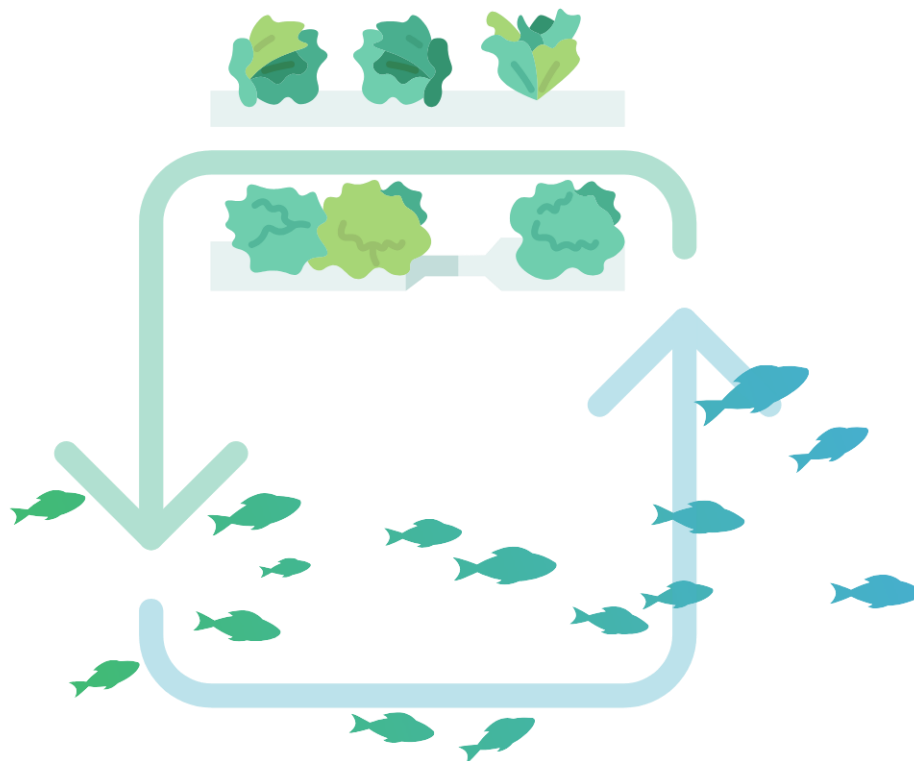


AKVAPOONIKA VEE KVALITEET



Sisukord

1.	Sissejuhatus.....	4
1.1.	TransFarm projekt	4
1.2.	Akvapoonika vee kvaliteet	5
2.	Vee kvaliteedi parameetrid	6
2.1.	Temperatuur.....	6
2.2.	Hapnik	8
2.3.	Ph	11
2.4.	Vee karedus.....	14
2.5.	Peamine toitaine – lämmastik.....	15
3.	Mikroorganismid akvapoonikas	20
3.1.	Vetikad.....	20
3.2.	Muud bakterid	22
3.3.	Seened.....	25
4.	Vee allikad	27
5.	Akvapoonika veepuhastus	28
5.1.	Veekvaliteedi reguleerimine ja tõrkeotsing	29
5.2.	Vee kvaliteedi testimine ja seire	30
	Viited	32

Abstraktne

Akvapoonika on süsteem, mis ühendab vesiviljeluse ja hüdropoonika valdkonna põhimõtted. Kalad seedivad neile jagatud kalasööta ning ainevahetuse jäägid heituvad ümbritsevasse veekeskkonda. Mikroorganismide, kes paiknevad RAS-süsteemi biofiltris, metaboolse aktiivsuse kaudu muundavad need jäägid lämmastikühenditeks, mis on taimedele kergesti kättesaadav. Kõiki osapooli mõjutab vee kvaliteet. Vesi on peamine element, mis ühendab kõiki elusorganisme akvapoonilises süsteemis. Vesi on kalade ja mikroorganismide elukeskkond ning taimede toitumiskeskkond. Kui vesiviljeluse ja hüdropoonika eraldi tehnoloogiatel on konkreetsed veekvaliteedi nõuded, mis sobivad konkreetsetele kala- või taimeliikidele, siis akvapoonikas tuleb välja töötada kompromiss, mis sobib kaladele, taimedele ja mikroorganismidele. Nende kolme organismirühma keerukas suhe eksisteerib üheskoos tihedas sümbioosis, et pakkuda üksteisele vajalikke toitaineid. Käesolevas aruandes võetakse kokku kõige olulisemad veekvaliteedi parameetrid akvapoonika süsteemis. Teavet vee kvaliteedi parameetrite kohta, nagu pH, lahustunud hapnik, vee karedus, temperatuur ja lämmastikuringe, on kirjeldatud eraldi iga faktori kohases alalõigus. Samuti on kirjeldatud veekvaliteedi seiret ja kõrvalekaldeid, tuginedes kõige levinumatele probleemidele, mida sellistes süsteemides on tähendatud. See aruanne sisaldab üldist teavet nii ettevõtjatele kui isikisikutele, kes on huvitatud akvapoonika süsteemist ja või juba on selle tegevusega algust teinud.

Märksõnad: *TransFarm, akvapoonika, vesi, kvaliteet, vee parameetrid*

Käesolevas aruandes sisalduv teave on kogum erinevatest artiklitest ja raamatutest, mille viited leiata aruande alajaotisest "Viited".

Käesolev käsiraamat on koostatud Interregi Kesk-Läänemere piirkonna projekt CB0100007 "TRANSborder cooperation for circular soil-less FARMing systems – TransFarm" toel.

1. Sissejuhatus

1.1. TransFarm projekt

Toidusektor peab silmitsi seisma erinevate keskkonna- ja sotsiaalprobleemidega: põllumajandus on sektor, mida kliimamuutused mõjutavad eriti, maailmamere kalavaru on ülepüügi tõttu hääbumas, seejuures maailma rahvastik kasvab hinnangute kohaselt jätkuvalt, kujunedes¹ 2050. aastaks umbes 9,7 miljardini. Läänemere piirkonna riigid sõltuvad tugevalt toiduainete, eriti köögiviljade, puuviljade ja kalade impordist; viimastel aastatel on pandeemiad ja sõda Ukrainas toonud esile vajaduse isemajandavate toidusüsteemide järele. Lisaks on põllumajandus ja vesiviljelus ühed peamised Läänemere eutrofeerumise põhjustajad.

Nende väljakutsete lahendamiseks soovib projekt TransFarm tuua toiduainete tootmise tarbijatele lähemale, edendades mullavabasid põllumajandusmeetodeid, mida saab rakendada isegi siseruumides ja mis võimaldavad toota aastaringselt. Nende meetodite näited on hüdropoonika, kus taimi kasvatatakse vees, ja akvapoonika, mis ühendab hüdropoonika vesiviljelusega.

Akvapoonika on suletud ahelaga korvuvu veekasutusega süsteem, kus kalakasvatuse vett kasutatakse taimede kasvatamiseks. Vees olevad kala metabolismi jääkproduktid muundatakse biofiltri abil mikrobioloogiliselt, taimed imenduvad ja tagastatakse seejärel kaladele. Süsteem on täiesti ringikujuline, võimaldades toitainete taaskasutamist ilma toitainete keskkonda paiskamiseta. Kuna akvapoonika süsteemis olevad kalad, taimed ja mikroorganismid toimivad tihedas sümbiootilises suhtes, ei kasutata antibiootikume ega pestitsiide, mis omakorda tagab puhtamad ja tervislikumad tooted.

TransFarm demonstreerib akvapoonikat Rootsis, Eestis ja Lätis ning katsetab alternatiivseid veeallikaid, nagu vihmavesi ja taaskasutatav hallvesi: nende riikide partnerid ehitavad erinevate omaduste ja eesmärkidega näidisrajatisi. Erinevate demode kogemuste vahetamine aitab kaasa teadmiste koosloomisele ning rajatised on võimalus inspireerida ja harida tulevasi akvapoonikatootjaid. Demode konstrueerimisel ja jälgimisel kogutud teadmiste tulemuseks on õppematerjal, mis on kättesaadav kõigile akvapoonikaga tegelejatele.

Projekti raames uuritakse ka ärimudeleid, viiakse läbi tegevusi, et teavitada tarbijaid akvapoonikatoodete kvaliteedist, haritakse ettevõtjaid, kes soovivad käivitada akvapoonikasüsteemi, ning teavitatakse riigiteenistujaid ja poliitikakujundajaid mullavabade ringmajandusmeetodite väiksemast keskkonnamõjust.

TransFarmi projekti kestus on kolm aastat (2023-2026) ja seda koordineerib **Turu Ülikooli Turu Majanduskool** (Turu, Soome). Projekti partneriteks on Eesti **Maaülikool (Tartu, Eesti)**, Läti Ülikool (**Riia, Läti**), **Campus Roslagen** ja **Coompanion Roslagen & Norrort** (Norrälje, Rootsi).

TransFarmi projekti rahastab ELi Interreg Kesk-Läänemere programm, projekti kogueelarve on 1,87 miljonit eurot, ELi rahastamine hõlmab 1,5 miljonit eurot.

¹ ÜRO DESA väljaanded - maailma rahvastiku väljavaated 2022

1.2. Akvapoonika vee kvaliteet

Akvapoonika on jätkusuutlik ja loominguine lähenemine toidutootmisele, mis ühendab vesiviljeluse ja hüdropoonika, et luua vastastikku kasulik ökosüsteem. Vee oluline komponent on selle keerulise süsteemi keskmes. Vee kvaliteet mängib olulist rolli akvapoonika dünaamilises maailmas, kus kalad ja taimed suhtlevad suletud ahela süsteemis. Selle tähtsust võib näha keerulises tasakaalus, mis on vajalik, et säilitada ideaalsed tingimused toitainete ringluseks, taimede kasvuks ja kalade terviseks. Seetõttu on veekvaliteedi mõõdikute põhjalik mõistmine ülioluline nii akvapoonika entusiastidele, teadlastele kui ka praktikutele.

Oluline on **pH**, mis tähistab vee happesuse või aluselise osakaalu. Täpse tasakaalu tagamine pH 6,5 ja 7,5 vahel on oluline, et säilitada toitainete kättesaadavus ja edendada mikroobide aktiivsust, mis on kalade ja taimede tervise ja elujõulisuse jaoks üliolulised. **Temperatuur** on oluline tegur, mis mõjutab ainevahetust, toitumist ja imendumist ja keskkonna üldist heaolu. Järjepidev järelevalve on ülioluline, et vältida võimalikke äärmusi, mis võivad põhjustada stressi või kahjustada vee- ja taimeelemente. **Ammoniaagi** ja **nitriti** tase on lämmastikuringe olulised markerid. Oluline on jälgida ja säilitada optimaalseid tasemeid, et vältida kalade kahjustamist ja säilitada hästi seadistatud, toimiv süsteem. **Nitraadid**, mis on lämmastiku ringi viimane tulemus, toimivad taimede toitainete põhiallikana. Optimaalse tasakaalu säilitamine on ülioluline, et tagada toimiv akvapoonika ökosüsteem, seadmata ohtu kummagi elemendi heaolu. Lahustunud hapniku piisav tase on vajalik nii veeorganismide, nii kalade kui ka taimede üldise tervise ja elujõulisuse tagamiseks. Ebapiisav hapniku sisaldus võib põhjustada kalade stressi, kasvu aeglustumist ja isegi surma, rõhutades sobivate õhutamise- ja hapnikuga rikastamise meetodite kasutamise tähtsust. Juhtivust ja lahustunud tahkete ainete kogust kasutatakse vees sisalduvate lahustunud ionide ja mineraalide koguse määramiseks. Järjepidev järelevalve aitab säilitada optimaalset toitainete tasakaalu, hoides seeläbi ära tasakaalustamatuse või kahjuliku taseme akvapoonikasüsteemis.

Akvapoonikasüsteemides esinevatel bakteritel on lämmastiku tsükli elutähtis funktsioon, kuna need muudavad kalajäätmed kriitilisteks toitaineteks (nitritid ja nitraadid), mis on vajalikud taimede kasvuks. Need soodsad bakterid toimivad bioloogiliste filtritena, parandades vee kvaliteeti, lagundades mürgiseid ühendeid ja vältides haigusi. Lisaks on bakteritel roll pH taseme säilitamisel, süsteemi stabiliseerimisel keskkonnamuutuste vastu ja ammoniaagi eemaldamisel, edendades seeläbi nii kalade kui ka taimede üldist heaolu ja kohanemisvõimet. Tugev biokile, bakteripopulatsiooni olemasolu on oluline toitainete ringluse, haiguste vältimise ja akvapoonika stabiilsuse säilitamiseks. See rõhutab nende olulist funktsiooni tasakaalustatud ja tõhusa keskkonna toetamisel.

Akvapoonika saavutamine sõltub vee kvaliteedi parameetrite hoolikast kontrollist. Tagades süsteemi tervise ja tootlikkuse, aitame kaasa ka jätkusuutlikkuse ja vastutustundliku toidutootmise laiemate eesmärkide saavutamisele. Akvapoonika kui toidutootmise tehnika vastupidavate ja tõhusate võimete täielikuks ärasutamiseks on ülioluline omada põhjalikku arusaamist veekvaliteedi teguritest.

2. Vee kvaliteedi parameetrid

2.1. Temperatuur

Akvapoonikasüsteemi komponente ja omadusi mõjutab vee temperatuur. Tavaline kompromiss-vahemik on vahemikus 18–30 °C. Nii ammoniaagi (NH₃) toksilisust (ionisatsioon) kui ka lahustunud hapniku (DO) taset mõjutab temperatuur; temperatuuri tõus toob kaasa ammoniumi NH₄, kui (toksilise) ammoniaagi NH₃ suurenemise ja DO taseme languse.

Rohkem kui õhutemperatuur, mõjutab vee temperatuur akvapoonika taimi. Enamiku köögiviljade puhul on sobiv temperatuurivahemik 18–30 °C. Mõned köögiviljad sobivad siiski palju paremini teatud keskkondades kasvatamiseks. Kurgid, salat ja lehtpeet on vaid mõned jaheda hooaja köögiviljad, mis õitsevad temperatuuril 8–20 °C. Teisest küljest vajavad sooja ilmaga maitsetaimed ja köögiviljad, nagu basiilik, kapsad ja okra, temperatuuri vahemikus 17–30 °C. Soojem kui 26 °C põhjustab lehtköögiviljade poltimist, tekitades seemneid ja õisi, mis muudavad rohelised kibedaks ja turustamatuks. Taimed kogevad veetemperatuuri tõusu tõttu kuumastressi. Kuuma veega kokkupuutel sulgeb taim lõpuks oma juured ja läheb ellujäämisrežiimi. Närbumine, madal lahustunud hapniku tase, taimede õitsemise ja vilja kandmata jätmise, pehmed, pruunid, limased juured, salatitaimede poltimine (pikenemine ja seemneks minek) ning piirangud taimede võimele kaltsiumi absorbeerida on mõned kuumastressi tunnused. Niiskuse ja õhutemperatuur mõjutavad ka seda, kui tugev on taimede kuumastress.

Kuna nad on külma verega, on kalad vähem võimelised kohanema mitmesuguste veetemperatuuridega. Kala võib jagada ka kolme kategooriasse: jahedaveelised, soojaveelised ja troopilise vee kala. Troopilised kalad, nagu tilapia, harilik karpkala, saavad sageli hästi hakkama vees, mis on vahemikus 22–32 °C. Siiski eelistavad külma veelisi liigid, nagu forell, temperatuuri vahemikus 10–18 °C. Näiteks harilikul karpkalal on suurem temperatuuritaluvus 5–30 °C kui teistel parasvöötme veeliikidel. Iga liigi jaoks on vaja optimaalset temperatuuri, et tagada kiirem kasvukiirus, tagada tõhus sööda muundamine ja minimeerida haiguste riski. Kõrgem veetemperatuur võib suurendada hingamissagedust ja ainevahetust. Kõrgem temperatuur vees tähendab, et vähem lahustunud hapnikku (DO) on saadaval, kuid kõrgendatud temperatuuril suureneb kalade nõudlus DO järele. Akvapoonika oluline komponent on vee temperatuuri sobitamine kaladega ja selle hoidmine 2 kraadi Celsiuse järgi (st kõrge temperatuuri reguleerimine). Seda seetõttu, et kaladel, kellel on optimaalne ainevahetus ja sööda muundamine, kui vee temperatuur on täpne ja jääb ideaalse keskmise lähedale, on paremad kalade kasvukiirused ja stabiilne, prognoositav toitainete koormuse ladestumine, mis toetab taimekultuuri.

Tabel 1. Organismid ja nende optimaalsed temperatuurivahemikud akvapoonikasüsteemides.

Organismi tüüp	Optimaalne T vahemik, °C	Näide
Sooja vee kala	22-32	tilapia, karpkala, ahven, angerjad, vähjad, tuurad
Külma vee kala	10-18	lõhilased
Sooja ilmaga taimed	23-28	Kapsad, basiilik
Jaheda ilmaga taimed	17-25	Aedsalat
<i>Nitrobakter spp.</i>	25-29	
<i>Nitrosomonas spp.</i>	21-29	
Kattuv temperatuur, °C	18-30	Enamus taimi ja kalu

Bakterite ja akvapoonika puhul üldiselt on vee temperatuur oluline. 17–34°C on ideaalne temperatuurivahemik bakterite kasvuks ja tootlikkuseks. Esitatud temperatuurivahemik näitab optimaalseid tingimusi nitrifitseerivate bakterite toimeks, kuid kui temperatuur langeb madalamale, väheneb nitrifikatsiooni efektiivsus, kuid seda ei peatata – bakterid muutuvad 4°C juures mitteaktiivseks. On teada, et temperatuurid alla 0°C ja üle 49°C hävitavad nitrifitseerivaid baktereid. Talvist süsteemihaldust mõjutavad oluliselt madalad temperatuurid, kui süsteemid alluvad väliste ilmastikutingimustele.

Arvestades iga organismirühma – kalade, taimede, bakterite – optimaalset kasvu- ja ellujäämistemperatuuri, tuleks valida liigid, millel on sobivad tingimused. Kui kasutatakse süsteemi, mis on soosiv väliste ilmastikutingimuste muutustele, tuleb taime- ja kalaliike hoolikalt kaaluda, seetõttu on soovitatav kasutada akvapoonikasüsteeme siseruumides, kus kliimat saab aastaringselt seadistada püsivatele väärtustele.

Juhtumiuuring!

Vee mõju kasvujõudlusele, toitainetele ja mikrobioloogilisele dünaamikale akvapoonika süsteemides

Uuringus vaadeldi jõforelli ja magusat basiilikut kasvatava akvapoonika süsteemi madala veetemperatuuri (11°C kraadi võrreldes 21°C kraadiga) mõju toitainete hulga, taimede ja kalade kasvule ning mikrobioloogia dünaamikale. Leiud näitasid, et vee temperatuur mõjutab oluliselt akvapoonika süsteemides kalade ja taimede kasvu. Uuringust selgus, et vaadeldavas akvapoonika süsteemis 21°C kraadise vee jääsoojus oli kasvatatavate kultuuride jaoks sobivam, kuna kalad ja taimed kasvasid selle temperatuuri juures kiiremini. Süsteemi mikrobioloogilisi omadusi, biofiltri efektiivsust ja toitainete omastamist mõjutas negatiivselt vesi, mille temperatuur oli 11°C. Selgus, et basiilik on aiakultuur mida saab edukalt kasvatada akvapoonilises süsteemis. Leiud näitasid ka, et madala temperatuuriga kasvukeskkonna puhul tuleb kalasööda valimisel ja toitainete taseme optimeerimisel lähtuda taimede vajadustest. Antud juhul oli taimede ja kalade suhe 15:8, kuid toitainetega seotud vahetõrgete määramiseks oli vaja täiendavaid uuringuid. Teine oluline tegur on taimede ja kala suuruste suhe.

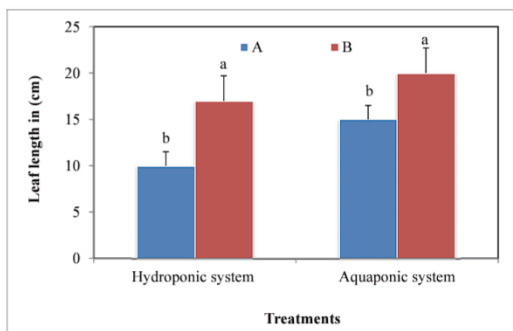


Diagramm 1. Veetemperatuuri A = 11° ja B = 21°C mõju hüdroponika (kontroll) süsteemis ja akvapoonika süsteemis magusa basiiliku lehtede pikkusele (sentimeetrites). Käsitlese keskmised eraldati Tukey HSD abil, kusjuures P < 0,05 peeti oluliseks. Iga tulp tähistab keskmist ± standardviga. n = 13.

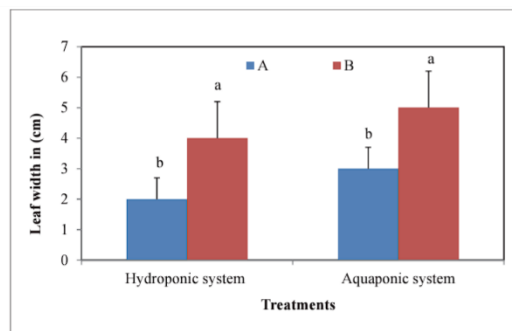


Diagramm 2. Veetemperatuuri A = 11°C või B = 21°C mõju hüdroponika (kontroll)süsteemis ja akvapoonika süsteemis magusa basiiliku lehtede laiuksle (sentimeetrites). Käsitlese keskmised eraldati Tukey HSD abil, kusjuures P < 0,05 peeti oluliseks. Iga tulp tähistab keskmist ± standardviga. N = 13

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

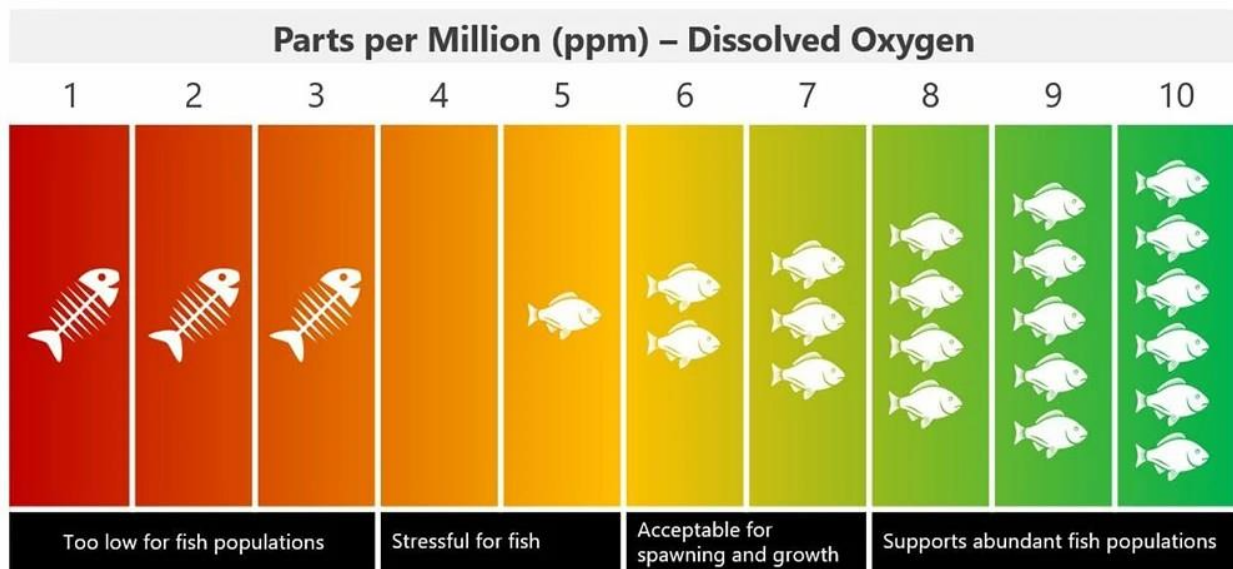
2.2. Hapnik

Definitsioon

Lahustunud hapnik vees viitab kogusele hapnikule, mis on käsitletaval ajahetkel vee koguses sisalduv, tavaliselt kooskõlas vee temperatuuriga. See on veeorganismide ellujäämise seisukohalt ülioluline tegur, kuna enamik veeorganisme nagu kalad, bakterid ja selgrootud vajavad hingamiseks ja ainevahetus-protsesside läbiviimiseks hapniku.

Vees lahustunud hapniku sisaldust mõõdetakse tavaliselt milligrammides liitri kohta (mg/L või osades miljoni kohta (ppm)), protsendina küllastustaset. Küllastusaste on maksimaalne hapniku kogus, mida vesi teatud temperatuuril ja rõhul suudab hoida. See varieerub sõltuvalt temperatuurist ja soolsusest, kuna külmem vesi mahutab rohkem lahustunud hapnikku kui soojem vesi.

Kalade kasvu üks olulisemaid tegureid on lahustunud hapnik (DO), mis on oluline ka heade nitrifitseerivate bakterite jaoks, mis muudavad kalajäätmed toidaineteks, mida taimed saavad absorbeerida. Suurepärase tervise ja kasvu säilitamiseks vajavad soojaveekalad umbes 5 osa miljoni kohta (ppm) või osa miljoni kohta, mida saab kasutada vaheldumisi milligrammidega liitri kohta (mg/l). Külma vee kala seevastu vajab umbes 6,5 ppm DO-d. Kuigi tilapia, mõned karpkala liigid võivad taluda DO sisalduse langust, mõjutab hapniku hulk vees kasvukiirust. Kala hapniku tarbimist määrab kala suurus, liik, aktiivsuse tase (toitmine ja paljunemine) ja vee temperatuur. Näiteks suuremad kalad võtavad tavaliselt rohkem hapnikku kui väiksemad kalad. Väiksemad kalad kasutavad aga rohkem hapniku kaaluühiku kohta.

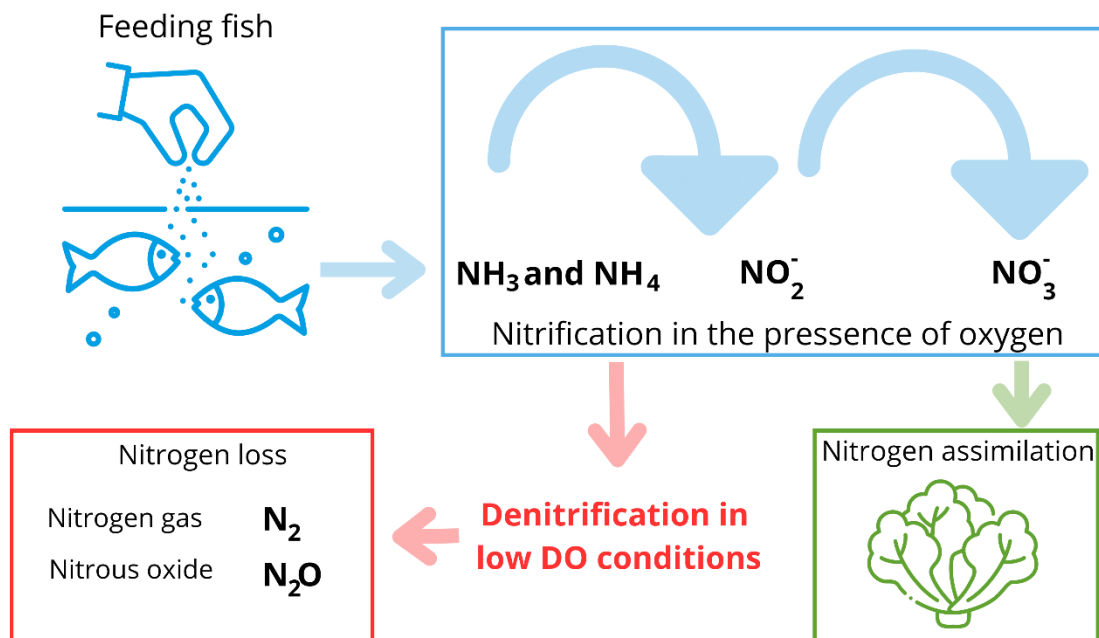


Joonis 1. Lahustunud hapniku (DO) sisaldus, mis on vajalik kalade tervisliku asurkonna säilitamiseks akvapoonika süsteemides. Ppm-des esitatud väärtused (lahustunud hapniku mg/L vees)².

² <https://atlas-scientific.com/blog/dissolved-oxygen-in-water-ppm-for-fish/>

Akvapoonika-süsteemides on soovitatav hoida lahustunud hapniku ehk DO taset vähemalt 5-6 ppm või üle selle. Uues süsteemis tuleks hapnikusaldust sageli jälgida, kuid pärast mõningast montoorimist ning logi pidamise kehtestamist hapniku tarve stabiliseerub (näiteks kindlaks määratud sobivad kalade asustus- ja söötmissagedused, piisav õhustamine) ei ole DO mõõtmised nii sageli vajalikud. Hobiakvapoonika kasutajate madalatel kalade asustustihedused ei ole tavaliselt madala hapnikusalduse murekohad. Kõrge loomkoormusega äriettevõtetel on see probleem tõenäolisem. Suurendage oma süsteemi õhustamist, lisades rohkem õhukive või kasutades võimsamat pumpa või tõhusamaid hapnikulahustamise seadmeid kui DO tase on liiga madal. Pole võimalust lisada liiga palju hapnikku, sest see kõik lihtsalt aurustub atmosfääri, kui vesi on küllastunud. Hapniku lahustuvus vees väheneb temperatuuri tõusuga, mis näitab vajadust püsiva veetemperatuuri järele süsteemis.

Difusiooni, õhustamise, fotosünteesi, hingamise ja lagunemise protsessid mõjutavad kõik lahustunud hapniku koguseid. Seega põhjustavad soolsuse, temperatuuri ja rõhu kõikumised tavaliselt vee lahustunud hapnikusalduse kõikumisi.



Joonis 2. Mikroobne aktiivsus hapnikurikastes ja anoksilistes tingimustes.

Lahustunud hapnik on ka oluline tegur, mis mõjutab nitrifikatsiooniprotsessi akvapoonilises süsteemis. Biofilter, kus nitrifikatsioon on kõige aktiivsem, toimub intensiivne õhustamine, mis viib vette hapnikku ja seejärel tarbivad nitrifitseerivad bakterid ammoniaagi oksüdeerimiseks lahustunud hapnikku. Ilma pideva hapnikuvarustusega nitrifikatsioonireaktsioon sisuliselt peatub. Nitrifikatsiooni optimaalsed DO tasemed on 4-8 mg/l (4-8 ppm). Madalama hapnikusaldusega (alla 2ppm) väheneb nitrifikatsioon oluliselt. Madal DO kontsentratsioon võib anda soodsad tingimused teist tüüpi bakteritele – denitrifikatsioonibakteritele. See bakter võib muuta väärtusliku taimse toitaine lämmastiku tagasi potentsiaalselt kahjulikuks ammoniaagiks ja edasi lämmastikgaasiks või diämmastikoksiidiks. Denitrifikatsioon põhjustab sisuliselt lämmastiku kadu süsteemis, seega võib see potentsiaalselt peatada taimede kasvu.

Taimejuured, mis on otseses kokkupuutes veega, vajavad ka veidi lahustunud hapniku sisaldust. Taimed on üldiselt hapnikuvaeste tingimuste suhtes vastupidavamad kui kalad või akvapoonilise süsteemi

toimimisega seotud bakterid, seetõttu on olulisem täita mikroobikoosluse ja mis kõige tähtsam - kalade nõudeid. Akvapoonilistes süsteemides on taimede lahustunud hapniku vajadus sageli sarnane sellega, mida nad vajavad traditsioonilistes hüdropoonilistes süsteemides. Nii kalad kui ka akvapoonika taimed toetuvad õitsenguks vees lahustunud hapnikule. Ideaalne lahustunud hapniku tase taimede akvapoonikas on tavaliselt vahemikus 5 kuni 8 milligrammi liitri kohta (mg/l), kuid võib taluda ka madalamaid tasemeid.

Teine akvapoonika süsteemis lahustatud gaas on süsinikdioksiid (CO_2). Kalade hingamine põhjustab süsinikdioksiidi (CO_2) vabanemist vette. Lahustunud CO_2 kõrge tase vees takistab CO_2 difusiooni kalade vereringest. Süsinikdioksiidi kõrge tase kalade vereringes põhjustab vere pH vähenemist, mis seejärel vähendab hemoglobiini võimet seonduda hapnikuga. Vees vähendab süsinikdioksiid pH-d, muundudes kokkupuutel veega spontaanselt süsinikhappeks (H_2CO_3). Üksuses ladustatud kalade tiheduse suurendamine toob kaasa süsinikdioksiidi suurema vallandumise, mille tulemuseks on üldise pH langus. See nähtus võimendub, kui kaladel on kõrgem aktiivsus, näiteks kõrgendatud temperatuuride ajal. Sarnaselt hapnikule väheneb ka CO_2 lahustuvus vee temperatuuri tõustes. Iga atmosfääriga kokkupuutuv gaasiülekanne- või õhutusseade toob paratamatult kaasa CO_2 eemaldamise. Suure läbilaskevõimega süsteemides ja suuremahulistes akvapoonikasüsteemides võib valikulise moodulina lisada nõrgfiltrit – see aitab vabastada lahustunud CO_2 , kuid tavaliselt saavutatakse piisav degaseerimine biofiltrit või vee nirisemisega süsteemi erinevate osade vahel. See näitab taas, et kalamahuti, biofiltrit ja üldiselt kogu süsteemi nõuetekohane õhutamine on vajalik mitte ainult piisava lahustunud hapnikuga rikastamiseks, vaid ka CO_2 eraldumise tagamiseks.

2.3. Ph

Definitsioon

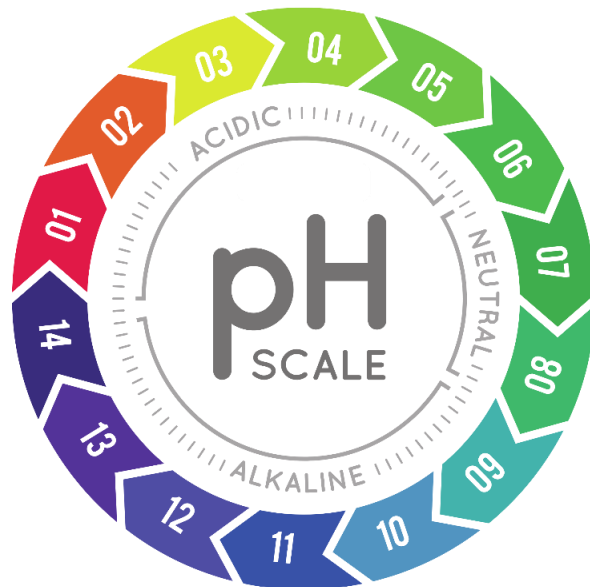
pH on vesilahuse happesuse või aluselise mõõt. Mõiste "pH" võttis esmakordselt kasutusele Taani biokeemik Søren Peter Lauritz Sørensen aastal 1909. pH skaala on logaritmiline skaala, mis jääb vahemikku 0 kuni 14, keskmist väärtust "7" loetakse neutraalseks. Lahust, mille pH on alla 7, peetakse happeliseks, samas kui lahust, mille pH on üle 7, peetakse leeliseliseks või aluseliseks. Lahuse pH väärtus sõltub lahuses olevate vesinikioonide (H⁺) kontsentratsioonist. Madal pH tähendab kõrget H⁺ ionide kontsentratsiooni, kõrge pH väärtus tähistab madalat H⁺ ionide kontsentratsiooni.

Lahuse pH-d saab mõõta pH-meetri või pH-lakmuspaberi abil. PH mängib olulist rolli paljudes bioloogilistes ja keemilistes protsessides ning õige pH-väärtuse säilitamine akvapoonikasüsteemides on taimede ja kalade korralikuks kasvuks kriitilise tähtsusega.

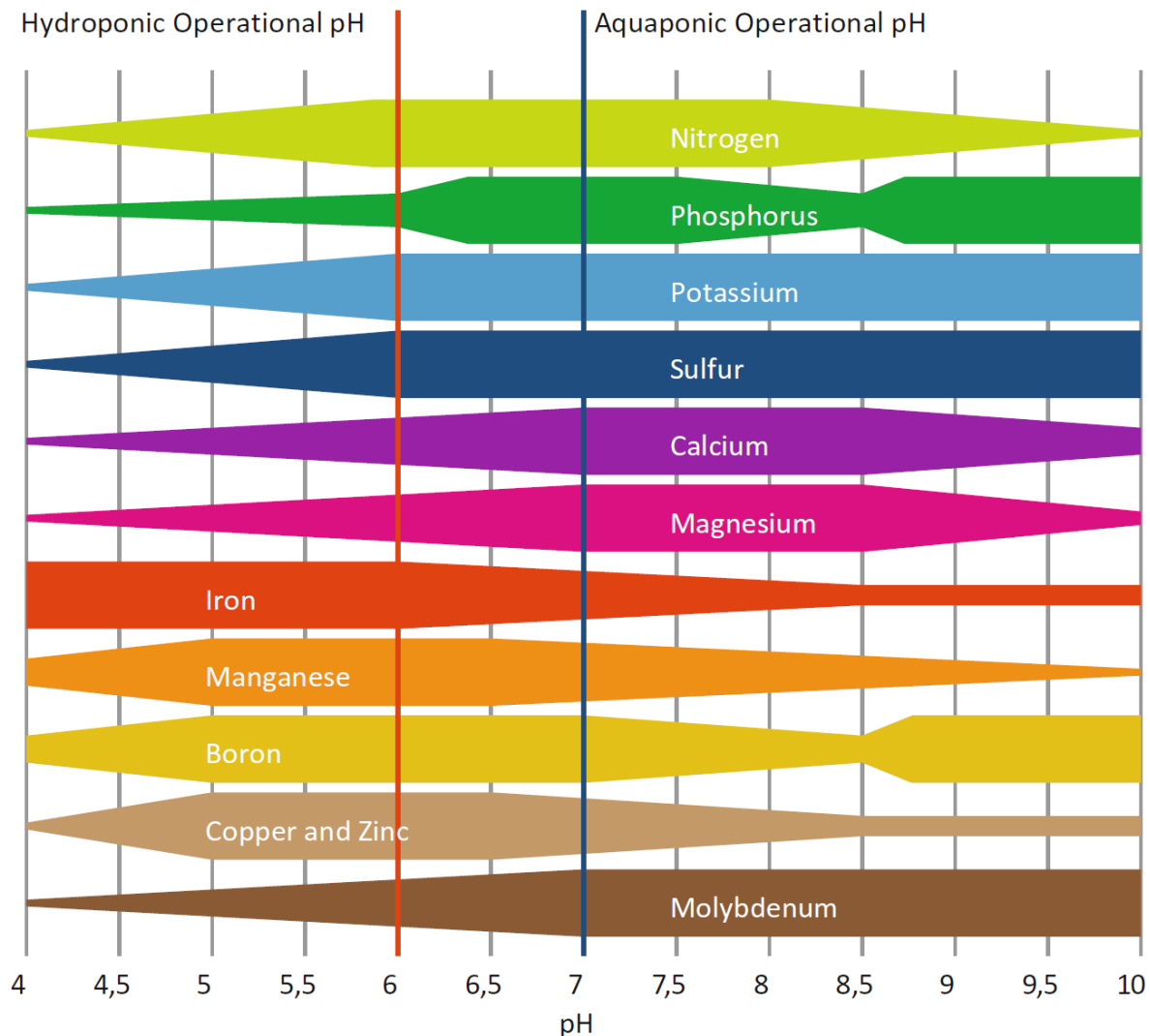
Vee pH hüdropoonikas on oluline võimaldamaks efektiivselt taimedel jaoks vastu võtta ioonseid toitaineid. Süsteemi vee pH põhjal näitavad uuringud, et teatud toitained on saadaval konkreetsetes pH vahemiku ulatuses. Järelikult tuleb pH reguleerida väärtuseni, mis maksimeerib ioonse toitainete sega kättesaadavust. See on siiski kompromiss, kuna erinevad ioonid toitaime vormid on erineva pH-ga kättesaadavad. Toitainete kättesaadavuse maksimeerimiseks reguleerib hüdropooniline tööstus tavaliselt pH vahemikku 4,5–6,0 (happekeskkond), eriti steriliseeritud hüdropoonilistes ja substraadikultuuri süsteemides.

Teisest küljest seatakse retsirkuleerivates vesiviljelussüsteemides pH tasemele, mis on kalade kasvu ja heaolu seisukohast soodsam. Kalade kasvu puhul on pH ligikaudne määramispunkt 7,5, mis on juhuslikult ka optimaalne pH tase mikroobide kasvuks, täpsemalt nitritifitseerivad bakterid, mis muudavad kalajäätmed lämmastikuvormiks, mis on vähem mürgine ja taimedele kergemini kättesaadav.

Kuna akvapoonikas kasutatavatel komponentidel on erinevad pH-vajadused, on pH-ga seotud raskusi. Kui mageveekalaliikide retsirkuleerivate vesiviljelussüsteemide (RAS) pH väärtused jäävad tavaliselt vahemikku 7,0–8,0, siis hüdropooniliselt kasvatatud taimed vajavad tavaliselt pH-d vahemikus 4,5–6,0. Mikroorganismid, mis muudavad potentsiaalselt ohtlikud ühendid kalajäätmetest vähem ohtlikeks vormideks, tuleb samuti paigutada nendesse keskkondadesse. Selle tulemusena on iga pH seadepunkt kompromiss mikroobide, kalade ja taimede nõuete vahel. See toetab väidet, et akvapoonika süsteemis on võimatu saavutada kõigi elusolendite ideaalset pH-d, mis võib viia vähem kui ideaalse taimede kasvuni. Seepärast tuleks süsteemi pH kohandamisel nii, et see ei mõjutaks taimede ega kalade kasvu nii, et see koormaks nende optimaalset kasvu, arvesse toitainete kättesaadavust.



Joonis 3. pH skaala, mis näitab happe-aluse vahemikus 1-14 pH.



Joonis 4. Toitainete kättesaadavus vastavalt veekeskonna pH-le³.

Hüdroponika ja vesiviljeluse pH optimaalne koosus on tõenäoliselt üks peamisi väljakutseid akvapoonikas. PH kokkusobitamine mõlemas süsteemis viitab sellele, et võib-olla võiksid lahtiühendatud akvapoonikasüsteemid selle probleemi lahendada. Sellises süsteemis ei taaskasutata/tsirkuleerita vett tagasi kalamahutisse, vaid seda kasutatakse taimede toitainerikka veena. Kuigi selline lahendus võimaldaks vältida mitteoptimaalset pH taset, ei arvesta see vajadusega konkreetse mikrobioomi järele süsteemis. Vee retsirkulatsioon on väga vajalik, et luua toimiv biofiltri mikrobiom, mis muundab kalajäätmed tõhusalt taimseteks toitaineteks. Veelgi enam, sellistes süsteemides võivad taimed moodustada bakteritega üliolulise sümbioosi, mis omakorda võib aidata toitaineid ringluses olevast veest omastada. Taimede toitaineid akvapoonilises süsteemis toodavad peamiselt kalad, mitte ei tarnita neid väetisena (nagu hüdroponikasüsteemides), mistõttu nitrifitseerivate bakterite erinevad liigid (*Nitrosomonas* spp. ja *Nitrobacter* spp.) on akvapoonika toimimise oluline element. Taimede ja mikroobide vaheline keeruline

³ Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). Akvapoonika toidutootmissüsteemid: kombineeritud vesiviljeluse ja hüdroponilise tootmise tehnoloogiad tulevikuks (lk 619). Springeri loodus.

sümbioos on eduka toimimise võti ja see seos võib isegi pakkuda paremaid taimede kasvukiirusi kui tavaline hüdropoonika.

Juhtumiuuring!

pH mõju kurgi kasvule ja toitainete kättesaadavusele eraldatavas akvapoonilises süsteemis minimaalse tahke aine eemaldamisega

Termin "pH" viitab lahuse happesuse või aluseliseuse mõõtmisele. See on skaala, mida kasutatakse vesilahuse happesuse või aluseliseuse määramiseks. Happeliste lahuste pH on madalam, aluseliste või aluseliste lahuste pH on kõrgem. Toatemperatuuril (25°C) ei ole puhas vesi happeline ega aluseline ning selle pH on 7. pH skaala on vahemikus 0 kuni 14. Käesolevas uuringus vaadeldi pH mõju kurgi saagikusele ja toiteväärtusele tsirkuleerivas hüdropoonika vees ja akvapooniliselt kasvatatud kasvuhoonekurgi kastmisvees.

Artiklis uuritakse pH mõju toitainete kättesaadavusele ja omastamisele eraldatavas akvapoonilises süsteemis. Uuring viidi läbi, kasutades tilapia kasvupaakide vesiviljeluse heitvett nelja pH-ga: 5,0, 5,8, 6,5 ja 7,0, mida kasutati kurgitaimede kastmiseks. Tulemused näitasid, et pH-l ei olnud kahe kasvuperioodi jooksul praktilist mõju kasvukiirusele, varerelüli pikkusele ega saagikusele. Mitme toitaine kättesaadavust ja omastamist mõjutas aga pH. Süsteemile kantud kaltsiumsulfaadi ja magneesiumoksiidi lahustuvus suurenes pH langusega, mis viis kaltsiumi ja magneesiumi suurenemiseni madalama pH juures. pH mõjutas ka fosfori assimilatsiooni taimekudedesse, suurendades fosfori omastamist kõrge pH juures. Kõrgem pH (7, 0) vähendas aga fosfori omastamist apoplastis. Nitraatide assimilatsioon lehekoesse varieerus oluliselt pH-ga, näidates suurimat assimilatsiooni pH väärtusel 5,8 ja madalaimat pH väärtusel 6,5. Kaltsiumi omastamine oli kõrgeim pH 6,5 juures. Toitainete kontsentratsiooni vesiviljeluse heitvees peeti hüdropooniliste lahustega võrreldes madalaks, kuid lehtede kudede elementanalüüs jäi soovitatud vahemikku.

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. Vee karedus

Definitsioon

Vee üldkaredus on peamiselt kahevalentsete katioonide kontsentratsiooni mõõt, enamasti kaltsium ja magneesium vees. Tavaliselt väljendatakse seda kaltsiumkarbonaadi ühikutes ekvivalendina ja seda kasutatakse, et hinnata vee võimet moodustada katlakivi ja selle mõju mitmesugustele tööstus-, kodu- ja keskkonnaprotsessidele.

Karedus kvantifitseerib vee üldist mineraalide sisaldust ja on oluline mitmesuguste protsesside jaoks, sealhulgas vee puhastus, põllumajandus ja vee sobivuse hindamisel spetsiifiliseks kasutuseks. Vee üldkaredust võib klassifitseerida "pehmeks" (madala karedusega) või "karedaks" (kõrge karedus) olemasolevate kaltsiumi- ja magneesiumiioonide kontsentratsiooni alusel.

Vee karedust saab väljendada ja kirjeldada kahte tüüpi – üldine karedus ja karbonaatne karedus. Üldine karedus ei avalda protsessile akvapoonikas suurt mõju, kuid karbonaatnekaredus, mis mõjutab vee leeliselisust, võib seetõttu muuta pH-d.

Üldine karedus on kaltsiumi (Ca^{2+}) ja magneesiumi (Mg^{2+}) kogus, samuti, kuigi väiksema löögiga raua (Fe^{+}) ionide sisaldus vees. Nende ionide kontsentratsiooni mõõdetakse tavaliselt mg/l või ppm-na. Nende ionide hulk vees sõltub suuresti värske vee haardest – kõrgemaid Ca ja Mg tasemeid leidub tavaliselt lubjakivipõhistest põhjaveekihtidest tulevates vetes. Vihmaveel on seevastu madal vee karedus. Mõlemal elemendil on suur mõju nii kaladele kui ka akvapoonika koosluses taimedele. Need toimivad taimede mikroelementidena ja võivad parandada soola kadu kalades.

Karbonaatne karedus on vees lahustunud karbonaatide (CO_3^{2-}) ja bikarbonaatide (HCO_3^{-}) kogus, mõõdetuna CaCO_3 mg/l. Vedelikes (vees) sisalduvatel karbonaatidel on leeliseline pH. Vees karbonaadid toimivad puhvrina, mis ei võimalda järske pH muutusi. Vesiviljelussüsteemis toodetud happest vabanevad vesinikioonid (H^{+}) seonduvad vees leiduva karbonaadi või bikarbonaadiga, vältides seega pH kiiret muutumist. Nitrifitseerivad bakterid toodavad lämmastikhapet (HNO_3), mis dissotsieerub vesiniku- ja nitraatioonideks – taimed omastavad nitraate; vesinikioonid ei ole ja nad võivad süsteemi pH-d kiiresti tõsta. Kui karbonatkaredus akvapoonilises süsteemis on madal, kogunevad H^{+} ionid ja vähendavad pH-d (muutuvad happeliseks), tinglikust piirist alates võivad kogu süsteemi toimimist muuta, mistõttu on oluline, et karbonaadi ja bikarbonaadi kontsentratsioon oleks tasakaalus, kuna nende ionide puhverdamisvõime.

Karbonaatide ja bikarbonaatide ammendumise vältimist akvapoonilises süsteemis saab vältida värske vee korrapärase täiendamisega eelistatud veeallikast. Allikavee karedust on võimalik reguleerida, kasutades filtreerimissüsteeme, mis on loodud sissetuleva vee ettevalmistamiseks vastavalt iga üksiku süsteemi vajadustele. Akvapoonika üld kareduse (üldise ja karbonaatse kareduse summa) optimaalne väärtus on 60-140 mg/l.

Tabel 2. Vee kareduse tasemed, mis põhinevad kaltsiumkarbonaadi kontsentratsioonil.

Vee kareduse	Kontsentratsioon (mg/l)
Pehme	0-60
Mõõdukalt kare	60-120
Kare	120-180

Väga raske

>180

2.5. Peamine toitaine – lämmastik

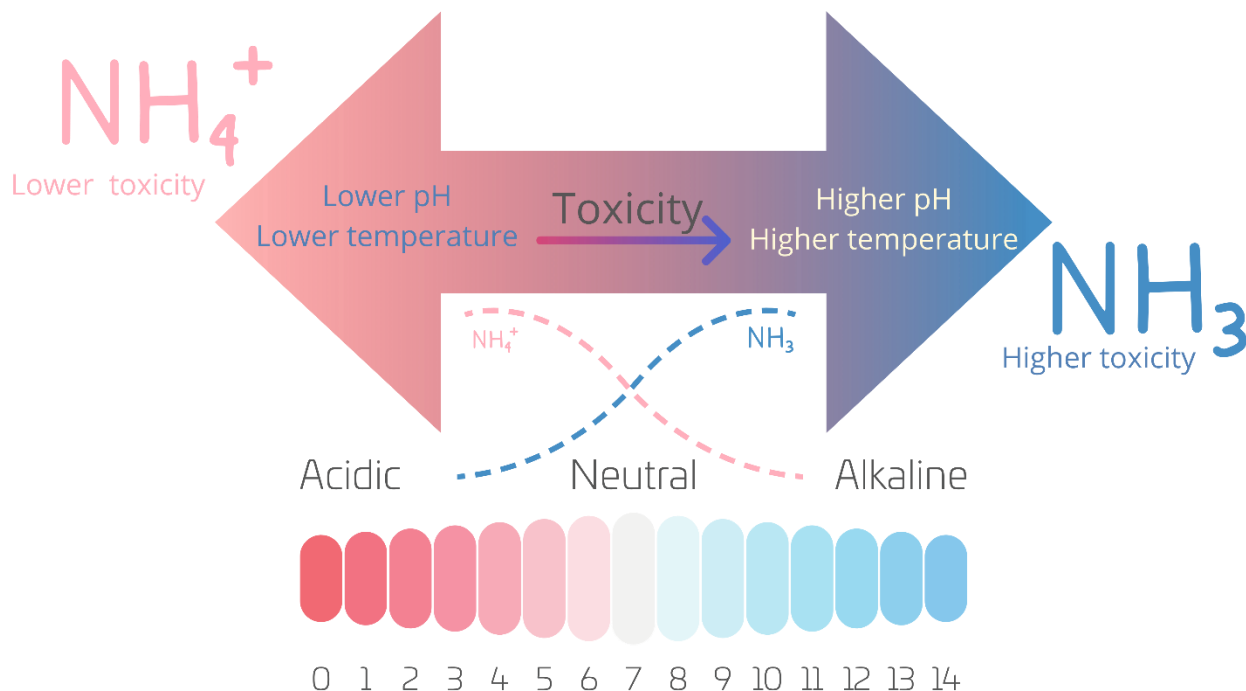
Definitsioon

Lämmastik on iga elusorganismi üks olulisemaid toitaineid – see on desoksüribonukleiinhappe (DNA), ribonukleiinhappe (RNA) oluline komponent, osa aminohapetest, mis on valkude koostisosad. Lämmastik esineb erinevates vormides akvapoonika süsteemis. Esmalt ammoniaagi (NH_3) või ammooniumina (NH_4^+); aja jooksul hakkavad bakterid end kehtestama ja oksüdeerides ammoniaagi/ammooniumi nitritiks (NO_2^-) ja seejärel nitraadiks (NO_3^-). Toimiva lämmastikuringe loomine on akvapoonika kõige olulisem protsess.

Akvapoonika kontekstis on toitainete ahela komponendid, nimelt esmatootjad ja tarbijad, tavaliselt ruumiliselt eraldatud vastavalt vesiviljelus- ja hüdropoonilises osas. Mikroorganismid vahendavad sümbiootilisi mõjusid, mis võimaldavad toitainete tõhusat kasutamist.

Lämmastiku sisenemine akvapoonilisse süsteemi toimub kalasööda kaudu, peamiselt valgu kujul. Kalad tarbivad valku, seedumise järel väljutatakse jäägid ammoniaagina (NH_3) ja ammooniumina (NH_4^+). Sööda valgusisalduse suurenemine toob kaasa lämmastikuainete kättesaadavuse suurenemise süsteemis. Ligikaudu 30% valgust kasutavad kalad ainevahetusprotsessideks ja kasvuks, ülejäänud osa eritub kaladest jäätmetena. Kala kõrvaldab lämmastiku kemikaalid nii nende küüniste kui ka uriini ja väljaheidete kaudu, peamiselt ammoniaagi kujul, mis koosneb nii ioniseerimata ammoniaagist kui ka ammooniumioonidest.

Ammoniaak esineb kahes erinevas olekus: ioniseerimata ehk ammoniaak, tähistatud kui NH_3 ja ioniseeritud, mida nimetatakse ammooniumiks, valemiga NH_4^+ . Ioniseerimata ammoniaagi toksilisus kaladele on hästi dokumenteeritud, samas kui ioniseeritud ammoniaaki peetakse üldiselt kaladele mittetoksiliseks, eriti kui seda esineb äärmiselt suurtes kontsentratsioonides. NH_3 ja NH_4^+ tasakaalusuhe vesilahustes sõltub pH ja temperatuuri tingimustest. Kui pH on võrdne või madalam kui 7,0, eksisteerib suurem osa ammoniaagist, eriti üle 95%, mittetoksilises olekus ammooniumioonidena (NH_4^+). Eeldatakse, et mittetoksilise ja toksilise ammoniaagi suhe suureneb pH taseme tõustes märkimisväärselt. NH_3 ja NH_4^+ suhet mõjutab vee temperatuur, kusjuures soojemad veetingimused põhjustavad antud pH tasemel kõrgemat NH_3 kontsentratsiooni, mis on jahedamate veetingimustega võrreldes ohtlikum vorm. Ammoniaagi lahustuvus vees on madalam kui NH_4^+ ioonidel. Selle tulemusena muundub NH_3 kiiresti gaasiliseks olekuks ja lendub seejärel veest, mille tulemuseks on eristatava lõhna eraldumine.



Joonis 5 Ammooniumi ja ammoniaagi kontsentratsiooni kujunemine temperatuurist ja pH-st lähtudes

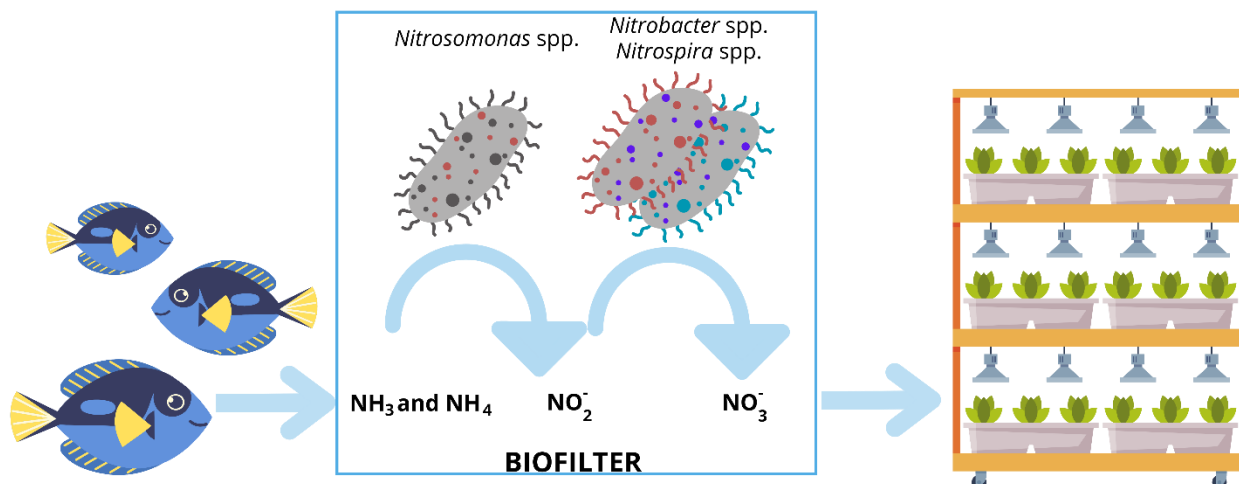
Kuigi ammooniumit peetakse üldiselt süsteemis olevate organismide suhtes madala toksilisusega, on ammoniaak üsna kahjulik ja seetõttu on vaja see süsteemist kõrvaldada või muuta nitraadiks. Nitrifikatsiooniprotsessi kõrvalsaadus, mida tuntakse nitritina (NO_2), on kaladele märkimisväärselt kõrge toksilise toimega. On arvatud, et nitrit on kaladele umbes 100 korda kahjulikum kui nitraat. Ammoniaak avaldab mõju kalade kesknärvisüsteemile, samas kui nitrit tekitab probleeme hapniku sidumisega. On leitud, et teatavate kalaliikide nitraadikontsentratsioon on lubatud kuni 300 mg/l ja rohkem. Seevastu ammoniaagi ja nitritite lubatud hälbed on palju madalamad, vastavalt 0,07 mg/l ja 1 mg/l. Lisaks väärib märkimist, et nitriteid ja ammoniaaki ei peeta taimede jaoks kõige soodsamateks lämmastikuallikateks. Tegelikult eelistavad taimed oma peamiste lämmastikuallikateks ammooniumi ja nitraate, kuna need ühendid soodustavad nende kasvu ja arengut. On leitud, et nitraatide kõrge kontsentratsioon üle 250 mg/l avaldab kahjulikku mõju taimede kasvule, soodustades liigset vegetatiivset arengut ja potentsiaalselt ohtlikku nitraatide kogunemist taimelehtedesse. Selline kogunemine kujutab endast märkimisväärselt ohtu inimeste tervisele. Soovitav on hoida nitraadisisaldus vahemikus 5-150 mg/l ja teha vee asendamine, kui nitraadisisaldus ületab selle läve. Ammoniaagi ja nitritite olemasolu viitab sellele, et nitrifikatsioonina tuntud muundamisprotsess ei toimu biofiltris täielikult. Väga oluline on selle probleemiga kiiresti tegeleda, suurendades nitrifitseerivate bakterite aktiivsust, mida on võimalik saavutada hapnikuga rikastamise teel.

Definitsioon

Nitrifikatsioon on bioloogiline protsess lämmastikuringes, mis on hädavajalik lämmastiku redutseeritud vormi (ammoonium ja ammoniaak) muundamiseks oksüdeeritud vormiks (nitraadiks). See on stabiilsem ja vähem toksiline. Nitraate saavad seejärel taimed paremini omastada, pakkudes kasvuks lämmastiku allikat. Protsess aitab eemaldada ka liigset ammoniaagivett, mis on oluline keskkonna ja veekvaliteedi säilitamiseks. Nitrifikatsiooni protsessi viivad läbi teatud tüüpi bakterid, peamiselt *Nitrosomonas* ja *Nitrobacter*, kuigi kaasatud võivad olla ka teised mikroorganismid.

Kui kalade poolt eritatava ammoniaagi akumulierumist ei takistata, põhjustab see kalade suremust. Akvapoonika süsteemide kontekstis väärib märkimist, et kalade toodetud ammoniaak elimineeritakse tõhusalt nitrifitseerivate bakterite aktiivsuse kaudu. Need bakterid hõlbustavad kaheastmelist protsessi, mida nimetatakse nitrifikatsiooniks, kus ammoniaak muundatakse nitraatlämmastikuks. Esialgu hõlbustavad ammoniaagi ja ammooniumi muundamist nitritiks (NO_2) erinevad bakteriliigid, nimelt *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* ja *Nitrosovibrio* spp. Eespool nimetatud protseduur nõuab hapniku olemasolu, viib leeliselisuse vähenemiseni, tekitab hapet vesinikioonide (H^+) kujul ja selle tulemuseks on pH taseme langus. Teises etapis hõlbustavad nitriti (NO_2) muundamist nitraadiks (NO_3) erinevad bakteriliigid, nimelt *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* ja *Nitrospina*. Väärib märkimist, et nitrit on teadaolevalt kaladele eriti ohtlik. Praegune arusaam viitab sellele, et *Nitrospira* on terviklik nitrifikaator, mis tähendab, et see on seotud nii nitriti kui ka nitraadi genereerimisega. Selle protsessi teine etapp nõuab ka hapniku olemasolu ja selle tulemuseks on pH vähenemine. Sellest tulenevalt on väga oluline jälgida vee karedust ja hoida soodsate väärtuste juures, et toetada nitrifikatsiooni mõju ja karbonaatide puhverdusvõimet. Selles reaktsioonis tekkiv nitraat on mittetoksiline ja toimib taimsete toitainete allikana akvapoonika süsteemi hüdropoonilises aspektis (joonis 6).

Kõrge lahustunud hapniku sisaldus ja madal orgaanilise aine kontsentratsioon on faktorid, mis iseloomustavad tõhusa nitrifikatsiooni keskkonda. Orgaaniline aine koosneb peamiselt söömata kala söödast ja kogunenud tahketest jäätmetest. Puuduliku hapnikusisalduse korral võib nitrifikatsiooniprotsess aeglustuda või täielikult peatuda, mille tulemuseks on ammoniaagi kogunemine tasemeni, mis on ohtlik veeorganismidele, eriti kaladele. Ammoniaagi muundamine nitritiks on tavaliselt nitrifikatsiooniprotsessi faas, mis seab üldisele kiirusele suurima piirangu. Seda nähtust võib seostada ammoniaaki oksüdeerivate bakterite, nagu *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosovibrio* sp., ja nitriti oksüdeerivate bakterite, sealhulgas *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus*, erinevate kasvukiirustega. Erinevad kasvukiirused põhjustavad osalist nitrifikatsiooni, eriti bioprotsesside toimimise algfaasis, mis viib nitritiioonide (NO_2^-) kogunemiseni kuni nitrifitseerivate mikroorganismide täieliku väljakujunemiseni, mis võib kesta kuni neli nädalat. Bakterid moodustavad enamasti biokile, mis on biofiltris kilekandva substraadi külge kinnitunud. Biofiltrit võib täheldada ka vesiviljelussüsteemi erineva ülesehitusega kambrites, näiteks ujuv sisuga kambrites või kinnitatud, jäiga sisuga kambrites.



Joonis 6. Biofiltris olevad bakteriliigid, mis osalevad nitrifikatsiooniprotsessis.

Ammoniaagi ja nitriti kõrvaldamise protsessi akvapoonikasüsteemides kutsutakse üldiselt biofiltratsiooniks (joonis 6). Biofiltratsioon on oluline lüli kalakasvatuse rolli ja vesiaiaduse osa vahel akvapoonika tervikus. Nitrifitseerivate bakterite aktiivsus väheneb märkimisväärselt ammoniaagi kõrgendatud kontsentratsiooniga kokkupuutel. Ammoniaagil on antibakteriaalsed omadused ja see võib pärssida nitrifitseerivate bakterite aktiivsust, eriti kui ammoniaagi kontsentratsioon ületab 4 mg/l, vähendades seega elustikus bakterite efektiivsust. Olukord võib eksponentsiaalselt halveneda, kui puuduliku suurusega biofilter toitub ülemäära ammoniaagiga. See viib bakterite kadumiseni ja ammoniaagi kontsentratsioon edasise eskaleerumiseni. Tugeva ja hästi toimiva biofiltri puudumine tooks kaasa jäätmete ladestumise, taimsete toitainete puuduliku tekke mis viib vesiviljelussüsteemi toime kahanemiseni.

Biofilter on elupaigaks nitrifitseerivate bakterite kolooniatele. Võib ette tulla, et kindla biofiltri kasutamine voodi akvapoonikasüsteemides olla tarbetu, kuna olemasolevad rajatise pinnad, nagu taimeparved, taimesubstraadid, anumate seinad ja muud biokilega kaetud veealused kolooniad, võivad olla piisavad. Sellegipoolest väärib märkimist, et toimivatest akvapoonikasüsteemidest enamus kasutab sellegi poolest biofiltri olemasolu, et hõlbustada orgaaniliste ainete lagunemist ning suurendada mikroelementide ja lahustunud hapniku kontsentratsiooni vees. Akvapoonika biokilesüsteemis (NFT) on eraldi biofiltri olemasolu toitainete taimede jaoks saadavaks tegemise kontekstis enamasti oluline. Liiga suur biofilter ei kahjusta akvapoonilist süsteemi. Kuigi on tõsi, et suure biofiltri omamine võib põhjustada lisakulusid tuleb tõdeda, et veidi üledimensioneeritud, buffermahutavusega biofilter on osutunud tõhusaks süsteemi rikete ennetamisel ja kergekujulisemalt läbielamisel paljudel juhtudel.



Joonis 5. Biofilter akvapoonikasüsteemi jaoks Roslageni ülikoolilinnakus, Nortaljes.

Eeldades, et järgitakse vee kvaliteedi põhitegureid, sealhulgas pH, lahustunud hapnikku, temperatuuri ja pindala, võib põhjendatult järeldada, et bakterid on nii olemas kui ka toimivad tõhusalt. Bakterite tähtsus akvapoonikas nõuab nende üldise tervise hindamist igal ajahetkel. Bakterid on mikroskoopilised organismid, mida ei saa palja silmaga jälgida, mistõttu on visuaalseks avastamiseks vaja kasutada mikroskoopi. Bakterite funktsiooni jälgimiseks on olemas sirgjooneline lähenemisviis, mis hõlmab ammoniaki, nitriti ja nitraadi taseme hindamist. See meetod annab väärtuslikku teavet bakterikoloonia üldise tervise kohta. Hästi toimivas ja tasakaalustatud akvapoonilises süsteemis on hädavajalik hoida ammoniaki ja nitriti sisaldus vahemikus 0-1 mg/l. Mõlema olemasolu näitab nitrifitseerivate bakterite võimalikku probleemi. Selle nähtuse esinemisele on kaks levinud selgitust. Esialgu võib täheldada, et biofiltri võimsus ei ole piisav, et mahutada praegust kala- ja kalasööda kogust. Seega eksisteerib tasakaalustamatus, mille tulemuseks on kalade ülepopulatsioon. Käesoleva probleemi lahendamiseks on üks võimalik lahendus kas suurendada biofiltri mõõtmeid või vähendada kalade populatsiooni või teise võimalusena muuta kalade söötmisrežiimi. Mõnikord võib see probleem tekkida siis, kui süsteemi esialgne tasakaal on häiritud kalade kasvu ja nende suurenenud söötmise tõttu, mis ületab biofiltri mahtu, mis jääb muutumatuks. Lisaks on juhul, kui süsteem on proportsionaalne, usutav, et bakteritel endil võib olla halvenenud funktsionaalsus. See tähelepanek võib viidata võimalikule veekvaliteediga seotud probleemile.

Bakterikolooniate moodustumise nähtust akvapoonikasüsteemi esmasel seadistamisel nimetatakse tavaliselt biofiltri loomiseks või tsükliteks. Tsükkel on akvapoonikasüsteemi loomisel põhiline esialgne protseduur. Tsükli lõpuleviimine sõltub tugeva nitrifitseerivate bakterite kogukonna loomisest. Ilma selle olulise sammuta muutub taimede kasv kättesaamatuks ja keskkond võib muutuda kalade heaolule kahjulikuks. Soovitav on algatada süsteemi tsükkel ilma kaladeta, kuni biofiltris on loodud stabiilne

mikrobioom. Mikroobikoosluste alustajate kaubanduslikud kombinatsioonid on nitrifitseerivate bakterikoosluste loomise soodustamiseks kergesti kättesaadavad. See omakorda viib nende bakterite vajaliku kestuse vähenemiseni, et saavutada süsteemis ja biofiltris piisav bakteritepopulatsiooni suurus.

Denitrifikatsioon viitab protsessile, mille käigus nitraat (NO_3^-) muundatakse nitritiks (NO_2^-), lämmastikoksiidiks (NO), dilämmastikoksiidiks (N_2O) ja lõpuks lämmastikgaasiks (N_2) keskkonnas, mida iseloomustab lahustunud hapniku puudumine või äärmiselt väike kogus (joonis 2), olles seega anoksiline ja anaeroobne. Denitrifikatsioon on bioloogiline protsess, mida teostavad denitrifikaatorid, mis hõlmavad arhee ja fakultatiivsete heterotroofsete bakterite erinevaid taksonoomilisi rühmi. Tänu oma suuremale potentsiaalile kasvuhoonegaasina võrreldes CO_2 -ga on hädavajalik minimeerida N_2O moodustumist, et optimeerida kiirust, millega N assimileeritakse taime biomassiks.

3. Mikroorganismid akvapoonikas

Akvapoonika on sümbiootiline süsteem, mis koosneb peamiselt kaladest, nitrifitseerivatest mikroorganismidest ja taimedest. Sellest hoolimata võivad aja möödudes selle konkreetse keskkonna kujundamisel ja mõjutamisel rolli mängida arvukad täiendavad organismid. Teatud olendid, näiteks vihmaussid, võivad mängida kasulikku rolli, aidates kaasa kalajäätmete lagunemisprotsessile. Biofiltrites elavad teatud organismid, eriti erinevad koorikloomad, mida võib liigitada healoomulisteks üksusteks, mis ei aita aktiivselt kaasa süsteemi üldisele toimimisele ega kahjusta seda. Erinevad organismid kujutavad endast ohtu akvapoonikas, sealhulgas parasiidid, kahjurid ja muud tüüpi bakterid. Nende organismide täielik kõrvaldamine on keeruline akvapooniliste süsteemide loomupärase mittesteriilse olemuse tõttu. Selleks et leevendada nende väikeste riskide võimalikku eskaleerumist ohtlikeks nakkusteks, on hädavajalik võtta vastu optimaalne majandamisviis, mis hõlmab vastupidavate ja vastupidavate kalade ja taimede kasvatamist. Seda on võimalik saavutada, säilitades hoolikalt kõrge hapnikusisaldusega tingimused ja tagades piisava juurdepääsu kõigile vajalikele toitainetele. Sel viisil saavad organismid kaitsta nakkuste või haiguste eest, kasutades oma tugevat immuunsüsteemi.

3.1. Vetikad

Definitsioon

Vetikad on mitmekesine fotosünteesiliste organismide kogum, kes elavad peamiselt veetingimustes, kuid võivad areneda ka maismaal ja isegi agressiivstes keskkondades. Nende suurus varieerub mikroskoopilistest üherakulistest organismidest tohutute hulkraksete organismideni. Kuna vetikatel puuduvad paljud taimedes leiduvad spetsiaalsed struktuurid ja koed, nagu juured, varred ja lehed, ei liigitata neid taimede hulka.

Vetikate hulka kuuluvad taksonoomilised kategooriad, mis koosnevad rohevetikatest, punavetikatest, pruunvetikatest ja ränivetikatest. Neid eristab võime koguda valgusenergiat klorofüllil ja teiste pigmentide kaudu, muutes fotosünteesi teel süsinikdioksiidi ja vee orgaanilisteks ühenditeks, tavaliselt suhkruteks.

Akvapoonilise süsteemi jõudlust võib kärpida vetikate areng. Kuna nad on fotosünteesilised organismid, võivad vetikad valguse korral vees kiiresti ja lihtsalt areneda. Vetikate kasvu mõjutavad üldiselt vee pH-, DO ja lämmastikusisaldused süsteemis. On peaaegu iseenesestmõistetav, et need tekivad akvapoonilises süsteemis, sest nad esinevad looduslikult kõigis veeallikates. Akvapoonikasüsteemides esineb sageli vetikaid, kuigi neid süsteeme hallatakse tavaliselt temperatuuri, fotoperioodi ja valguse intensiivsuse reguleerimisega kogu päeva jooksul. Vetikate kasv võib viidata süsteemis leiduvale kasutamata lämmastikule, mis tähendab, et kalad toodavad rohkem lämmastikuühendeid, kui allavoolu asuvad taimed suudavad omastada.

Vetikate morfoloogia hõlmab mitmesuguseid vorme, sealhulgas üherakulisi taimseid organisme, mida nimetatakse fütoplanktoniks, ja hulkrakseid liike, mis klassifitseeruvad makrovetikateks. Kiiresti kasvav fütoplankton võib kiiresti paljuneda ja toonida vett roheliseks, kuid makrovetikad loovad pikad filamentsed kiud, mis võivad kleepuda anumate põhja või torude külge. Vetikate areng võib muuta vee keemilist koostist ning põhjustada probleeme pumpade ja filtrite töömehhanismidele. Vetikad konkureerivad toitainete pärast teiste organismidega süsteemis, nad võivad sõltuvalt liigist kasutada lämmastikuallikatena nitraate ja ammooniumi. Nad loovad päevasel ajal hapnikku ja kasutavad seda öösel energiaks. Ekstreemsetel tingimustel võib öösel vetikate suurenenud hapniku tarve veest anoksilise keskkonna luua ja nii kalu tappa, lahustunud hapniku vajadus siis tõuseb. Filamentsed vetikad võivad samuti saada väga suureks ja neid on sageli raske lagundada. See näitab, et vetikate kuhjumine võib kahjustada pumpasid ja klompida filtreid, ohustades süsteemi toimekindlust, millega kaasneb kulukas remont.

Enamasti on vetikate kasvu jälgimiseks vaja ainult akvapoonika süsteemi osade, näiteks kalamahutite seinte, pumpade ja filtrite ümbruse ning taimede juurte visuaalset kontrolli. Vetikate tarbetu kasvu vältimiseks on oluline katta akvapoonikasüsteemide osad valgust blokeeriva materjali või kaanega, mis takistab ka vee aurustumist kogu süsteemis. Kuna taimede kasvuks kasutatavad valgusallikad (lambid) asuvad sageli vee lähedal, on oluline kujundada süsteem nii, et valgus ei paistaks otse veele. Kui jätta katmata vesi näiteks toitainekile peenardesse või kogumismahutisse, võib see kiiresti suurendada vetikate kasvu ja seega ka toitainete kiiret omastamist, jättes kultiveeritud taimedele vähem sööta. Kuna kala mahuti puutub tõenäoliselt valguse kätte, on vältimatu, et süsteemis areneb vetikate kasv, mistõttu on vaja süsteemi puhastada, kui vetikate kasv muutub nähtavamaks.



Joonis 6. Vetikate kasv akvapoonika mikrorohelistel kasvukanalitel, mis on valguse käes.

Juhtumiuuring!

Mikrovetikate kooskasvatamine akvapoonilistes süsteemides

Selles uuringus uuriti *Chlorella* sp. hinnatakse mikrovetikaid ujuvparvega akvapoonilises süsteemis ammoniaagi haldamiseks. Akvapooniliste süsteemide töö ajal jälgiti vetikate biomassi, köögiviljade saagikust ja süsteemide oluliste toitainete eliminatsiooni. Süsteemid tootsid töötamise ajal $4,15 \pm 0,19 \text{ g/m}^2$ päevas (kuiv baasil) vetikaid täisvõimsusel, mis on tagasihoidlik, sest kasvutingimused on mõeldud peamiselt kala ja juurviljade tootmiseks. Avastati, et vetikad suudavad ammoniaaki reguleerida, kuna eelistavad ammoniaaklämmastikku nitraatlämmastikule ning suudavad ka neutraliseerida pH langust põhjustanud nitrifitseerivaid baktereid.

Akvapoonilise süsteemi vetikakomponent pakub mitmeid tõestatud eeliseid. Vetikad võivad tavapäraste toimingute ajal anda hapnikku, tasakaalustada pH-d ja reguleerida ammoniaaki süsteemis. Kuna vetikad sisaldavad rohkem lämmastikku kui köögiviljad, suudavad nad lämmastikku eemaldada tõhusamalt kui köögiviljad, samas kui tootlikkus on väiksem, mis on samaväärne köögiviljade omaga ja on kasvatajatele majanduslikult ebasoodne. Lisaks konkureerivad vetikad köögiviljadega pigem kasvupinna ja kogu lämmastikukogumi kui nitraatlämmastiku pärast. Vetikatel on akvapoonilise süsteemi veetöötlusprotsessis eriline funktsioon ja kui tingimused lubavad, saab neid lisada süsteemi lõppu, et eemaldada veelgi rohkem ammoniaaki. Kui rääkida lämmastiku üldisest eemaldamisest, on vetikad tõhusamad kui köögiviljad.

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. Muud bakterid

Heterotroofsed bakterid

Akvapoonikas osaleb märkimisväärne bakterite kogukond, kusjuures paljud mikroorganismid arendavad sümbiootilist suhet. Bakterirühm, mida tavaliselt nimetatakse heterotroofseks rühmaks, on tuntud kui *Pseudomonas* spp. Tabelis 3 on näidatud selle protsessi eest vastutavad bakteriliigid. Kõnealused bakterid kasutavad peamise toiduallikana orgaanilist süsinikku ning tegelevad enamasti kaladest ja taimedest saadud tahkete jäätmete lagundamise protsessiga. Tahked kalajäätmed metaboliseeritakse heterotroofsete bakterite poolt protsessi kaudu, mida nimetatakse mineralisatsiooniks. See protsess hõlbustab oluliste mikroelementide vabanemist, mida taimed saavad akvapoonilistes süsteemides kasutada. Heterotroofsed bakterid koos teatavate looduslikult eksisteerivate seentega aitavad kaasa kalajäätmete tahke komponendi lagunemisele. Seda tehes vabanevad tahketesse jäätmetesse kinni jäänud toitained vette. Mineralisatsiooniprotsess on ülioluline, kuna see võimaldab taimedel pääseda juurde toitainetele, mis ei ole tahkel kujul kergesti kättesaadavad. Et hõlbustada taimede juurtel imendumist, on hädavajalik, et jäätmed läbiksid molekulaarse lagunemise protsessi lihtsamateks koostisosadeks. Heterotroofsetel bakteritel on võime saada toitaineid paljudest orgaanilistest ainetest, sealhulgas, kuid mitte ainult, tahketest kalajäätmetest, tarbimata kalatoidust, lagunevatest taimedest, närbuvatest taimelehtedest ja isegi surnud bakteriaalsetest organismidest. Akvapoonilised süsteemid pakuvad bakteritele erinevaid toiduallikaid, kuna see on avatud süsteem sisendmaterjalide osas, mis ei ole steriilsed. Biosoliidide kasutamine heterotroofsete bakterite kasvukeskkonnana võib viia nende kontsentratsiooni suurenemiseni, mis võib lõppkokkuvõttes põhjustada suurenenud hapnikutarbimist ja

biofiltri jõudluse vähenemist. Erinevalt nitrifitseerivatest bakteritest on heterotroofidel palju suurem paljunemiskiirus, hinnanguliselt 40 korda kiirem. Heterotroofsed bakterid vajavad kasvuks võrreldavaid keskkonnatingimusi kui nitrifitseerivad bakterid, eriti keskkonnas, kus lahustunud hapniku kogus on suur. Heterotroofsetel bakteritel on kolonisatsioon kõigis üksuse koostisosades, märkimisväärne kontsentratsioon piirkondades, kus tahked jäätmed kipuvad kogunema. Need organismid tegelevad sümbiootilise suhtega teiste bakteritega, et hõlbustada tahkete jäätmete lagunemist. Selle kogukonna olemasolu võib tõhusalt leevendada tahkete jäätmete kogunemist.

Sulfaati redutseerivad bakterid

Nitrifitseerivad ja mineraliseerivad bakterid (heterotroofsed bakterid) mängivad akvapoonilistes süsteemides kasulikku rolli, kuid teatud bakterite tüvedel võib olla kahjulik mõju. Üks näide kahjulikust bakterirühmast on sulfaati redutseerivad bakterid. Need bakterid asuvad tavaliselt hapnikuvabas keskkonnas, mida nimetatakse anaeroobseteks tingimusteks, kus nad saavad energiat väävli sisaldava redoksreaktsiooni kaudu. Tabelis 3 on näidatud selle protsessi eest vastutavad bakteriliigid. Probleem seisneb asjaolus, et selle konkreetse protsessi käigus saadakse vesiniksulfiidi (H_2S), mis on väga ohtlik aine veeorganismidele, näiteks kaladele. Väävli vähendavad bakterid on laialt levinud, asustades erinevaid veekeskkondi, nagu järved, soolakud ja suudmealad üle kogu maailma. Lisaks mängivad nad olulist rolli looduslikus väävli tsüklis. Need bakterid vastutavad vesiniksulfiidiga seotud haistmismeele eest, nagu mädanenud munade lõhn, samuti setete pigmentatsioon, mida iseloomustab hall-must toon. Üks akvapoonikas esinevaid väljakutseid on tahkete jäätmete kogunemine kiirusega, mis ületab heterotroofsete bakterite ja nendega seotud kogukonna võimet neid tõhusalt töödelda ja mineraliseerida. See tasakaalustamatus võib põhjustada anoksiliste seisundite teket, mis soodustavad sulfaati redutseerivate bakterite kasvu. Suure kalatihedusega süsteemides ületab tahkete jäätmete märkimisväärne tootmine kalade poolt mehaaniliste filtrite võimet õigeaegselt tõhusalt puhastada. Järelikult soodustab selline olukord bakterite levikut ja nende kahjulike metaboliitide teket. Paljudel juhtudel on ekspansiivsetel akvapoonilistel süsteemidel degaseerimispaak, mis on vahend vesiniksulfiidi ohutuks atmosfääri tagasi laskmiseks. Degaseerimisprotsessi peetakse väiksemamahulistes süsteemides tarbetuks. Sellegipoolest on isegi piiratud ulatusega süsteemides mädamunade või töötlemata reovee lehka meenutava kahjuliku aroomi tuvastamiseks vaja rakendada tõhusaks käitlemiseks sobivaid meetmeid. Nende bakterite kasv piirdub anoksilise keskkonnaga. Seetõttu on nende leviku leevendamiseks hädavajalik tagada piisav õhustus ja hapnikuga rikastatud vee põhjalik vool ning tõhustada mehaanilist filtreerimist, et vältida muda kogunemist.

Denitryfying bakterid

Denitrifikatsiooniprotsessi hõlbustab mikroorganismide rühm, mida peetakse ebasoovitavaks. Tabelis 3 on näidatud selle protsessi eest vastutavad bakteriliigid. Need bakterid, mis sarnanevad sulfaatide redutseerijatega, elavad anaeroobses keskkonnas. Need hõlbustavad nitraadi, mis on väga nõutud taimne toitaine, muundamist õhulämmastikuks, muutes selle taimedele kättesaamatuks. Denitrifikatsiooniprotsess võib põhjustada lämmastiku olulist vähenemist, ulatudes 25% -st kuni 60% -ni. Need bakterid on laialt levinud erinevates keskkonnatingimustes ja neil on märkimisväärne ökoloogiline tähtsus. Sellegipoolest võib nende bakterite esinemine akvapoonilistes süsteemides potentsiaalselt vähendada tõhusust, vähendades tõhusalt lämmastikvætetist. Ebapiisav hapnikuga varustamine kujutab endast sageli väljakutset ulatuslike ujuvloodite kontekstis, eriti nendes, mida iseloomustavad piklikud kanalid. Võimaliku probleemi esinemisele võib viidata siis, kui taimedel ilmnevad lämmastikupuuduse sümptomid isegi tasakaalustatud süsteemi olemasolul ja kui nitraadikogus vees on erakordselt väike.

Suuremahuliste akvapoonikasüsteemide kontekstis on võimalik lisada eraldi denitrifikatsioonipaak. Sellegipoolest on soovitatav seada prioriteediks nitraatide põhjalik kõrvaldamine taimede poolt, muutes seeläbi need väärtuslikud toitained biomassiks, selle asemel et võimaldada nende vabanemist gaasina.

Tabel 3. Bakteriliigid ja nende funktsioonid akvapoonikasüsteemis⁴.

Mikrobioloogiline protsess	Perekondade
Nitrifikatsioon	
-Ammoniaagi oksüdeerimine	<i>Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosolobus, Nitrosovibrio</i>
-Ammoniaagi oksüdeerimine arhede abil	<i>Trosopumilus, Nitrososphaeras</i>
-Nitriti oksüdatsioon	<i>Nitrobakter, Nitrospira, Nitrococcus, Nitrospina</i>
-Täielik ammoniaagi oksüdatsioon	<i>Nitrospira</i>
Denitrifikatsioon	<i>Dokdonella, Thermomonas</i>
Mineraliseerumine	<i>Pseudomonas, Flavobacterium, Sphingobacterium, Arcobacter</i>
Ammooniumi anaeroobne oksüdatsioon (Anammox)	<i>Brocadia</i>
Sulfaadi redutseerimine	<i>Fusibacter, Bacteroides, Desulfovibrio, Dethiosulfovibrio</i>
Orgaaniline fosfori mineralisatsioon	<i>Modestobacter</i>
Raua tsükli töö	<i>Acidibacter</i>
Lämmastiku sidumine	<i>Pontibacter, Pseudonokardia</i>

Kahjulikud bakterid

Soovimatud, kahjulikud või patogeensed bakterid hõlmavad neid, mis põhjustavad haigusi taimedel, kaladel ja inimestel. Lisateavet kalade ja taimepatogeenide kohta leiate uuringutest pealkirjadega "Kalad akvapoonikas - valik, nõuded ja piirangud" ja "Taimed akvapoonikas - valik, nõuded ja piirangud". Üldiselt mängib tõhusate põllumajandustehnikate loomine ja rakendamine olulist rolli bakteriaalsete infektsioonide leevendamisel ja vähendamisel akvapoonilistes süsteemides. Patogeenide ennetamist süsteemis on võimalik saavutada erinevate meetmete abil. Kõigepealt on ülioluline seada esikohale head töötajate hügieenitavad. See hõlmab nõuetekohase isikliku puhtuse säilitamist ja asjakohaste sanitaarprotokollide järgimist. Lisaks on oluline rakendada strateegiaid, et vältida näriliste süsteemi saastamist väljaheitega. Suuremahuliste kasvuhoonepõhiste akvapooniliste süsteemide puhul on oluline tagada, et looduslikud imetajad, samuti koduloomad, nagu koerad ja kassid, hoitakse süsteemist eemal, et minimeerida patogeenide sissetoomise ohtu. Lisaks on hädavajalik vältida saastunud või piisavalt ettevalmistamata vee kasutamist. Lõpuks on ülioluline tunnistada, et iga süsteemis kasutatav elussööt võib potentsiaalselt olla kandjaks võõraste mikroorganismide, näiteks muust allikast pärit kalasöödana kasutatavate usside sissetoomisel. Samuti, kui taimi tarnitakse ja kasutatakse akvapoonilistes süsteemides, tuleb hoolitseda selle eest, et taimede puukoolidest ei kanduks viiruslikku või bakteriaalset saastumist, kuna nende kasvatamiseks kasutatakse erinevat tüüpi substraate, näiteks mulda või komposti, mis sisaldab sageli ka patogeenseid organisme. Eriti oluline on hoiduda lindude väljaheidetega saastunud katustelt kogutud vihmavee kasutamisest, välja arvatud juhul, kui vesi läbib asjakohaseid töötlusprotseduure. Üks

⁴ Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). Kompleksne mikrobiom akvapoonikas: bakterite ökosüsteemi tähtsus. Mikrobioloogia aastaraamatud, 71(1), 1-13.

soojavereliste loomadega seotud oluline probleem on *Escherichia coli* võimalik edasikandumine, samas kui linnud on sageli *Salmonella* spp. Need patogeensed bakterid võivad tungida keskkonda loomade väljaheidete kaudu. Lisaks on hädavajalik tagada, et akvapooniline vesi ei puutuks kokku taimede lehestikuga, järgides ennetavaid meetmeid. Selle meetme rakendamise eesmärk on leevendada arvukaid taimehaigusi ja minimeerida kalavee saastumise ohtu võrreldes inimsaadustega, eriti kui toode on ette nähtud toortarbimiseks. Enne tarbimist on hädavajalik köögivilju põhjalikult puhastada, olenemata sellest, kas neid kasvatati akvapooniliste või tavapäraste meetoditega. Akvapoonika kontekstis on laialdaselt tunnustatud, et terve mõistuse mõistlik kasutamine ja nõuetekohaste hügieenitavade järgimine on tõhusad meetmed nakkuste esinemise ja leviku tõkestamiseks.

Bioohutusmeetmete rakendamine võib tõhusalt leevendada patogeensete mikroobide sissetoomise ohtu. Üks soovituslik tava hõlmab karantiinimeetmete rakendamist äsja omandatud kaladele või taimedele enne nende süsteemi toomist. Lisaks on oluline järgida rangeid hügieenistandardeid seadmetes ja käitlemisprotokollides. Korrapäraste süsteemihooldustavade rakendamine, nagu filtrite puhastamine ja sobivate voolukiiruste säilitamine, võib tõhusalt leevendada bakteriprobleeme, edendades tugeva ja tasakaalustatud ökosüsteemi loomist ja hooldamist.

3.3. Seened

Definitsioon

Akvapoonika seened on mitmekesine kogum eukarüootseid mikroorganisme seeneriigist, mis mängivad rolli süsteemi bioloogilises tegevuses. Seeni leidub tavaliselt kasvusöötmes ja biofiltri komponentides. Neil on tähtis funktsioon järele jäänud kalasöödast, kalajäätmetest ja lagunevast taimsest materjalist pärineva orgaanilise aine lagundamisel. Seened, mis toimivad lagundajatena, aitavad muuta keerulisi orgaanilisi molekule aluselisemateks molekulideks, vabastades seega toitaineid nagu lämmastik ja fosfor. Seenepopulatsioonide tõhus tõrje on ülioluline harmoonilise ja hästi toimiva akvapoonikasüsteemi säilitamiseks, tagades taimede optimaalse arengu ja kalade heaolu. Akvapoonikas esinev patogeenne seen võib eelkõige ohustada nii süsteemi taimseid kui ka kalalisi komponente.

Seened on olulised keeruliste orgaaniliste ainete lagunemiseks ja aineringluse täiendamiseks. Tsellulolüütilised seened nagu *Aspergillus*, *Penicillium* ja *Trichoderma* kiirendavad loomulikku lagunemisprotsessi. Selliseid seeneliike nagu *Candida albicans*, *C. parapsilosis*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *Rhizopus*, *Fusarium* spp., *Trichoderma* ja *Penicillium* spp. on leitud ka akvapoonikasüsteemist – need liigid ei mõjuta kalade heaolu. Veevormid, kuigi peamiselt saprofüütilised, on võimelised koloniseerima erinevaid aineid ja looma parasiitseid seoseid elavate peremeesorganismidega, mis mõjutavad oluliselt bioloogilist tootlikkust.

Seened õitsevad hämaras, niiskes keskkonnas, kus nad vabastavad hüdrolüütilisi ensüüme, et eraldada toitaineid surnud orgaanilisest ainest, kasutades seda süsiniku ja energia allikana nende arengu ja paljunemise säilitamiseks. Rikkalik toitainekeskkond annab rohkem hüdrofoobseid eoseid võrreldes halva toitainekeskkonnaga. Seente populatsioonide tõhus kontroll on harmoonilise ja õitsva akvapoonikasüsteemi säilitamiseks ülioluline, edendades optimaalset taimede arengut ja kalade heaolu.

Akvapoonikasüsteemis olevad seemed on rohkem seotud taime- või kalahaigustega. Siseruumides on akvapoonikasüsteemid alati seenhaigustele, näiteks jahukaste, mis levib kiiresti kogu taimepopulatsioonis, näiteks kurgid ja salat. Kuna siseruumides hoitavad akvapoonikasüsteemid loovad niiske keskkonna, on seenhaiguste kiire leviku vältimiseks äärmiselt oluline säilitada ruumis sobiv niiskus ja ventilatsioon. Fungitsiide võiks kasutada seenhaiguspuhangute korral, kuid enamikul seentest, mis nakatavad, näiteks taimedel, ilmnevad nähtavad sümptomid, kui taim on juba täielikult nakatunud ja taimed tuleb ära visata. Seenhaiguste vältimiseks tuleb erilist tähelepanu pöörata sellele, et vältida nakatunud pinnase, taimede või muude esemete sissetoomist, mis tooksid sisse patogeenseid seeni, mis võivad põhjustada toodangu kadu.

Juhtumiuuring!

Entomopatogeensete ja mükoparasiitsete seente potentsiaalne kasutamine jahukaste vastu akvapoonikas

On kindlaks tehtud, et entomopatogeensed ja mükoparasiitsed seemed on bioloogiliselt ohutud tõrjevahendid erinevate kahjurite vastu. See uuring määras kindlaks, kui hästi mükoparasiitne seene *Trichoderma virens*, entomopatogeensed seemed *Lecanicillium attenuatum* ja *Isaria fumosorosea* pärssis *Podosphaera xanthii* (jahukaste) kasvu. Lisaks tutvustades kolm, seente biotõrjevahendid akvapoonilisse vette ja nende arengu jälgimine ja ellujäämine, täheldati võimalikke negatiivseid tagajärgi süsteemile. Tulemused näitasid, et 107 CFU/ml juures vähendasid kolm biotõrjeainet oluliselt jahukaste. *L. attenuatum* töödeldud lehtedel ilmes märkimisväärne 85% haiguse vähenemine kasvuhoone tingimustes (65-73% suhteline õhuniiskuse-RH). haiguse raskusastmega 32% alla 65–73% suhtelise õhuniiskuse korral olid *I. fumosorosea*-ga töödeldud lehed haiguse raskusastmed kõige madalamad.

Lisaks täheldati, et *L. attenuatum* eosed olid lehtedel kõige püsivamad; 65–73% suhtelise õhuniiskuse all tõusis spooride populatsioon 7,3 CFU-lt $9,54 \times 10^3$ CFU-ni/ml. Teiselt poolt 96 tunni pärast kolme hüdropoonikas testitud entomopatogeense seente eosed vesi vähenes drastiliselt enam kui 99%. 96 tunni pärast tekkis esialgne *L. attenuatum* spoori kontsentratsioonid 10^7 CFU/ml alandati 4×10^3 CFU-ni.



JOONIS 4. Mikrobioloogiliste ainete efektiivsus jahukastega kunstlikult nakatunud kurgilehtedel (A) 0,05% Tween 80 lahusega (kontroll) töödeldud lehtedel pärast 20-päevast töötlemist ja (B) lehtedel, mida on töödeldud *L. attenuatum*iga 20 päeva pärast. Mõlemat ravi manustati 48 tundi enne *P. xanthii* inokuleerimist. Teise pildilise esitluse, mis näitab TVI ja IFR-iga töödeldud lehtede võrdlusi, leiab lisamaterjali jooniselt

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. Vee allikad

Vett võib pidada võtmeelemendiks akvapoonilistes süsteemides, kuna vesi jaguneb süsteemi kahe peamise komponendi (kalade ja taimede) vahel, see on peamine toitainete kandja süsteemis ja see määrab üldise keemilise keskkonna, milles kalu ja taimi kasvatatakse. Kasutatav veeallikas mõjutab seadme veekeemiat. Seetõttu on see oluline koostisosa, millel võib olla oluline mõju süsteemile. Akvapoonilises süsteemis on veeallikas ja see, mida see lähtevesi keemiliselt, füüsikaliselt ja bioloogiliselt sisaldab, süsteemile suur mõju, sest see seab kõige olulisemate veekvaliteedi parameetrite lähtealuse. Uute veeallikate puhul tuleks alati kontrollida pH, kareduse, soolsuse (lahustunud soolade kontsentratsioon), kloori (kui kasutatakse kraanivett) ja mis tahes saasteainete (raskmetallid, mikroobne saastumine) suhtes, et tagada vee ohutu kasutamine.

Ühisveevärgi vesi

Munitsipaal veevarustust töödeldakse mikroobide kõrvaldamiseks sageli erinevate kemikaalidega. Kloor ja kloramiinid on veepuhastuses domineerivad ühendid. Nende kemikaalide olemasolu akvapoonilises ökosüsteemis ohustab kalade, taimede ja bakterite heaolu, kuna neil on toksilised omadused. Neid kemikaale kasutatakse spetsiaalselt bakterite kõrvaldamiseks vees, kuid nende kasutamisel on negatiivsed tagajärjed akvapoonilise keskkonna üldisele tervisele. Kloori testikomplektid on võimalik saada ja kui tuvastatakse kloori suurenenud kogused, tuleb vesi enne kasutamist töödelda. Lihtne lähenemine hõlmab vee säilitamist enne kasutamist, hõlbustades seega kogu kloori hajumist atmosfääri. See protsess võib kesta rohkem kui 48 tundi, kuigi see võib juhtuda kiiremini, kui vesi on jõuliselt gaseeritud. Kloramiinidel on suurem stabiilsus ja neil on madalam kalduvus vabaneda. Kuid gaasipuhastus on tavaliselt piisav väikesemahulistes süsteemides, mis kasutavad munitsipaalvett. Soovitav rusikareegel on hoiduda rohkem kui 10% vee asendamisest ilma testi läbi viimata ja kloori eelnevalt kõrvaldamata. Lisaks sõltub vee kvaliteet koostisest, mis põhineb sellel, kust algvesi saadakse.

Kõige sagedamini töödeldakse Euroopa Liidus kraanivett nii, et seda oleks ohutu tarbida, mis tähendab, et see on piisavalt kvaliteetne ka akvapoonikasüsteemi jaoks. Euroopas hangitakse joogivett järvedest või jõgedest ning selle puhastamiseks võetakse mitmeid meetmeid, nii et see oleks kooskõlas joogiveedirektiividega. Joogivesi filtreeritakse läbi liiva-, kruusa- ja membraanfiltrite, et eemaldada osakesed, bakterid ja muud lisandid, seejärel desinfitseeritakse vesi kloorimise, UV-kiirguse või osoonimisega. Kraanivee pH-d reguleeritakse ja kvaliteeti jälgitakse kogu protsessi vältel kuni tarbijani jõudmiseni. Reguleerivate asutuste kehtestatud ranged standardid viitavad sellele, et kraanivesi on väikesemahuliste akvapoonikasüsteemide jaoks üks sobivamaid veeallikaid.

Maa-alused veeallikad

Kaevudest võetud vee kvaliteet sõltub suuresti pinnase materjalist ja põhjaveekihti infiltratsiooni allikatest. Kui aluskivim on lubjakivi, siis on vees tõenäoliselt üsna kõrge kareduse kontsentratsioon, mis võib mõjutada vee pH-d. Veeallikates, näiteks lubjakivipõhistes põhjaveekihtides ja/või jõesängides, leidub kõrgeid üldise kareduse kontsentratsioone, kuna lubjakivi koosneb peamiselt kaltsiumkarbonaadist (CaCO_3). Lubjakivi aluspõhjajakivimite kaevudest/põhjaveekihtidest saadava vee karbonaadi kõrge karedus on tavaliselt umbes 150–180 mg/l. Vee karedus ei ole akvapoonikas suur probleem, sest leeliselisust tarbib loomulikult nitrifitseerivate bakterite toodetud lämmastikhape. Kui aga kareduse tase on väga kõrge ja nitrifikatsioon on kalade väikese biomassi tõttu minimaalne, võib vesi jääda veidi aluseliseks (pH 7–8) ja seista vastu akvapooniliste süsteemide loomulikule kalduvusele muutuda nitrifikatsioonitsükli ja kalade

hingamise kaudu happeliseks. Sellisel juhul võib osutuda vajalikuks kasutada väga väikeseid happekoguseid, et vähendada leeliselisust enne vee lisamist süsteemi, et vältida pH kõikumist süsteemis.

Puuritud puuraukudest saadud vee kvaliteet sõltub suuresti iga konkreetse piirkonna geomorfoloogilisest koostisest. Teatud piirkondades võib olla suurema soolsusega vesi või lahustunud mineraalide sisaldus. Teatavates piirkondades võib raua või sulfaatide sisaldus olla kõrge. Sellistel juhtudel tuleks nende ionide eemaldamiseks sisendveest kasutada mitmeid kindlaksmääratud filtreid. Selliste süsteemide maksumus võib suurendada üldisi tegevuskulusid, mistõttu tuleks hoolikalt hinnata, kas muud veeallikad oleksid akvapoonika kasutamiseks elujõulisemad. Filtreerimissüsteemid tuleb välja vahetada, kui maksimaalne puhastusvõimsus on ammendatud, seega saaks kulusid regulaarselt veelgi suurendada. Põhjaveekihi vett tuleks kahtluse korral enne kasutamist lasta ülevaate saamiseks analüüsida sertifitseeritud/akrediteeritud laborites (vees on raua, väävli lõhn), et tagada sisendvee kvaliteet.

Vihmavesi

Vihmavesi on akvapoonika jaoks väga kasulik veevarustuse allikas. Vihmavesi säilitab tavaliselt neutraalse pH ja sisaldab minimaalselt karbonaate ja lahustunud mineraale, samuti tühist soolsust. See kompositsioon sobib ideaalselt süsteemi täiendamiseks ja takistab soolade ladestumist aja jooksul. Sellegipoolest on teatud piirkondades, näiteks Ida-Euroopas, Ameerika Ühendriikide idaosas ja Kagu-Aasia osades, sademete pH veidi happelisem pH, kuid see ei tohiks mõjutada vee kvaliteeti. Puhverduisvõime lahjendamiseks on sageli soovitatav koguda ja ladustada vihmavett, tõstes samal ajal mineraalide lisamisega ka kogu vee karedust. Lisaks vähendab vihmavee kogumise rakendamine tõhusalt üksuse tegevuskulusid, edendades samal ajal ka suuremat jätkusuutlikkust. Vihmavesi kogutakse tavaliselt septikutesse, mis kaevatakse maasse, et säilitada jahedat temperatuuri ja tagada, et sellele ei satuks valgust, et vältida vetikate kasvu. Vihmavesi ei sisalda tavaliselt mikroorganisme, kuid vihmavee hoidmiseks kasutatavad mahutid või mahutid võivad hõlbustada mikroorganismide kasvu. Vihmavee kasutamisel tuleb olla ettevaatlik – kogumissüsteem tuleb ette valmistada nii, et ei oleks võimalik kokku puutuda metsloomadega, samuti muude võimalike saasteallikatega, näiteks lähedalasuvate puude lehtedega, lähedal asuva tehase mõjuga, mis tekitavad oma heitmetega peenosakesi.

5. Akvapoonika veepuhastus

Vee desinfitseerimine

Nii bakteriaalsed kui ka viiruslikud organismid võivad akvapoonikasüsteemides pakkuda märkimisväärsed väljakutseid. Kuigi süsteem toimib tsükliliselt ja on teoreetiliselt võimeline ennast säilitama, on juhtumeid, kus patogeenide oht võib suurened. Kõige levinumad vee desinfitseerimise meetodid on osoonitöötlus ja UV-kiirgus. UV-kiirgusel, kui see kiirgab teatud intensiivsusega, on võime lagundada bioloogiliste üksuste, näiteks patogeenide ja üherakuliste organismide DNA-d. Akvapoonikas paikneb UV-valgus tavaliselt kompaktses toruosas, mis asub mehaanilise filtreerimisseadme ja biofiltri vahel, või asetatakse torupaagi ette. Optimaalse jõudluse saavutamiseks on ülioluline paigutada UV-lamp mehaanilisest filtreerimissüsteemist allavoolu, et vältida rippuvate materjalide takistusi. Osoon (O_3) võib tõhusalt vähendada nakkusi ja muid soovimatuid organisme. Kui osoon puutub kokku veega, läbib see protsessi, mida nimetatakse lõhenemiseks, mille tulemuseks on hapnikumolekulide (O_2) ja reaktiivse hapniku liigi moodustumine, mida tuntakse vaba hapnikuradikaalina ($O_2^{\cdot-}$). See radikaal reageerib keemiliselt orgaaniliste ühenditega ja oksüdeerib neid. Lisaks on osoonimolekuli radikaal O suunatud ja kõrvaldab ka bakterid, planktoni ja filamentsed vetikad, rünnates nende bioloogilisi rakuseinu. Sellegipoolest on osoonil

märkimisväärne reaktsioonivõime ja see võib kahjustada biofiltris olevaid nitrifitseerivaid baktereid ning liigse manustamise korral kahjustada kalade lõpuseid. Järelikult tuleb annust pidevalt reguleerida.

Keemilisi mõjureid saab kasutada sihipäraste sekkumiste jaoks, et vähendada mikroorganismide taset vees. Sageli kasutatakse vesinikperoksiidi (H_2O_2), kuid ülemääraseks annused võivad oluliselt kahjustada kalade heaolu ja kahjustada filtris olevaid mikroorganisme. Vesinikperoksiidi kasutatakse enamasti vabade paakide ja muude seadmete desinfitseerimiseks süsteemi tegevusetuse perioodidel, kui seal ei ole kalu ega väljakujunenud biofiltreid.

Kuna kõik ülalnimetatud desinfitseerimismeetodid võivad mõjutada akvapoonikasüsteemi, sealhulgas kalade, taimede ja biofiltrit koloniseerivate mikroorganismide üldist tervist, on soovitatav vältida nende lahuste kasutamist väiksemamahulistes üksustes, kuna desinfitseerimisvahendite kumulatiivne mõju võib kahjustada keerulist sümbiootilist vastastikkust. Akvapoonikasüsteemi käivitamisel on soovitatav kõigepealt luua tingimused, mida võib pidada hügieeniliseks ja mingil viisil aseptiliseks. Ruum tuleb desinfitseerida ja rakendada hügieeninõudeid (käte, jalatsite kanalisatsioon, kaitseriietus jne), et vältida vajadust desinfitseerimismeetodite järele, mis võivad kahjustada juba loodud süsteemi.

5.1. Veekvaliteedi reguleerimine ja tõrkeotsing

Vee kvaliteet akvapoonilises süsteemis on oluline parameetrite kogum, mis mõjutab otseselt kõigi süsteemi kaasatud organismide – taimede, kalade ja mikroorganismide – tervist ja heaolu. Allpool on koostatud kõige levinumad veekvaliteediga seotud küsimused, sealhulgas võimalikud lahendused ja viisid kõnealuse parameetri reguleerimiseks (tabel 4).

Tabel 4. Vee kvaliteedi parameetrid ja tõrkeotsing.

Parameeter	Probleem	Lahus
Lahustunud hapnik	Madal lahustunud hapniku sisaldus	- Vähendage kalade asustustihedust - Suurendage õhustamist (rohkem õhukive, suuremad pumbad) - Kui ümbritseva õhu temperatuur on tõusnud, on hapniku lahustumise tõttu vees vaja rohkem õhutamist - Vahetage kalade populatsioon (suuremad kalad tarbivad rohkem hapnikku)
Ph	pH on liiga madal (happeline)	- Lisage järk-järgult $NaHCO_3$ (vees lahustatud) või $NaOH$, kuni saavutatakse optimaalne pH - Lisage värske vesi (vee kareduse alusel)
	pH on liiga kõrge (aluseline)	Lisage hapet (HCl või H_3PO_4) mahutisse
Temperatuur (vesi)	Temperatuur liiga kõrge	- Katke veereservuaarid, mahutid isolatsioonimaterjalidega, kui see on otsese päikese käes - Paigaldage vesijahutusseade

	Temperatuur liiga madal	• Lisage värsket vett • Isoleerige veehoidlad ja mahutid • Paigaldage reguleeritud temperatuuriga veesoojendi
Lämmastikuühendid	Nitriti või ammoniaagi piik	• Vähendage kalade söötmise kiirust • Lahjendage süsteemis olev vesi värskes sisendveega • Suurendage õhutamist biofiltris • Suurendage biofiltri pindala
Vee karedus	Vesi on liiga pehme/ liiga kõrge	• Liiga pehme – kareduse tõstmiseks kasuta lisaaineid (kustutamata lupja (Ca(OH)_2)) • Liiga kõrge – sissevooluvee töötlemine ja filtreerimine
Mikrotoitained	Taimed hakkavad närbuma	• Taimekahjustuste tõttu lisada vajadusel mineraalväetist • Regulaarne veekvaliteedi seire, et vältida taimede puudujääke
Vetikate kasv	Rohevetikate kasv	• Varjutage avatud vesi katetega, minimeerige vee kokkupuudet valgusega

5.2. Vee kvaliteedi testimine ja seire

Seire sagedus varieerub sõltuvalt konkreetsest vaadeldavast mõõdikust. Soovitatav on taimede ja loomade esmase ladustamise ajal iga päev katsetada käivitussüsteeme, et teha kiiresti vajalikke kohandusi. Näiteks selleks, et tegeleda ammoniaagi kõrge tasemega, võib vähendada söötmismahutusi, suurendada õhutamist või lahjendada vett. Pärast toitainete tsüklil tasakaalu saavutamist (pärast vähemalt 4-nädalast kestust ilma märkimisväärt erinevusteta parameetrites) on korrapärane iganädalane seire tavaliselt rahuldav, et säilitada vee soodne kvaliteet. Kui aga kahtlustatakse probleemi (näiteks muutused kalade välimuses või käitumises või puuduste ilmed taimedes), on soovitatav jätkata veekvaliteedi sagedasemat seiret. Seetõttu on hädavajalik teostada kalade ja taimede heaolu igapäevast jälgimist, et kiiresti tuvastada võimalikud probleemid. Seiremõõdikute põhjaliku arvestuse säilitamine on ülioluline. See hõlmab kalade välimuse ja käitumise jälgimist (normaalne või ebanormaalne), taimede seisundi hindamist (terve või halb) ning veekeemia parameetrite, nagu pH, lahustunud hapnik, ammoniaak, nitritid ja nitraadid, mõõtmist. Seda lähenemisviisi järgides saab potentsiaalse probleemi algpõhjuse hõlpsasti avastada ja kui probleem kordub, saab varem tõhusa lahenduse kiiresti rakendada. Tabelis 5 on kokku võetud kõige olulisemad veekvaliteedi parameetrid ja kõige sagedamini kasutatavad katse-/seiremeetodid.

Tabel 5. Veekvaliteedi testimine ja seire.

Parameeter	Järelevalve
Lahustunud hapnik	• Jälgige kala, õhupumpade toimimist • DO näitu saab mõõtekomplektide abil (odavam, mitte nii usaldusväärne, üksikud mõõtmised)

	• DO näidud anduritelt kohapeal või seadistatud online-jälgimiseks (kallimad, usaldusväärsemad, pidevad mõõtmised) • Kui süsteem, söötmisskiirused ja kalad on kindlaks tehtud, saab mõõtmisi teha harvemini
Ph	• pH testribad (odavad, mitte nii täpsed) • pH-andurid – kaasaskantavad mudelid (mitte väga kallid) • Pidev pH-andurite jälgimine - veidi kallim, on veebipõhine võimalus • Mõõtmisi saab teha iga päev või ideaalis pidevalt, et jälgida muutusi
Temperatuur (vesi)	• Analoogetermomeetrid • Digitaalne termomeeter veebipõhise valikuga • Temperatuuri jälgimine toimub pidevalt • Temperatuuriandurid tulevad sageli kokku teiste mõõteseadmetega (pH, DO)
Lämmastikuühendid	• Komplektid nitriti (NO₂), ammoniaagi (NH₃/NH₄), nitraadi (NO₃) mõõtmiseks • Spektrofotomeetriline analüüs • Nitraatide mõõtmise andurid • Testribad ja tiitrimise analüüs • Mõõtmised tehakse kord nädalas või paar korda nädalas
Vee karedus	• Testribad ja tiitrimise analüüs • Sõltub suuresti veeallikast ja seetõttu ei pea süsteemi karedust nii tihti jälgima
Mikrotoitained	• Mikrotoitainete kontsentratsiooni on ettevõttesiseselt raske jälgida • Testribad ja tiitrimise analüüs • Kui taimedel hakkavad ilmnema mikrotoitainete puuduse tunnused, tähendab see, et toitained on süsteemist ammendatud • Soovitav on mikroelementide igakuine analüüs, mida tavaliselt teevad akrediteeritud laborid
Vetikate kasv	• Visuaalne kontroll – roheline lima konteinerite/mahutite seintel, sängis

Viited

- 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.