābi (H_3PO_4) tvertnē
	Pārāk augsta temperatūra	- Ja ūdens rezervuāri un tvertnes atrodas tiešā saulē, pārklājiet tos ar izolācijas materiāliem - Ūdens dzesēšanas iekārtas uzstādīšana
	Pārāk zema temperatūra	- Izolējiet ūdens tvertnes un rezervuārus - Uzstādīt ūdens sildītāju ar regulējamu temperatūru

Slāpekļa savienojumi	Nitrītu vai amonjaka maksimums	- Pārtrauciet vai samaziniet zivju barošanu - Atšķaidiet sistēmā esošo ūdeni ar svaigu ieplūdes ūdeni - Palielināt aerāciju biofiltros - Biofiltra virsmas laukuma palielināšana
Ūdens cietība	Pārāk zema/pārāk augsta ūdens cietība	- Pārāk zems - izmantojiet piedevas cietības paaugstināšanai (kaļķakmens). - Pārāk augsts - ieplūdes ūdens attīrīšana un filtrēšana
Mikrouzturvielas	Augi sāk novīst	- Pamatojoties uz augu lapu bojājumiem, pēc vajadzības pievienojiet minerālmēslojumu. - Regulāra ūdens kvalitātes uzraudzība, lai izvairītos no augu barības vielu trūkuma.
Alģu augšana	Zaļo alģu augšana	Aizsedziet atklātā ūdens virsmu ar vākiem, samaziniet ūdens pakļaušanu gaismas iedarbībai.

5.2. Ūdens kvalitātes uzraudzība un kontrole

Ūdens kvalitātes uzraudzības biežums ir atkarīgs no konkrētā novērojamā rādītāja. Augu un dzīvnieku sākotnējās atražošanas laikā ir ieteicams veikt ikdienas testēšanu, lai nekavējoties veiktu nepieciešamos pielāgojumus. Piemēram, lai novērstu paaugstinātu amonjaka līmeni, var samazināt barības daudzumu, uzlabot aerāciju vai atšķaidīt ūdeni. Pēc tam, kad ir sasniegts barības vielu ciklu līdzsvars (vismaz 4 nedēļas bez ievērojamām parametru svārstībām), parasti pietiek ar regulāru iknedēļas monitoringu, lai uzturētu labvēlīgu ūdens kvalitāti. Tomēr, ja ir aizdomas par problēmu (piemēram, zivju izskata vai uzvedības izmaiņas vai augu vīšana, lapas maina krāsu), ieteicams turpināt biežāku ūdens kvalitātes uzraudzību. Obligāti jāveic ikdienas zivju un augu labturības uzraudzība, lai nekavējoties konstatētu iespējamās problēmas. Ļoti svarīgi ir uzturēt visaptverošu monitoringa rādītāju uzskaiti. Tas ietver zivju izskata un uzvedības novērošanu (normāla vai neparasta), augu stāvokļa novērtēšanu (veseli vai slimi) un ūdens ķīmisko parametru, piemēram, pH, izšķīdušā skābekļa, amonjaka, nitrītu un nitrātu, mērījumus. Ievērojot šo pieeju, var viegli atklāt potenciālās problēmas pamatcēloni, un, ja problēma atkārtojas, var nekavējoties īstenot iepriekš efektīvu risinājumu. tabulā apkopoti svarīgākie ūdens kvalitātes parametri un visbiežāk izmantotās testēšanas/uzraudzības pieejas.

Tabula 5. Ūdens kvalitātes pārbaudes un monitoringa darbības.

Parametrs	Uzraudzības darbības
Izšķīdušais skābeklis	- Zivju uzraudzība, gaisa sūkņu darbība - DO rādījumus var iegūt, izmantojot mērīšanas komplektus (lētāk, ne tik uzticami, vienreizēji mērījumi)

	• DO nolasījumi no sensoriem uz vietas vai uzstādīti tiešsaistes monitoringam (dārgāki, uzticamāki, nepārtraukti mērījumi) • Kad sistēma, barošanas normas un zivju populācija ir izveidotas, mērījumus var veikt retāk
pH	• pH testa sloksnes (lētas, ne tik precīzas) • pH sensori - portatīvie modeļi (nav ļoti dārgi) Nepārtrauktas uzraudzības pH sensori - nedaudz dārgāki, ar tiešsaistes iespēju • Mērījumus var veikt katru dienu vai ideālā gadījumā pastāvīgi, lai uzraudzītu izmaiņas
Temperatūra (ūdens)	• Analogie termometri • Digitālais termometrs ar tiešsaistes opciju • Temperatūras uzraudzība tiek veikta nepārtraukti • Temperatūras zondes bieži vien ir kopā ar citām mērierīcēm (pH, DO)
Slāpekļa savienojumi	• Komplekti nitrītu, amonjaka, nitrātu un nitrātu mērīšanai • Spektrofotometriskā analīze • Nitrātu mērīšanas sensori • Mērījumus veic reizi nedēļā vai dažas reizes nedēļā
Ūdens cietība	• Testa sloksnes un titrimetriskā analīze • Lielā mērā atkarīgs no ūdens avota, tāpēc cietība sistēmā nav jāuzrauga tik bieži
Mikrouzturvielas	• Mikroelementu koncentrāciju ir grūti uzraudzīt uz vietas • Kad augiem sāk parādīties mikroelementu trūkuma pazīmes, tas nozīmē, ka barības vielas no sistēmas ir izsmeltas • Ieteicams katru mēnesi veikt mikroelementu analīzes, ko parasti veic akreditētas laboratorijas
Alģu augšana	• Vizuāla pārbaude - zaļš gļots uz tvertņu/cisternu sienām, peldošas gultnes

Atsauces

- Baganz, G. F., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., ... & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 252-264.
- Bracino, A. A., Concepcion, R. S., Dadios, E. P., & Vicerra, R. R. P. (2020, December). Biofiltration for recirculating aquaponic systems: a review. In 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM) (pp. 1-6). IEEE.
- Colt, J., Schuur, A. M., Weaver, D., & Semmens, K. (2022). Engineering design of aquaponics systems. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 30(1), 33-80.
- Filep, R. M., Diaconescu, S., Marin, M., Bădulescu, L., & Nicolae, C. G. (2016). Case study on water quality control in an aquaponic system. *Current Trends in Natural Sciences Vol*, 5(9), 06-09.
- Folorunso, E. A., Roy, K., Gebauer, R., Bohatá, A., & Mraz, J. (2021). Integrated pest and disease management in aquaponics: A metadata-based review. *Reviews in Aquaculture*, 13(2), 971-995.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Dos-Santos, M. (2019). Aquaponics and global food challenges. Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future, 3-17.
- Gosh, K., & Chowdhury, S. (2019). Review of aquaponics system: searching for a technically feasible and economically profitable aquaponics system. *Journal of Agricultural, Environmental and Consumer Sciences*, 19, 5-13.
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S., & Pentz, T. (2019). Bacterial relationships in aquaponics: new research directions. Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future, 145-161.
- Junge, R., Antenen, N. (2020). Aquaponics textbook. AquaTeach.
- Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, 71(1), 1-13.
- Kasozi, N., Tandlich, R., Fick, M., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2019). Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Reports*, 15, 100221.
- Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., & Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: Biological and technological parameters. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 36(1), 305-316.
- Kushwaha, J., Priyadarsini, M., Rani, J., Pandey, K. P., & Dhoble, A. S. (2023). Aquaponic trends, configurations, operational parameters, and microbial dynamics: A concise review. *Environment, Development and Sustainability*, 1-34.
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: the basics. *Aquaponics food production systems*, 113.

Licamele, J. (2009). Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system (Doctoral dissertation, The University of Arizona).

Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1-11.

Nichols, M. A., & Savidov, N. A. (2011, May). Aquaponics: a nutrient and water efficient production system. In *II International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics* 947 (pp. 129-132).

Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S. O., Ogah, S. I., & Ikhwanuddin, M. (2023). Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. *Food science & nutrition*, 11(3), 1157-1165.

Sallenave, R. (2016). Important water quality parameters in aquaponics systems. *College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences*.

Shumet, A. (2021). Aquaponics: A Sustainable Solution for Health, Economy, and Society-A Comprehensive Review. *Aquaponics*, 1(2).

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and aquaculture technical paper*, (589), 1.

Stouvenakers, G., Dapprich, P., Massart, S., & Jijakli, M. H. (2019). Plant pathogens and control strategies in aquaponics. *Aquaponics food production systems*, 353-378.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., White, J. M., & Lamb, E. M. (2004, December). Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: the pH levels. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 117, pp. 79-83).

Veludo, M., Hughes, A., & Le Blan, B. (2012). Introduction to Aquaponics: A Key to Sustainable Food Production. *Survey of Aquaponics in Europe*. Water.

Villarroel, M., Mariscal-Lagarda, M. M., & Franco, G. (2021). 1. an introduction to aquaponics. *Biology and Aquaculture of Tilapia*.

Wirza, R., & Nazir, S. (2021). Urban aquaponics farming and cities-a systematic literature review. *Reviews on environmental health*, 36(1), 47-61.

Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review. *Water*, 9(1), 13.

Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges—A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586-1599.