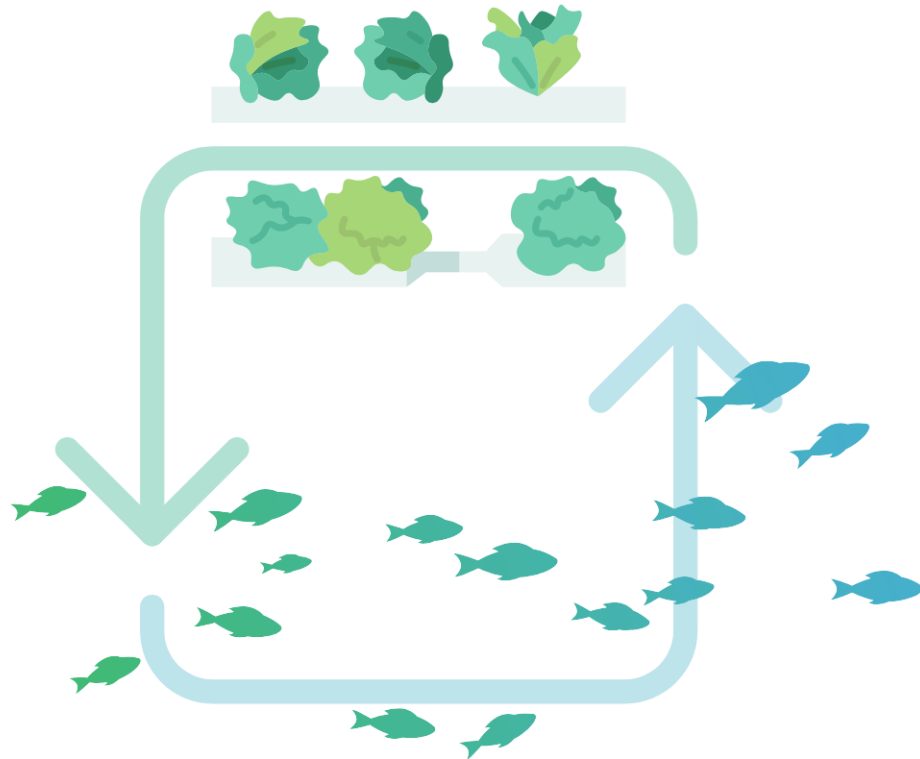


VESI AKVAPONISESSA VILJELYSSÄ



Sisältö

1. Johdanto	4
1.1. TransFarm projekti	4
1.2. Veden laatu akvaponisessa viljelyssä	5
2. Veden laadun parametrit	6
2.1. Lämpötila	6
2.2. Happipitoisuus	9
2.3. Veden happamuus	12
2.4. Veden kovuus	15
2.5. Tärkein ravinne – typpi	16
3. Mikro-organismit akvaponisessa viljelyssä	21
3.1. Levät	22
3.2. Muut bakteerit	24
4. Veden lähteet	29
5. Veden käsittely akvaponisessa viljelyssä	32
5.1. Veden laadun sääntely ja ongelmat	33
5.2. Veden laadun testaus ja monitorointi	34
Lähteet:	36

Abstrakti

Akvaponinen viljely on järjestelmä, jossa yhdistyvät kalanviljelyn ja kasvien vesiviljelyn periaatteet. Kalat oman metabolisen aineenvaihduntansa kautta synnyttävät kalanrehusta ravinteikasta jätettä, ulostetta, joka sitten mikro-organismien metabolisen toiminnan kautta muuttuu sopivaan tyyppien muotoon, joka taas on helposti kasvien käytettävissä ravinteena. Vesi pääelementtinä yhdistää kaikki kolme elävää organismia akvaponisessa järjestelmässä. Vesi on kalojen ja mikro-organismien elinympäristö sekä kasvien ravintoympäristö, joihin kaikkiin veden laatu siis vaikuttaa. Vaikka kalojen ja kasvien vesiviljelyn eri tekniikoilla on erityisiä vaatimuksia vedenlaadulle, on akvaponisessa vesiviljelyssä tehtävä sopiva kompromissi, joka sopii niin kaloille, kasveille kuin mikro-organismeillekin. Näiden kolmen organismiryhmän välinen monimutkainen suhde esiintyy tiiviissä symbioosissa tarjotakseen toisilleen tarvittavat ravintoaineet. Tässä raportissa esitetään yhteenveto akvaponisen järjestelmän tärkeimmistä veden laatuparametreista. Tietoja veden laatuparametreista, kuten veden happamuus (pH), liuennut happi (DO), veden kovuus, johtavuus, lämpötila ja tyyppien kiertokulku, on kuvattu kunkin tähän järjestelmään kuuluvan organismin näkökulmasta. Vedenlaadun seuranta ja mahdollisten ongelmien etsintää on myös kuvattu yleisimpiin tällaisissa järjestelmissä havaittuihin ongelmiin perustuen. Tämä raportti sisältää yleistä tietoa sekä maatalousalan yrittäjille että yksityishenkilöille, jotka ovat kiinnostuneita akvaponisesta viljelyjärjestelmästä ja mahdollisesti suunnittelevat sellaisen aloittamista.

Asiasanat: *TransFarm, akvaponinen viljely, veden laatu, parametrit*

Tämä raportti on käännetty suomeksi TransFarm hankkeen toteuttamasta alkuperäisestä julkaisusta "WATER QUALITY IN AQUAPONICS – Training materials on water quality".

Tiedot tähän raporttiin on kerätty kokoelmasta erilaisia artikkeleita ja kirjoja, joiden lähdeviitteet löytyvät raporttiosion kohdasta "Lähteet". Alkuperäisen raportin on laatinut TransFarm -hankkeen tiimi Latvian yliopistosta.

Tämä raportin on laatinut Latvian yliopiston TransFarm tiimi yhdessä muiden hankekumppaneiden kanssa ja sitä on tukenut Interreg Central Baltic ohjelma osana "TRANSborder cooperation for circular soil-less FARMing systems - TransFarm" hanketta.

1. Johdanto

1.1. TransFarm projekti

Elintarvikeala on kohdannut viime vuosikymmeninä ja tulee edelleen kohtaamaan useita ympäristöön liittyviä ja sosiaalisia haasteita: maatalous on ala, johon ilmastonmuutos vaikuttaa erityisen paljon, meremme ovat liikakalastettuja ja maailman väestön arvioidaan jatkavan kasvuaan ja olevan noin 9,7 miljardia ihmistä vuoteen 2050 mennessä. Itämeren alue on voimakkaasti riippuvainen elintarvikkeiden tuonnista, erityisesti vihannesten, hedelmien ja kalan osalta; Viime vuosina pandemiat ja Ukrainan sota ovat paljastaneet tarpeen luoda omavaraisempia elintarvikejärjestelmiä. Lisäksi maatalous ja kalojen vesiviljely ovat merkittävimpiä tekijöitä Itämeren rehevöitymisessä.

Näihin haasteisiin vastaamiseksi TransFarm-projekti haluaa tuoda elintarviketuotannon lähemmäs kuluttajia edistämällä maaperättömän (soil-less) viljelyn menetelmiä, jotka voidaan toteuttaa sisätiloissa ja jotka mahdollistavat kasvukauden jatkumisen ympäri vuoden. Esimerkkejä näistä menetelmistä ovat hydroponinen viljely (kasveja kasvatetaan vedessä) ja akvaponinen viljely, jossa yhdistyvät kalojen kasvatusta ja kasvien viljely vedessä.

Akvaponinen viljely on suljetun kierron järjestelmä, jossa kalaviljelmän ravinteikasta vettä käytetään kasvien kasvattamiseen. Vedessä olevat kalojen ulosteet muunnetaan mikrobiologisesti biosuodattimella, jonka jälkeen vedessä olevat ravinteet imeytyvät kasveihin ja sitten vesi palautetaan puhtaampana kaloille. Järjestelmässä on täysin suljettu veden kierto, joka mahdollistaa ravinteiden uudelleenkäytön ilman ravinteiden päästöjä ympäristöön. Koska akvaponisessa järjestelmässä kalat, kasvit ja mikro-organismit toimivat läheisessä symbioottisessa suhteessa, antibiootteja tai torjunta-aineita ei käytetä, mikä puolestaan tuottaa puhtaampia ja terveellisempiä ruokatuotteita.

TransFarm hanke demonstroi akvaponista järjestelmää niin Ruotsissa, Virossa kuin Latviassakin, sekä testaa vaihtoehtoisia vesilähteitä, kuten sadevettä ja käsiteltyä harmaavettä: Näistä maista tulevat hankekumppanit rakentavat demonstraatiotiloja erilaisilla ominaisuuksilla ja tavoitteilla. Kokemusten vaihto eri demoista edistää tiedon yhteisluomista ja tilat tarjoavat mahdollisuuden innostaa ja kouluttaa tulevia akvaponisia vesiviljelijöitä. Demojen rakentamisesta ja seurannasta kerätty tieto tuottaa myös koulutusmateriaalia kaikille akvaponisesta järjestelmästä kiinnostuneille toimijoille.

Hankkeessa tutkitaan myös potentiaalisia liiketoimintamalleja ja tiedotetaan kuluttajille akvaponisesti tuotettujen tuotteiden laadusta sekä koulutetaan yrittäjiä, jotka haluavat perustaa akvaponisen järjestelmän. Näiden lisäksi myös virkamiehiä ja poliittisia päättäjiä tiedotetaan suljetun kierron maaperättömän viljelyn vähäisistä ympäristövaikutuksista.

TransFarm projektia koordinoi Turun yliopiston kauppakorkeakoulun Tulevaisuuden tutkimuksen keskus (Turku). Projektin yhteistyökumppaneita ovat Viron Biotieteiden yliopisto (Tartu, Viro), Latvian yliopisto (Riika, Latvia), Campus Roslagen ja Coompanion Roslagen & Norrort (Norrköping, Ruotsi). TransFarm projektin kesto on kolme vuotta (2023-2026) ja sitä rahoittaa EU:n Interreg Central Baltic -ohjelma. Projektin kokonaisbudjetti on 1,87 miljoonaa euroa, josta EU-rahoitus kattaa 1,5 miljoonaa euroa.

1.2. Veden laatu akvaponisessa viljelyssä

Akvaponinen viljely on kestävä ja luova lähestymistapa ruoantuotantoon, jossa kalanviljely ja kasvien vesiviljely yhdistyvät molempia osapuolia hyödyttävän ekosysteemin luomiseksi. Vesi on olennainen komponentti tämän monimutkaisen järjestelmän ytimessä. Veden laadulla on siten ratkaiseva rooli akvaponisen viljelyn dynaamisessa maailmassa, jossa kalat ja kasvit ovat vuorovaikutuksessa suljetun kierron järjestelmässä. Tämän merkitys voidaan nähdä monimutkaisessa tasapainossa, jota tarvitaan ihanteellisten olosuhteiden ylläpitämiseksi ravinteiden kiertokulkua, kasvien kasvua ja kalojen terveyttä varten. Siksi veden laadun mittareiden perusteellinen ymmärtäminen on ratkaisevan tärkeää akvaponisen viljelyn harrastajille, tutkijoille ja ammattilaisille.

Olennessa veden laadun mittari on veden pH-taso, joka ilmaisee veden happamuuden tai emäksisyysasteen. Tarkan tasapainon varmistaminen pH-arvon 6,5 ja 7,5 välillä on välttämätöntä ravinteiden saatavuuden säilyttämiseksi ja mikrobitoiminnan edistämiseksi, jotka ovat tärkeitä sekä kalojen että kasvien terveyden ja elinvoiman kannalta. Lämpötila on myös merkittävä tekijä, joka vaikuttaa kalojen aineenvaihduntaan, ravinnon imeytymiseen ja ympäristön yleiseen hyvinvointiin. Johdonmukainen seuranta on ratkaisevan tärkeää mahdollisten äärimmäisyyksien välttämiseksi, jotka voivat aiheuttaa tukalaa oloa tai jopa vahinkoa kala- ja kasvielementeille. Ammoniakki- ja nitriittitasot ovat tärkeitä typen kierron merkkiaineita. On tärkeää seurata ja ylläpitää näiden yhdisteiden alhaisia pitoisuuksia, jotta vältetään kalojen vaurioitumiselta ja säilytetään tasapainoinen järjestelmä.

Nitraatit, jotka ovat typen kierron viimeinen tulos, toimivat kasvien perusravinteiden lähteenä. Optimaalisen tasapainon ylläpitäminen on ratkaisevan tärkeää kukoistavan akvaponisen ekosysteemin takaamiseksi vaarantamatta kummankaan elementin hyvinvointia. Tarvitaan myös riittävä määrä liuenneutta happea, jotta sekä kalojen että kasvien yleinen terveys ja elinvoima turvataan. Liian alhainen happipitoisuus voi johtaa stressiin, kasvun hidastumiseen ja jopa kalojen kuolemaan, mikä korostaa asianmukaisten ilmastus- ja hapetusmenetelmien merkitystä. Johtavuutta ja liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärää käytetään määrittämään vedessä olevien liuenneiden ionien ja mineraalien määrää. Jatkuva valvonta auttaa ylläpitämään optimaalista ravinnetasapainoa ja siten välttämään epätasapainoa tai haitallisia tasoja akvaponisessa järjestelmässä.

Akvaponisissa järjestelmissä olevilla bakteereilla on elintärkeä tehtävä typen kierrossa, koska ne muuttavat kalojen ulosteet tärkeiksi ravintoaineiksi (nitraateiksi), jotka ovat välttämättömiä kasvien kasvuun. Nämä edulliset bakteerit toimivat biologisina suodattimina parantaen veden laatua hajottamalla haitallisia yhdisteitä ja ehkäisemällä sairauksia. Lisäksi bakteereilla on rooli pH-tason ylläpitäjänä, järjestelmän stabiloijana ympäristön muutoksia vastaan ja ammoniakin poistajana, mikä edistää sekä kalojen että kasvien yleistä hyvinvointia ja sopeutumiskykyä. Vahvan bakteeripopulaation olemassaolo on välttämätöntä ravinteiden kiertoprosessille, sairauksien välttämiseksi ja akvaponisen vakauden ylläpitämiseksi. Tämä korostaa niiden keskeistä tehtävää tasapainoisen ja tehokkaan ympäristön tukemisessa.

Akvaponisen tasapainon saavuttaminen perustuu veden laatuparametrien huolelliseen valvontaan. Varmistamalla järjestelmän terveyden ja tuottavuuden edistämme myös laajempia kestävyys- ja vastuullisen elintarviketuotannon tavoitteita. Jotta akvaponisen järjestelmän resilienssi ja tehokkuus

ominaisuudet voitaisiin täysin hyödyntää elintarvikkeiden tuotantotekniikkana, on ratkaisevan tärkeää, että viljelijällä on perusteellinen käsitys veden laatutekijöistä.

2. Veden laadun parametrit

2.1. Lämpötila

Veden lämpötila vaikuttaa kaikkiin akvaponisen järjestelmän komponentteihin ja ominaisuuksiin. Tavallinen kompromissialue veden lämpötilalle on 18-30 Celsius-astetta. Lämpötila vaikuttaa sekä ammoniakkin myrkyllisyyteen (ionisaatio) että liuenneen hapen (DO) tasoihin; lämpötilan nousu johtaa ionisoimattoman (myrkyllisen) ammoniakkin lisääntymiseen ja happitasojen laskuun.

Veden lämpötila vaikuttaa akvaponiikan kasveihin enemmän kuin ilman lämpötila. Useimmille vihanneksille sopiva lämpötila-alue on 18–30 °C. Jotkut kasvikset sopivat kuitenkin paljon paremmin kasvatukseen tietyissä ympäristöissä. Kurkut, salaatti ja mangoldi ovat esimerkiksi vihanneksia, jotka viihtyvät 8–20 °C:n lämpötiloissa. Toisaalta lämpimän sään yrtit ja vihannekset, kuten basilika, kaali ja okra, vaativat 17-30 °C lämpötilan. Yli 26 °C:n lämpötila saa lehtevät vihannekset ”vauhkoontumaan”, jolloin syntyy siemeniä ja kukkia, jotka tekevät vihannekset kitkeriksi ja myyntikelvottomiksi. Kasvit myös kokevat lämpöstressiä veden lämpötilan nousun vuoksi. Kuumalle vedelle altistuessaan kasvi lopulta sulkee juurensa ja siirtyy selviytymistilaan. Kuituminen, alhaiset liuenneen hapen pitoisuudet, kukinnan putoaminen ja hedelmien tulon lakkaaminen, pehmenneet ruskeat ja limaiset juuret, salaattikasvien tiivistyminen (varren piteneminen ja siementyminen) sekä kalsiumin imeytymiskyvyn rajoitukset ovat joitain merkkejä lämpöstressistä. Kosteus ja ilman lämpötila vaikuttavat myös kasvien kokemaan lämpöstressiin.

Koska kalat ovat ”kylmäverisiä”, ne eivät pysty sopeutumaan monenlaisiin veden lämpötiloihin. Kalat voidaan myös jakaa kolmeen eri luokkaan: kylmän veden, lauhkean veden ja lämpimän veden kaloihin. Trooppiset kalat, kuten tilapia, tavallinen karppi, viihtyvät usein vedessä, jonka lämpötila on 22–32 °C. Silti kylmän veden lajit, kuten taimen, suosivat 10–18 °C:n lämpötiloja. Esimerkiksi tavallinen karppi sietää enemmän lämpötilaa 5-30°C kuin muut lauhkean veden lajit (taulukko 1). Kullekin lajille tarvitaan optimaalinen lämpötila nopean kasvun ja tehokkaan rehun muuntamisen varmistamiseksi sekä tautien riskien minimoimiseksi. Korkeampi veden lämpötila saattaa myös lisätä hengitystiheyttä ja aineenvaihduntaa. Korkeampi veden lämpötila tarkoittaa myös sitä, että vedessä on vähemmän liuennutta happea (DO) saatavilla, mutta samalla korkeammassa lämpötilassa kalojen liuenneen hapen tarve myös kasvaa. Olennainen osa akvaponisen järjestelmän operointia on siis veden lämpötilan sovittaminen valitun kalalajin mukaan ja lämpötilavaihtelun pitäminen kahden celsiusasteen sisällä (eli tarkka lämpötilan säätö ja seuranta). Tällöin kaloilla aineenvaihdunta ja rehun muuntokyky on optimaalinen, kun veden lämpötila on tarkka ja pysyy lähellä ihanteellista keskiarvoa, on niillä silloin myös parempi kasvunopeus ja vakaat, ennustettavat jätekuormituspäästöt, jotka taas tukevat kasvinviljelyä.

Taulukko 1. Eliötyypit ja niiden optimaaliset lämpötila-alueet akvaponisessa viljelyjärjestelmässä.

Eliötyyppi	Optimaalinen lämpötila, °C	Esimerkki
Lämpimän veden kalat	22-32	Tilapia, karppi, ahven, eels, craykala, sturgeons
Kylmän veden kalat	10-18	lohikalat
Lämpimän ilman kasvit	23-28	Kaalit, basilika
Kylmän ilman kasvit	17-25	Salaatit
<i>Nitriittibakteerit spp.</i>	25-29	
<i>Nitrosomonas spp.</i>	21-29	
Limittäinen lämpötila, °C	18-30	Valtaosa kasveista ja kaloista

Bakteereille ja koko akvaponiselle järjestelmälle veden oikea lämpötila on myös välttämättömyys, ihanteellinen lämpötila-alue bakteerien kasvulle ja tuottavuudelle on 17–34°C astetta. Annettu lämpötila-alue osoittaa optimaaliset olosuhteet nitrifioivien bakteerien toiminnalle, mutta jos lämpötila laskee alemmas, nitrifikaation tehokkuus laskee, mutta ei pysähdy – bakteerit muuttuvat epäaktiivisiksi vasta alle neljän asteen lämpötilassa. Alle 0 °C ja yli 49 °C lämpötilojen tiedetään tuhoavan nitrifioivia bakteereja. Talviaikana järjestelmän hallintaan vaikuttaa merkittävästi alhainen lämpötila, jos järjestelmä on alttiina ulkoisille sääolosuhteille.

Kunkin eliöryhmän – kalojen, kasvien, bakteerien – optimaaliset kasvu- ja eloonjäämislämpötilat huomioon ottaen tulee akvaponiseen järjestelmään valita lajit, joilla on yhteneväiset olosuhdevaatimukset. Jos käytetään akvaponista järjestelmää, joka on alttiimpi ulkoisten sääolosuhteiden muutoksille, on kasvi- ja kalalajien valinta harkittava huolellisesti, joten on myös suositeltavaa käyttää akvaponista järjestelmää sisätiloissa, joissa ilmasto voidaan asettaa vakioarvoihin koko vuoden ajaksi.

Case study!

Veden lämpötilan vaikutus kasvukykyyn, ravinteisiin ja mikrobidynamiikkaan akvaponisissa järjestelmissä

Tässä tutkimuksessa vertailtiin alhaisen veden lämpötilan (11 °C) ja korkeamman veden lämpötilan (21°C) vaikutuksia ravinnevirtaukseen, kasvien ja kalojen kasvuun sekä mikrobidynamiikkaan taimenia ja makeaa basilikaa tuottavassa akvaponisessa järjestelmässä. Löydökset osoittivat, että akvaponisissa järjestelmissä veden lämpötila vaikuttaa merkittävästi kalojen ja kasvien kasvuun. Tutkittavassa akvaponisessa järjestelmässä havaittiin, että 21 °C:n lämpöisen veden käyttö oli sopivampaa viljelyyn, koska kalat ja kasvit kasvoivat nopeammin tässä lämpötilassa. Viileämpi 11°C vesi vaikutti negatiivisesti järjestelmän mikrobiologisiin ominaisuuksiin, biosuodattimen tehokkuuteen ja ravinteiden imeytymiseen. Samalla myös osoitettiin, että basilika on sellainen puutarhaviljelykasvi, jota voidaan helposti kasvattaa akvaponisessa järjestelmässä. Tulokset osoittivat myös, että alhaisissa veden lämpötiloissa kasvien vaatimukset on täytettävä paremmin valittaessa kalanrehua ja optimoitaessa ravinnetasoa. Tässä tapauksessa kasvi-kalasuhde oli 15:8, mutta lisätutkimuksia tarvitaan muiden ravinteisiin liittyvien suhteiden selvittämiseksi. Toinen ratkaiseva tekijä on tuotettujen kalojen ja kasvien luonnollinen koko.

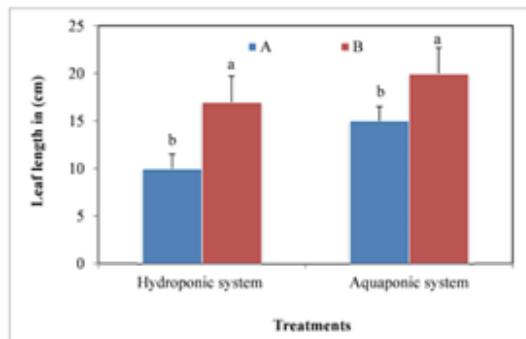


FIGURE 1. Effect of water temperature A = 11°C or B = 21°C in the hydroponics (control) system and the aquaponics system on leaf length (in cm) of sweet basil. Treatment means were separated using Tukey's HSD, with $P < 0.05$ considered significant. Each bar represents mean $\pm$ standard error. $n =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

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

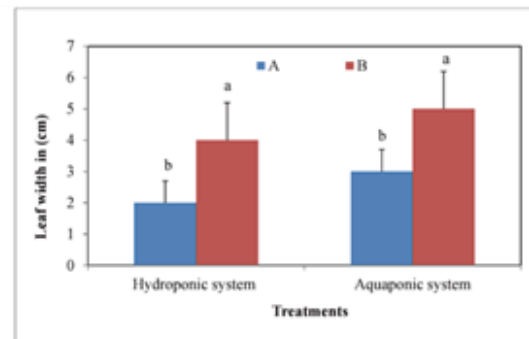


FIGURE 2. Effect of water temperature A = 11°C or B = 21°C in the hydroponics (control) system and the aquaponics system on leaf width (in cm) of sweet basil. Treatment means were separated using Tukey's HSD, with $P < 0.05$ considered significant. Each bar represents mean $\pm$ standard error. $n =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

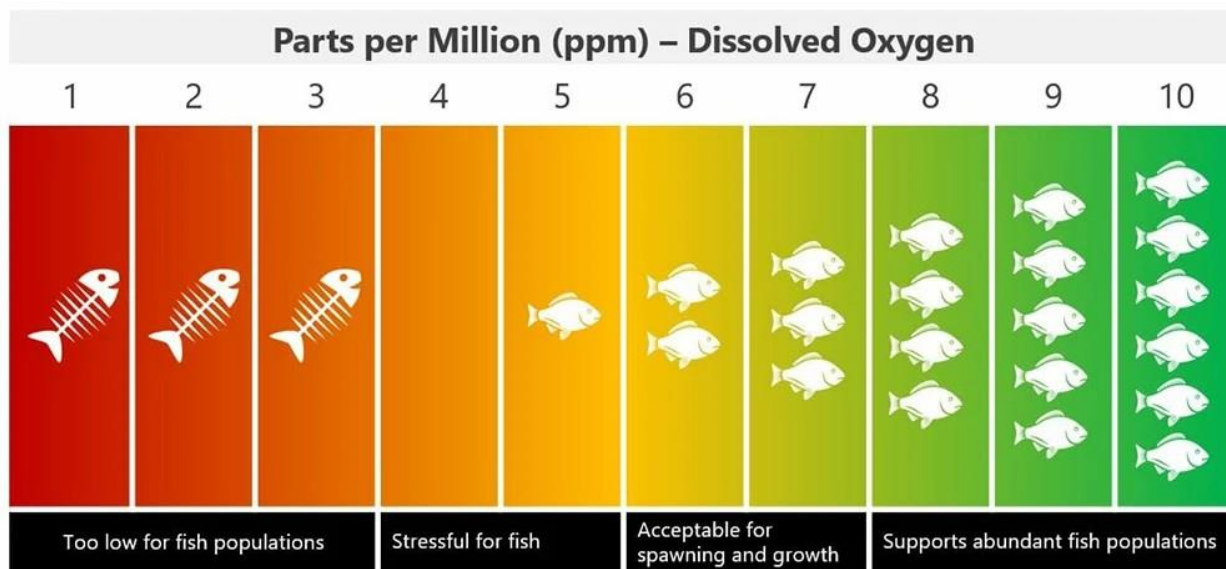
2.2. Happipitoisuus

Määritelmä

Veteen liuenut happi viittaa siihen hapen määrään, joka on vedessä, tyypillisesti kussakin ympäristön lämpötiloissa. Se on ratkaiseva tekijä vesieliöiden selviytymiselle, sillä useimmat vesieliöt, kuten kalat, bakteerit ja jotkut selkärangattomat, tarvitsevat vedestä happea hengittääkseen ja suorittaakseen aineenvaihdunnan prosessejaan.

Veteen liuenneen hapen määrä mitataan yleensä milligrammoina litrassa (mg/L), prosentteina kyllästystasosta tai miljoonasosina (ppm). Kyllästymistaso on suurin määrä happea, jonka vesi voi pitää tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Se vaihtelee lämpötilan ja suolaisuuden mukaan, koska kylmempään veteen mahtuu enemmän liuenutta happea kuin lämpimämpään veteen.

Yksi kalojen kasvun kannalta tärkeimmistä tekijöistä on liuenut happi (dissolved oxygen, DO), joka on myös välttämätöntä niille hyvillä nitrifioiville bakteereille, jotka muuttavat kalojen ulosteiden ravinteet sopiviksi ravintoaineiksi, joita kasvit sitten voivat käyttää. Terveiden ja kasvun ylläpitämiseksi lämpimän veden kalat tarvitsevat yli viisi miljoonasosaa (ppm) liuenutta happea. Vaihtoehtoisesti voidaan mittana käyttää milligrammaa litraa kohti (mg/l). Kylmän veden kalat puolestaan tarvitsevat yli 6,5 ppm liuenutta happea, vaikka Tilapia ja jotkin karppilajit saattavatkin sietää alentuneita liuenneen hapen tasoja, sillä on kuitenkin vaikutusta kasvunopeuksiin (kuva 1). Kalan hapenkulutus määräytyy sen lajin, koon, aktiivisuuden (ruokinta ja lisääntyminen) sekä veden lämpötilan mukaan. Esimerkiksi isommat kalat ottavat tyypillisesti enemmän happea kuin pienet kalat. Pienemmät kalat taas käyttävät kuitenkin enemmän happea yhtä painoyksikköään kohden.



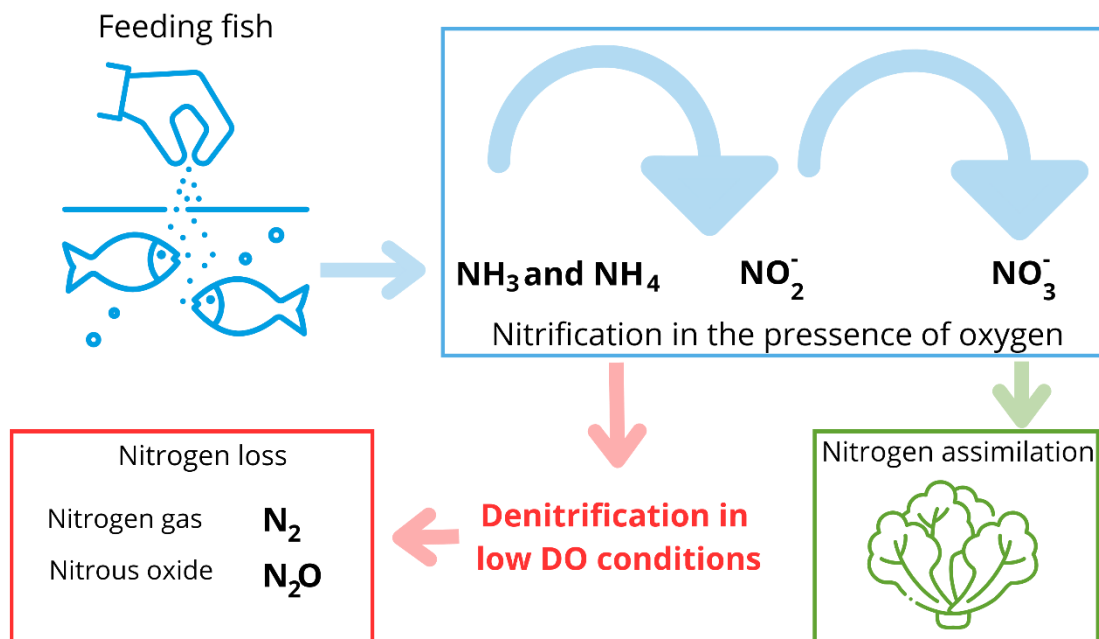
Kuvio 1. Dissolved oxygen (DO) levels needed to sustain healthy fish population in aquaponic systems. Values represented in ppm (mg DO/L water)¹.

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

Akvaponisissa viljelyjärjestelmissä on suositeltavaa pitää liuenneen hapen taso 5-6 ppm:ssä tai sen yläpuolella. Uudessa järjestelmässä happitasoja tulee tarkkailla usein, mutta protokollien luomisen jälkeen (esim. asianmukaiset kala- ja ruokintanopeudet, riittävä ilmastus) liuenneen hapen mittauksia ei tarvita niin usein. Kotiviljelijöiden akvaponisten järjestelmien alhaisilla kalamäärillä ei tyypillisesti ole ongelmaa alhaisen liuenneen hapen tasoissa. Sen sijaan suuren varastointiasteen kaupallisilla toimijoilla on todennäköisemmin tämä ongelma. Jos liuenneen hapen tasot ovat liian alhaiset, lisää ilmastusta järjestelmässäsi lisäämällä joko ilmakiviä eli hapettimia tai käyttämällä suurempaa ilmapumppua. Hapetta ei ole mahdollista lisätä liikaa, koska kaikki ylimääräinen happi haihtuu ilmakehään veden kyllästyessä. Veden happiliukoisuus laskee lämpötilan noustessa, mikä osoittaa tasaisen veden lämpötilan tarpeen järjestelmän sisällä.

Yksi poikkeus liuenneen hapen tasoista ja sen vaikutus vesikemiaan voi esiintyä kelluvilla materiaaleilla päällystetyissä DWC-peteissä, mikä rajoittaa CO₂-liukoisuutta veteen, mikä yhdessä runsaan O₂:n kanssa voi johtaa veden pH:n lievään nousuun.

Diffuusio-, ilmastus-, fotosynteesi-, hengitys- ja hajoamisprosessit vaikuttavat kaikki liuenneen hapen määriin. Siten vaihtelut suolapitoisuudessa, lämpötilassa ja paineessa johtavat tyypillisesti vaihteluihin myös veteen liuenneen hapen pitoisuudessa.



Kuvio 2. Mikrobinen aktiivisuus happirikkaassa ja happiköyhässä olosuhteissa.

Liennut happi on myös tärkeä nitrifikaatioprosessiin vaikuttava tekijä akvaponisessa viljelyjärjestelmässä. Biosuodatin, jossa nitrifikaatio on aktiivisin, tapahtuu intensiivistä ilmastusta, joka tuo happea veteen ja sitten nitrifioivat bakteerit kuluttavat liuenneen hapen hapettamaa ammoniakkia. Ilman jatkuvaa hapen syöttöä nitrifikaatioreaktio olennaisesti pysähtyy. Optimaaliset DO-tasot nitrifikaatiolle ovat 4-8 mg/l (4-8 ppm). Pienemmillä happitasoilla (alle 2 ppm) nitrifikaatio vähenee merkittävästi. Alhainen liuenneen hapen pitoisuus voi luoda suotuisat olosuhteet toiselle bakteerityypille – denitrifikaatiobakteereille (kuva 2). Tämä bakteeri voi muuttaa arvokkaan kasviravinnetypen takaisin mahdollisesti haitalliseksi ammoniakiksi ja edelleen typpikaasuksi tai typpioksiduuliksi, jotka ovat kaasuja. Denitrifikaatio aiheuttaa olennaisesti typen hävikkiä järjestelmässä, joten se voi mahdollisesti pysäyttää kasvien kasvun (Kuva 2).

Veden kanssa suorassa kosketuksessa olevat kasvien juuret vaativat myös minimaalisen liuenneen hapen tason. Kasvit ovat yleensä kestävämpiä vähähappisissa olosuhteissa kuin kalat tai akvaponisen järjestelmän toimintaan osallistuvat bakteerit, joten on tärkeämpää täyttää mikrobiyhteisön ja ennen kaikkea kalojen vaatimukset. Akvaponisissa viljelyjärjestelmissä kasvien liuenneen hapen tarve on usein sama kuin perinteisissä vesiviljelyjärjestelmissä. Sekä kalat että kasvit tukeutuvat liuenneeseen happeen menestyäkseen akvaponisessa viljelyssä. Ihanteellinen liennut happipitoisuus kasveille akvaponisessa viljelyssä on tyypillisesti 5-8 milligrammaa litrassa (mg/l), mutta kasvit sietävät myös matalampia tasoja.

Toinen akvaponiseen viljelyjärjestelmään liukeneva kaasu on hiilidioksidi (CO_2). Kalojen hengitys johtaa hiilidioksidin (CO_2) vapautumiseen veteen. Veden kohonneet liuenneen hiilidioksidin määrät vaikeuttavat kalojen hengitystä, sillä kalan verenkierrassa kohonneet hiilidioksidipitoisuudet johtavat veren pH:n laskuun, mikä alentaa edelleen hemoglobiinin kykyä sitouttaa happea. Vedessä hiilidioksidi alentaa veden pH:ta hajoamalla jatkuvasti hiilihapoksi (H_2CO_3) joutuessaan kosketuksiin veden kanssa. Kalasäiliössä olevien kalojen määrän lisääminen johtaa suurempaan hiilidioksidikaasun vapautumiseen, mikä johtaa yleisen pH-tason laskuun. Tämä ilmiö voimistuu, kun kalat osoittavat korkeampaa aktiivisuutta, kuten kohonneiden lämpötilojen aikana voi käydä. Samoin kuin hapen, myös hiilidioksidin liukoisuus laskee veden lämpötilan noustessa. Kaikki ilmakehään kytketyt kaasunsiirto- tai ilmastuslaitteet johtavat väistämättä hiilidioksidikaasun poistoon. Suuriin tehokkaisiin akvaponisiin viljelyjärjestelmiin voidaan lisätä lisävarusteena kaasunpoistoyksikkö – tämä auttaa liuenneen hiilidioksidin vapauttamisessa, mutta normaalisti riittävä hiilidioksidikaasun poisto saadaan aikaiseksi biosuodattimella tai valuttamalla vettä järjestelmän eri osien välillä. Tämä osoittaa jälleen, että kalasäiliön, biosuodattimen ja yleensä koko järjestelmän asianmukainen ilmastus on välttämätöntä paitsi riittävien liuenneen hapen tasojen varmistamiseksi, mutta myös CO_2 -päästöjen varmistamiseksi.

2.3. Veden happamuus

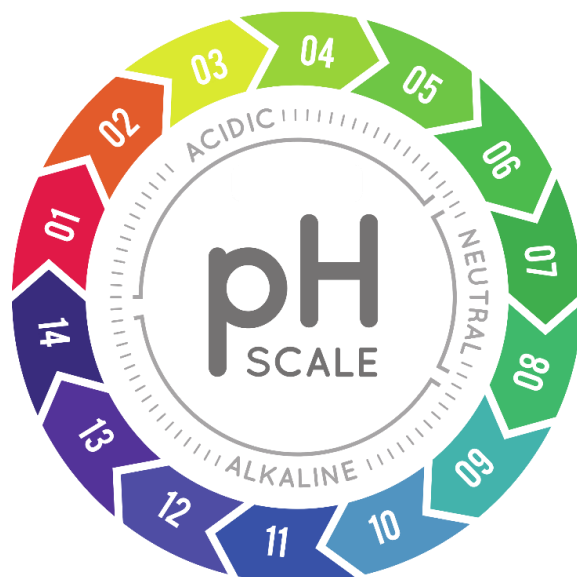
Määritelmä

pH on vesiliuoksen happamuuden tai emäksisyyden mitta. Termin "pH" esitti ensimmäisen kerran tanskalainen biokemisti Søren Peter Lauritz Sørensen vuonna 1909. pH-asteikko on logaritminen asteikko, joka vaihtelee välillä 0-14, ja 7:ää pidetään neutraalina. Liuosta, jonka pH on alle 7, pidetään happamana, kun taas liuosta, jonka pH on yli 7, pidetään emäksisenä. Liuoksen pH-arvo riippuu liuoksessa olevien vetyionien (H^+) pitoisuudesta. Matala pH tarkoittaa, että H^+ -ioneja on korkea, kun taas korkea pH tarkoittaa, että H^+ -ionien pitoisuus on alhainen. Liuoksen pH voidaan mitata pH-mittarilla tai pH-paperilla. pH:lla on tärkeä rooli monissa biologisissa ja kemiallisissa prosesseissa, ja oikean pH-tasapainon ylläpitäminen akvaponisessa järjestelmässä on ratkaisevan tärkeää kasvien ja kalojen oikealle kasvu.

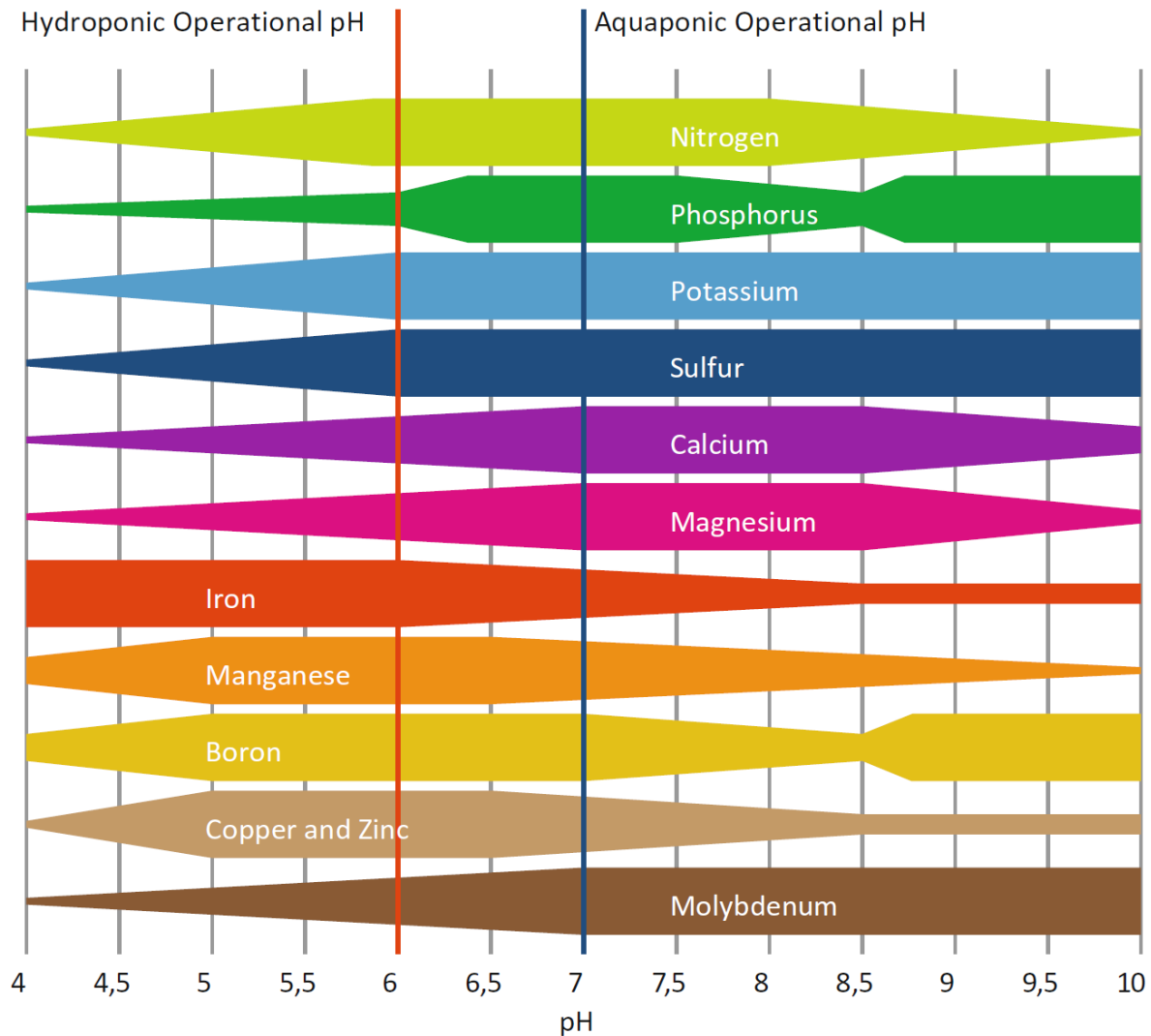
Hydroponisessa viljelyssä veden pH vaikuttaa olennaisesti kasvien kykyyn vastaanottaa ioneja ravinteita (kuva 3). Viljelysysteemeissä olevan veden pH:n perusteella tutkimukset viittaavat siihen, että tiettyjä ravinteita on saatavilla tietyssä pH-ikkunassa. Tästä syystä veden pH on säädettävä arvoon, joka maksimoi ionisen ravinneseoksen saatavuuden kasveille (kuva 4). Tämä on kuitenkin aina kompromissi, koska erilaiset ioniset ravintomuodot ovat helpommin saatavilla vaihtelevilla pH-arvoilla. Ravinteiden saatavuuden maksimoimiseksi hydroponista viljelyä toteuttava teollisuus säätelee pH:ta yleensä välillä 4,5 ja 6,0 (hapan ympäristö), erityisesti steriloiduissa hydroponisissa ja substraattiviljelyjärjestelmissä.

Toisaalta kierto-vesiviljelyjärjestelmissä pH asetetaan kalan kasvuun ja hyvinvoinnille edullisemmalle tasolle. Kalan kasvuun pH:n likimääräinen asetusarvo on 7,5, mikä on sattumalta myös optimaalinen pH-taso mikrobien kasvuun, erityisesti nitrifioiville bakteereille, jotka muuttavat kalajätteen tyypin muotoon, joka on vähemmän myrkyllistä ja kasveille helpommin saatavilla.

Koska akvaponisessa viljelyssä käytettävien komponenttien pH-tarpeet vaihtelevat, aiheuttaa pH siis haasteita viljelyjärjestelmälle. Kierto-vesiviljelyjärjestelmät (RAS) makean veden kalalajeille vaativat normaalisti pH-arvot välillä 7,0 ja 8,0, kun taas hydroponisesti viljeltyt kasvit vaativat tyypillisesti pH-asetukset välillä 4,5 ja 6,0. Mikro-organismit, jotka muuttavat kalajätteestä mahdollisesti vaarallisia yhdisteitä vähemmän vaarallisiksi, on myös sopeutettava näihin ympäristöihin. Tästä johtuen mikä tahansa pH-asetusarvo on kompromissi mikrobien, kalan, ja kasvien tarpeiden välillä. Tämä tukee väitettä, jonka mukaan on mahdotonta saavuttaa ihanteellista pH:ta kaikille eläville olennoille akvaponisessa järjestelmässä, mikä voisi johtaa vähemmän kuin ihanteelliseen kasvien kasvuun. Ravinteiden saatavuus tulee siis huomioida säädettäessä systeemin pH:ta siten, ettei kasvien tai kalan kasvuun vaikuteta niin, että niiden optimaalinen kasvu hidastuisi.



Kuvio 3. pH-asteikon vaihteluväli happaman ja emäksisen välillä on pH 1-14.



Kuvio 4. Ravinteiden saatavuus perustuen veden pH-arvoon².

Hydroponisen ja vesiviljelyn pH:n optimaalinen yhdistelmä on mahdollisesti yksi suurimmista haasteista akvaponisissa viljelyjärjestelmissä. Kummankin systeemin pH-arvojen yhteensopimattomuus viittaa siihen, että erotetut akvaponiset viljelyjärjestelmät voisivat ehkä ratkaista tämän ongelman. Tällaisessa järjestelmässä vettä ei kierrätetä takaisin kala-altaaseen, vaan sitä käytetään ravinnepitoisena vetenä kasveille. Vaikka tällainen ratkaisu mahdollistaisi optimaalista alhaisempien pH-tasojen välttämisen, se ei ota huomioon erityistä mikrobiomia järjestelmässä. Vedenkierrätystä on välttämätön toimivan biosuodatinmikrobiomin luomiseksi, joka taas muuttaa kalojen jätökset tehokkaasti kasvien saatavilla oleviksi ravintoaineiksi. Lisäksi kasvit voivat tällaisissa järjestelmissä muodostaa ratkaisevan symbioosin bakteerien kanssa, mikä puolestaan voi auttaa imemään ravinteita kierrätetystä vedestä. Kasvien ravinteet akvaponisessa viljelyjärjestelmässä tuotetaan ensisijaisesti kaloilla sen sijaan, että ne tuotaisiin

² Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). Akvaponinen viljely food production systems: combined vesiviljely ja hydroponic production technologies for the future (p. 619). Springer Nature.

lannoitteina (kuten hydroponisessa viljelyjärjestelmässä), joten eri nitrifioivat bakteerilajit (*Nitrosomonas* spp. ja *Nitrobacter* spp.) ovat olennainen osa akvaponisen viljelyjärjestelmän toimintaa. Kasvien ja mikrobien monimutkainen symbioosi on avain onnistuneeseen viljelytoimintaan ja tämä yhdistelmä voi tarjota jopa paremmat kasvien kasvumahdollisuudet kuin vakiomallinen hydroponinen viljely.

Case study!

pH:n vaikutus kurkun kasvuun ja ravinteiden saatavuuteen suljetussa Akvaponisessa järjestelmässä minimaalisella kiintoaineiden poistolla

Termi "pH" viittaa liuoksen happamuuden tai emäksisyyden mittaan. Se on asteikko, jota käytetään määrittämään vesiliuoksen happamuus tai emäksisyys. Happamilla liuoksilla on alhaisempi pH, kun taas emäksisten liuosten pH on korkeampi. Huoneenlämmössä (25°C) puhdas vesi ei ole hapan eikä emäksinen, ja sen pH on 7. pH-asteikko on välillä 0-14. Tässä tutkimuksessa tutkitaan pH:n vaikutusta satoisuuteen ja ravitsemustilaan, kohteena on kasvihuonekurkku. Sitä kasvatetaan kierrätetyssä vesiviljelyssä ja akvaponisessa kasteluvedessä.

Artikkelissa tutkitaan pH:n vaikutusta ravinteiden saatavuuteen ja ottoon suljetun kierron akvaponisessa järjestelmässä. Tutkimus suoritettiin käyttämällä kurkkusadon kasteluun Tilapia-kalojen viljelysäiliöiden jätevetä neljällä eri pH-käsittelyllä: 5,0, 5,8, 6,5 ja 7,0. Tulokset osoittivat, että pH:lla ei ollut käytännön vaikutusta kasvunopeuteen, solmuvälin pituuteen tai satoon kahden kasvukauden aikana. pH vaikutti kuitenkin useiden ravinteiden saatavuuteen ja imeytymiseen. Kalsiumsulfaatin ja magnesiumoksidin liukoisuus, joita levitetään järjestelmään, lisääntyi pH:n alenemisen myötä, mikä johti kohonneeseen kalsiumin ja magnesiumin havaitsemiseen alhaisemmalla pH tasoilla. pH vaikutti myös fosforin assimilaatioon kasvukudokseen, jolloin fosforin otto lisääntyi korkealla pH:lla. Korkea pH (7,0) kuitenkin vähensi fosforin ottoa apoplastissa. Nitraattien assimilaatio lehtikudokseen vaihteli merkittävästi pH:n mukaan, osoittaen korkeinta assimilaatiota pH:ssa 5,8 ja alhaisinta pH:ssa 6,5. Kalsiumin otto osoitti korkeimpia tasoja pH:ssa 6,5. Vesiviljelyn jäteveden ravinnepitoisuuksia pidettiin alhaisina hydroponisiin liuoksiin verrattuna, mutta lehtikudosten alkuaineanalyysi oli suositeltujen rajojen sisällä.

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. Veden kovuus

Määritelmä

Veden kokonaiskovuus mittaa kahdenarvoisten kationien, pääasiassa kalsiumin ja magnesiumin, kokonaispitoisuutta vedessä. Se ilmaistaan tyypillisesti kalsiumkarbonaattien ekvivalenttisyksiköissä, ja sitä käytetään arvioimaan veden kykyä muodostaa kalkkikerrostumia ja sen vaikutusta erilaisiin teollisiin, kotitalous- ja ympäristöprosesseihin.

Tämä mittaus mittaa veden kokonaiskivennäispitoisuuden, mikä on tärkeä erilaisissa sovelluksissa, kuten vedenkäsittelyssä, maataloudessa ja arvioitaessa veden soveltuvuutta tiettyihin käyttötarkoituksiin. Veden kokonaiskovuus voidaan luokitella "pehmeään" (matala kovuus) tai "kovaan" (korkea kovuus) läsnä olevien kalsium- ja magnesiumionien pitoisuuden perusteella.

Veden kovuus voidaan ilmaista kahdella eri tavalla – ns. yleisenä kovuutena ja karbonaattikovuutena. Veden yleinen kovuus ei vaikuta merkittävästi akvaponiseen viljelyprosessiin, mutta sen sijaan karbonaattikovuudella on myös vaikutusta veden alkalisuuteen, mikä taas muuttaa veden pH:ta.

Veden yleinen kovuus kuvaa vedessä olevien kalsiumionien (Ca^{2+}) ja magnesiumionien (Mg^{2+}) pitoisuuksia sekä, vaikkakin vähemmän vaikuttavina, myös rautaionien (Fe^{+}) pitoisuutta. Näiden ionien konsentraatiota mitataan yleensä milligrammoina litrassa tai ppm:nä. Eri ionien pitoisuus vedessä riippuu suurelta osin veden lähteestä – kalkkikivipohjaisista pohjavesikerroksista peräisin olevissa vesissä on yleensä korkeampia kalsium- ja magnesium-pitoisuuksia. Sen vastakohtana esimerkiksi sadevedellä on taas matala veden kovuus. Molemmilla näillä elementeillä on suuri vaikutus kumpaankin akvaponisen viljelyjärjestelmän osaan. Ne toimivat sekä kasvien mikroravintoaineina että ne voivat parantaa suolan menetystä kaloissa.

Karbonaattikovuus on veteen liuenneiden karbonaattien (CO_3^{2-}) ja bikarbonaattien (HCO_3^-) pitoisuus mitattuna milligrammoina litrassa CaCO_3 :a. Nesteiden (veden) karbonaattien pH on emäksinen. Vedessä karbonaatit toimivat puskurina, joka ei salli jyrkkiä pH-muutoksia. Akvaponisessa viljelyjärjestelmässä syntyvä happo vapauttaa vetyioneja (H^+), jotka sitoutuvat vedessä olevaan karbonaattiin tai bikarbonaattiin, jolloin vältetään nopeat muutokset veden pH:ssa. Nitrifioivat bakteerit tuottavat typpihappoa (HNO_3), joka hajoaa vety- ja nitraatti-ioneiksi – kasvit imevät näitä nitraatteja, mutta eivät vetyioneja, mikä voi nopeasti laskea järjestelmän pH:ta. Jos akvaponisessa viljelyjärjestelmässä veden karbonaattikovuus on alhainen, vetyionit kasautuvat ja laskevat pH:ta (vesi muuttuu happamaksi) häiriten koko systeemin toimintaa. Siksi on tärkeää, että veden karbonaatti- ja bikarbonaattipitoisuudet ovat tasapainossa, koska se parantaa näiden ionien puskurointikykyä.

Akvaponisessa viljelyjärjestelmässä riittävä karbonaattien ja bikarbonaattien pitoisuus voidaan saavuttaa lisäämällä säännöllisesti puhdasta vettä halutusta vesilähteestä tai lisäämällä bikarbonaatteja. Lisätyn veden kovuuden oikea säätö voidaan saavuttaa käyttämällä suodatusjärjestelmiä, jotka valmistelevat tulevaa vettä kunkin yksittäisen järjestelmän tarpeiden mukaan. Kokonaiskovuuden (yleisen ja karbonaattikovuuden summa) optimaalinen arvo akvaponisessa viljelyssä on 60-140 mg/ltr (taulukko 2). Veden pehmennykseen on mahdollista lisätä kemikaaleja, mutta veden suolapitoisuuden lisäämistä tai muita mahdollisesti kalalle ja kasveille haitallisia yhdisteitä tulee välttää.

Taulukko 2. Veden kovuuden tasot kalsiumkarbonaatin pitoisuudella mitattuna.

Veden kovuuden taso	Pitoisuus (mg/ltr)
Pehmeä	0-60
Kohtalaisen kova	60-120
Kova	120-180
Erittäin kova	>180

2.5. Tärkein ravinne – typpi

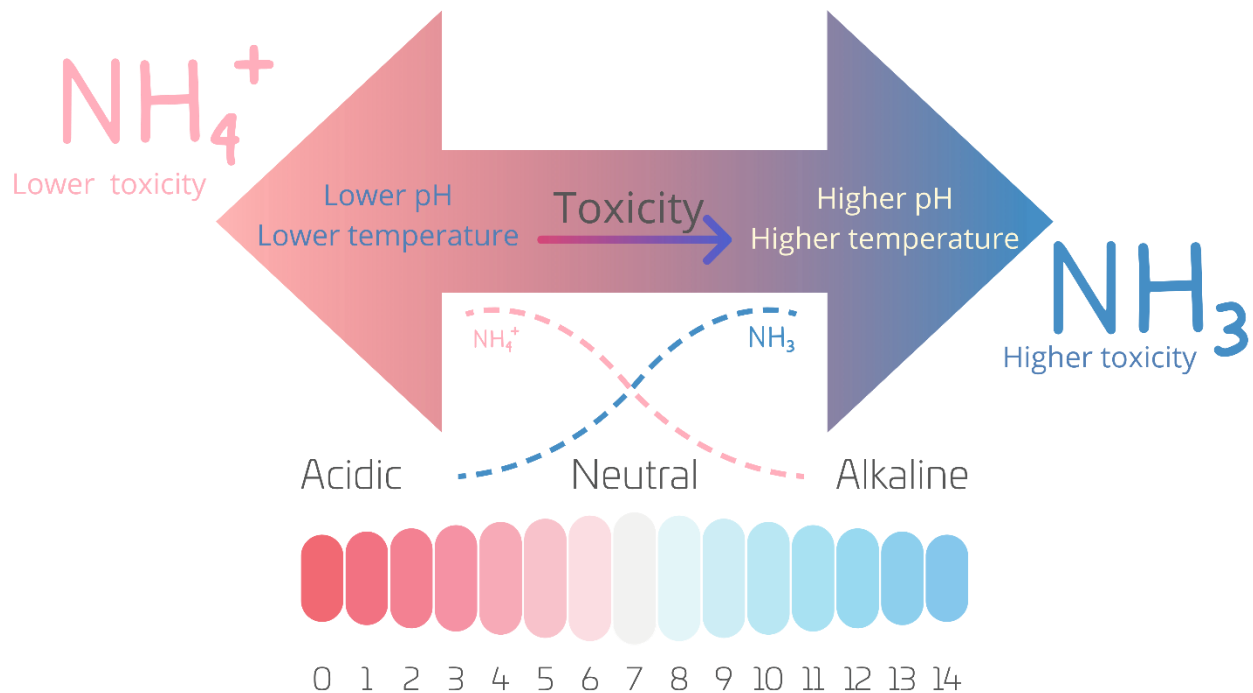
Määritelmä

Typpi on yksi tärkeimmistä ravintoaineista missä tahansa elävässä organismissa - se on olennainen osa sekä deoksiribonukleiinihappoa (DNA) että ribonukleiinihappoa (RNA). Se on myös osa aminohappoja, jotka ovat proteiinin rakennuspalikoita. Typpi on eri muodoissa läsnä myös akvaponisessa järjestelmässä, joko ammoniakkina (NH_3) tai ammoniumina (NH_4^+). Ajan myötä bakteerit alkavat vakiintua ja muuntaa ammoniakin/ammoniumin nitriitiksi (NO_2^-) ja sitten nitraatiksi (NO_3^-). Toimivan typen kierron luominen on akvaponisen järjestelmän tärkein prosessi.

Akvaponisen viljelyn yhteydessä ”ruokaketjun” eri osat eli ”alkutuottajat” ja ”kuluttajat” ovat tyypillisesti alueellisesti erotettuja kalanviljelyn ja kasvien vesiviljelyn eri osastoissa. Mikro-organismit välittävät synergistisiä vaikutuksia, jotka mahdollistavat ravinteiden tehokkaan käytön.

Typhen johtaminen akvaponiseen järjestelmään tapahtuu kalanrehun kautta, pääasiassa proteiinin muodossa. Kala käyttää tätä proteiinia, mistä sitten syntyy jätöksenä ammoniakkina (NH_3) ja ammoniumina (NH_4^+). Rehun proteiinipitoisuuden kasvu johtaa vastaavaan typpipitoisten jätteiden saatavuuden lisääntymiseen järjestelmässä. Kalat käyttävät noin 30 prosenttia proteiinista aineenvaihduntansa prosesseihin ja kasvuun, kun taas loput 70 prosenttia kala tuottaa jätteeksi. Kalat poistavat typpipitoisia kemikaaleja kidustensa sekä virtsansa ja ulosteensa kautta, pääasiassa ammoniakin muodossa, joka koostuu sekä ionisoimattomista ammoniakki- että ammoniumioneista.

Ammoniakkia esiintyy kahdessa erillisessä muodossa: ionisoitumaton (NH_3) ja ionisoitunut (NH_4^+), jälkimmäinen tunnetaan usein nimeltä ammoniumionina. Ionisoimattoman ammoniakin myrkyllisyys kaloille on hyvin dokumentoitu, kun taas ionisoidun ammoniakin katsotaan yleensä olevan ei-myrkyllinen kaloille, varsinkin kun sitä esiintyy erittäin korkeina pitoisuuksina. NH_3 :n ja NH_4^+ :n välinen tasapaino vesiliuoksissa on riippuvainen pH:sta ja lämpötilasta (kuva 5). Kun pH-taso on 7,0 tai pienempi (hapan), suurin osa ammoniakista, arviolta yli 95 prosenttia, on myrkyttömässä tilassa ammoniumioneina (NH_4^+). Myrkyttömän ja myrkyllisen ammoniakin suhteen odotetaan kasvavan merkittävästi pH-tason noustessa. NH_3 :n ja NH_4^+ :n suhteeseen vaikuttaa myös veden lämpötila, jolloin lämpimämmät vesiolosuhteet johtavat annetulla pH-tasolla korkeampaan NH_3 -pitoisuuteen, joka on vaarallisempi muoto verrattuna kylmempiin veden lämpötiloihin. Ammoniakin liukoisuus veteen on tällöin pienempi kuin NH_4^+ -ionien. Tämän seurauksena NH_3 muuttuu nopeasti kaasumaiseksi ja vapautuu myöhemmin vedestä, jolloin se on myös havaittavissa selkeästi erottuvana hajuna.



Kuvio 5. Ammoniakin (NH_3) ja ammoniumionin (NH_4^+) konsentraation suhde veden lämpötilaan ja pH:hon.

Vaikka ammoniumionien (NH_4^+) katsotaan yleisesti olevan vähän myrkyllisiä järjestelmässä oleville organismeille, on ammoniakki taas niille erittäin haitallista, joten se on poistettava järjestelmästä tai muutettava nitraatiksi. Nitrifikaatioprosessin välituote, nitriitti, on myös huomattavan myrkyllinen kaloille. On laskettu, että nitriitti on kaloille noin 100 kertaa haitallisempaa kuin nitraatti. Ammoniakki vaikuttaa kalojen keskushermostoon, kun taas nitriitti aiheuttaa hapen kiinnittymiseen liittyviä ongelmia. Tiettyjen kalalajien on todettu sietävän nitraattipitoisuuksia jopa 300 mg/l ja ylikin. Sitä vastoin ammoniakin ja nitriittien toleranssiarvot ovat paljon alhaisemmat, vastaavasti 0,07 mg/ltr ja 1 mg/ltr. Lisäksi kannattaa huomioida, että nitriittejä ja ammoniakkia ei pidetä kasveille edullisimpana typen lähteenä. Itse asiassa kasvit suosivat ammoniumioneja ja nitraatteja ensisijaisena typen lähteenä, koska nämä yhdisteet edistävät niiden kasvua ja kehitystä. Yli 250 mg/ltr kohonneiden nitraattipitoisuuksien on havaittu vaikuttavan haitallisesti kasvien kasvuun, mikä edistää liiallista kasvullista kehitystä ja mahdollisesti myös nitraattien vaarallista kertymistä kasvinlehtien sisälle. Tämä kertyminen aiheuttaa merkittävän riskin ihmisten terveydelle. Nitraattipitoisuus on suositeltavaa pitää välillä 5-150 mg/ltr ja kun pitoisuudet ylittävät tämän kynnsarvon, tulee järjestelmän vesi vaihtaa. Ammoniakin ja nitriittien läsnäolo viittaa siihen, että nitrifikaatioksi kutsuttu konversioprosessi ei tapahdu täysin biosuodattimessa. On ratkaisevan tärkeää puuttua tähän ongelmaan nopeasti lisäämällä nitrifioivien bakteerien toimintaa, mikä voidaan saavuttaa nopeasti ilmastusta lisäämällä.

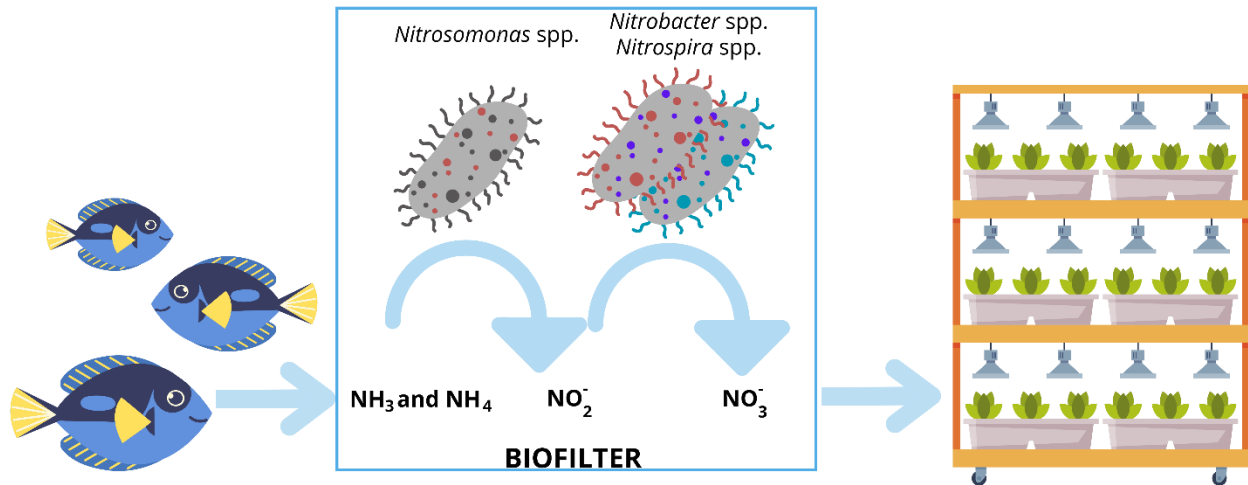
Määritelmä

Nitrifikaatio on typen kierron biologinen prosessi, joka on välttämätön typen pelkistyneen muodon (ammoniakki ja ammonium) muuntamiseksi hapettuneeksi (nitraatiksi), joka on vakaampi ja vähemmän myrkyllinen. Kasvit voivat siten käyttää nitraattia, mikä tarjoaa niille typen lähteen kasvua varten. Tämä prosessi auttaa myös poistamaan ylimääräistä ammoniakkivettä, mikä on tärkeää ympäristön ja veden laadun ylläpitämiseksi. Nitrifikaatioprosessin suorittavat tietyntyyppiset bakteerit, ensisijaisesti nitriittisomonat ja nitriittibakteerit, vaikka muutkin mikro-organismit voivat olla mukana.

Jos kalojen erittämän ammoniakin kertymistä ei estetä, se johtaisi kalojen lisääntyneeseen kuolleisuuteen. Akvaponisten viljelyjärjestelmien yhteydessä on huomionarvoista, että kalan tuottama ammoniakki eliminoituu tehokkaasti nitrifioivien bakteerien toiminnan kautta. Nämä bakteerit helpottavat kaksivaiheista prosessia, jota kutsutaan nitrifikaatioksi, jossa ammoniakki muunnetaan nitraattitypeksi. Aluksi ammoniakin ja ammoniumin muuttumista nitriitiksi (NO_2) helpottavat erilaiset bakteerilajit, kuten Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira, Nitrosolobus, ja Nitrosovibrio spp. Edellä mainittu menettely edellyttää ensinnäkin hapen läsnäoloa, mutta se johtaa myös emäksisyyden vähenemiseen sekä tuottaa happoa vetyionien muodossa (H^+), mikä taas johtaa pH-tason laskuun. Toisessa vaiheessa nitriitin (NO_2) muuttumista nitraatiksi (NO_3) helpottavat erilaiset bakteerilajit, kuten Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira, ja Nitrospina. On syytä huomata, että nitriitin tiedetään olevan erityisen vaarallinen kaloille. Nykyinen tietämys viittaa siihen, että Nitrospira on kattava nitrifioija, mikä tarkoittaa, että se on osallisena sekä nitriitin että nitraatin muodostumisessa. Tämän prosessin toinen vaihe edellyttää myös hapen läsnäoloa ja johtaa myös pH:n laskuun. Tästä johtuen on tärkeää seurata veden kovuutta, jotta voidaan ottaa huomioon nitrifikaation vaikutukset ja karbonaattien puskurointikyky. Tässä reaktiossa syntyvä nitraatti on myrkytöntä ja toimii kasviravinteiden lähteenä akvaponisen viljelyjärjestelmän hydroponisessa osassa (kuva 6).

Nitrifikaatio toimii parhaiten olosuhteissa, joille on ominaista korkea liuenneen hapen määrä ja alhainen orgaanisen aineksen pitoisuus, joka koostuu pääasiassa syömättä jääneestä kalajauhasta ja kertyneistä kiinteistä jätteistä. Jos happitaso on riittämätön, nitrifikaatioprosessi voi hidastua tai pysähtyä kokonaan, mikä johtaa ammoniakin kertymiseen tasolle, jotka aiheuttavat myrkyllisyysriskejä vesieläimille, erityisesti kaloille. Ammoniakin muuttuminen nitriitiksi on tyypillisesti se vaihe nitrifikaatioprosessissa, joka asettaa suurimman rajoitteen kokonaisnopeudelle. Tämän ilmiön voidaan katsoa johtuvan ammoniakkia hapettavien bakteerien, kuten Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosovibrio sp., ja nitriittiä hapettavien bakteerien, mukaan lukien Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, osoittamasta erillisestä kasvunopeudesta. Erilaiset kasvunopeudet johtavat osittaiseen nitrifikaatioon, erityisesti järjestelmän toiminnan alkuvaiheessa, mikä johtaa nitriitti-ionien (NO_2^-) kerääntymiseen, kunnes nitrifioivat mikro-organismit ovat täysin vakiintuneet, mikä voi kestää jopa neljä viikkoa. Bakteerit elävät enimmäkseen biofilmeissä,

jotka on kiinnitetty biosuodattimen väliaineisiin. Niitä voidaan kuitenkin havaita myös järjestelmän muissa osastoissa, kuten kelluvien kasvualustojen kammioissa tai kasvualustojen pedeissä.



Kuvio 6. Nitrifikaatio-prosessiin osallistuvat bakteerilajit biofiltterissä.

Ammoniakin ja nitriitin eliminointiprosessi akvaponisissa viljelyjärjestelmissä tunnetaan yleisesti biosuodatuksena (kuva 6). Biosuodatus toimii akvaponisen viljelyn puitteissa keskeisenä yhdyssiteenä kalatankin ja kasvien vesiviljelyelementin välillä. Nitrifioivien bakteerien aktiivisuus vähenee merkittävästi, kun ne altistetaan kohonneille ammoniakkipitoisuuksille. Ammoniakilla on antimikrobisia ominaisuuksia ja se voi estää nitrifioivien bakteerien toimintaa, kun sitä on yli 4 mg/l pitoisuuksina, mikä heikentää niiden tehoa. Tilanne voi mahdollisesti huonontua eksponentiaalisesti, kun ammoniakki peittyy riittämättömän kokoiseen biosuodattimeen, mikä johtaa bakteerien tuhoutumiseen ja ammoniakkitasojen nousuun. Vankan ja toimivan biosuodattimen puuttuminen kalatankeista johtaisi jätetuotteiden kertymiseen, riittämättömään kasviraavinteiden muodostumiseen ja järjestelmän suorituskyvyn heikkenemiseen.

Biosuodatin toimii elinympäristönä nitrifioivien mikro-organismien kolonisaatioille (kuva 7). Tietyissä tapauksissa erillisen biosuodattimen käyttö voi olla tarpeetonta lautta- ja keskitäytetyissä akvaponisissa viljelyjärjestelmissä. Tämä johtuu käytettävissä olevien pintojen, kuten lauttojen, väliaineiden, säiliön seinämien ja muiden bakteerien kolonisaatioon liittyvien pintojen riittävydestä. Siitä huolimatta on huomioitavaa, että suurin osa näistä järjestelmistä käyttää edelleen jonkinlaista biosuodatinta, joka helpottaa orgaanisten aineiden hajoamista ja lisää hivenravinteiden ja liuenneen hapen läsnäoloa vedessä. Ravinnekalvotekniikkaa käyttävien järjestelmien yhteydessä erillisen biosuodattimen sisällyttäminen järjestelmään on todella tärkeää. Liian suuri biosuodatin ei aiheuta haittaa akvaponiselle järjestelmälle,

vaikka suuren biosuodattimen käyttö voi aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia, on ylimääräinen biosuodatuskapasiteetti osoittautunut hyödylliseksi järjestelmävikojen estämisessä useissa tapauksissa.



Kuvio 7. Biofilteri akvaponisessa viljelyjärjestelmässä, Campus Roslagen, Norrtälje.

Olettaen, että tärkeimpiä veden laatutekijöitä, kuten pH, liuennut happi, lämpötila ja pinta-ala, noudatetaan, voidaan kohtuudella päätellä, että bakteereja on molempia läsnä ja ne toimivat tehokkaasti. Bakteerien tärkeä merkitys akvaponisessa viljelyssä edellyttää niiden yleisen terveydentilan säännöllistä seuranta ja arviointia. Bakteerit ovat mikroskooppisia organismeja, joita ei voida havaita paljaalla silmällä, joten visuaaliseen havaitsemiseen on käytettävä mikroskooppia. Bakteerien toiminnan seurantaan on olemassa myös suoraviivainen lähestymistapa, johon kuuluu ammoniakkin, nitriitin, ja nitraattien tasojen arviointi. Tämä menetelmä antaa arvokkaita näkemyksiä bakteeripesäkkeen yleisestä terveydestä. Hyvin toimivassa ja tasapainotetussa akvaponisessa järjestelmässä on välttämätöntä pitää ammoniakki- ja nitriittitasot välillä 0-1 mg/l. Jommankumman korkeampi esiintyminen viittaa mahdolliseen ongelmaan nitriifioivien bakteerien kanssa. Ilmiön esiintymiselle on olemassa kaksi yleistä selitystä. Aluksi voidaan havaita, että biosuodattimen kapasiteetti ei vastaa nykyistä kalojen tai käytetyn kalanrehun määriä. Tästä syystä syntyy epätasapaino, mikä johtuu kalojen liian suuresta määrästä. Ongelman ratkaisemiseksi joko kasvatetaan biosuodattimen kokoa tai vähennetään joko kalapopulaatiota tai vaihtoehtoisesti muutetaan kalojen ruokintaa. Joskus tämä ongelma voi myös syntyä, kun järjestelmän alkutasapaino häiriintyy kalojen kasvun ja niiden lisääntyneen ruokinnan vuoksi, joka sitten ylittää biosuodattimen kapasiteetin. Lisäksi vaikka järjestelmä sinällään on mitoitettu oikein, on myös todennäköistä, että bakteerit itse voivat kokea heikentynyttä toimintaa. Tämä havainto saattaa viitata mahdolliseen veden laatuun liittyvään ongelmaan.

Bakteeripesäkkeiden muodostumisilmiötä akvaponisen viljelyjärjestelmän alkuasennuksen aikana kutsutaan yleisesti biosuodattimen muodostukseksi tai sen kiertokuluksi. Kiertokulun luominen on perustavanlaatuinen menettely akvaponisen viljelyjärjestelmän perustamisessa. Syklin loppuun saattaminen riippuu vahvan nitrifioivien bakteerien yhteisön muodostumisesta. Ilman tätä ratkaisevaa askelta kasvien kasvusta tulee mahdotonta, ja ympäristö voi haitata myös kalojen hyvinvointia. On suositeltavaa käynnistää järjestelmän kiertoprosessi ilman kaloja, kunnes biosuodattimeen on muodostunut vakaa mikrobiomi. Kaupalliset mikrobiyhteisön alkuaineyhdistelmät ovat helposti saatavilla nitrifioivien bakteeriyhteisöjen syntymisen edistämiseksi. Tämä puolestaan johtaa siihen, että näiden bakteerien kasvuun tarvittava aika lyhenee, jotta saavutetaan riittävä bakteeripopulaatio sekä järjestelmässä että biosuodattimen sisällä.

Denitrifikaatiolla tarkoitetaan prosessia, jossa nitraatti (NO_3^-) muuttuu nitriitiksi (NO_2^-), typpioksidiksi (NO), typpioksidiksi (N_2O) ja lopulta typpikaasuksi (N_2) ympäristöissä, joille on ominaista liuenneen hapen puuttuminen tai erittäin alhainen määrä (kuva 2), joten se on luonteeltaan hapeton ja anaerobinen. Denitrifikaatio on biologinen prosessi, jonka suorittavat denitrifioijat, jotka kattavat erilliset taksonomiset ryhmät "arkit" ja fakultatiivisia heterotrofisia bakteereja. Koska typpioksidi on voimakkaampi kasvihuonekaasuna verrattuna hiilidioksidiin, on välttämätöntä minimoida sen muodostuminen, jotta voidaan optimoida ne nopeudet, joilla typpi assimiloituu kasvibiomassaksi.

3. Mikro-organismit akvaponisessa viljelyssä

Akvaponinen viljely on symbioottinen järjestelmä, joka koostuu pääasiassa kaloista, nitrifioivista mikro-organismeista ja kasveista. Siitä huolimatta ajan edetessä lukuisat lisäorganismit voivat vaikuttaa tämän ympäristön muokkaamiseen ja vaikuttamiseen. Tiedetyt olennot, kuten lierot, voivat olla hyödyllisiä auttamalla kalojen jätösten hajoamisprosessissa. Biosuodattimissa on tiettyjä organismeja, erityisesti erilaisia äyriäisiä, jotka voidaan luokitella hyvänlaatuisiksi kokonaisuuksiksi, jotka eivät vaikuta aktiivisesti järjestelmän yleiseen toimintaan tai heikennä sitä. Akvaponisessa viljelyssä vaaroja aiheuttavat erilaiset organismit, kuten loiset, tuholaiset ja muut bakteerit. On haastavaa eliminoida nämä organismit kokonaan akvaponisten järjestelmien luontaisen ei-steriilin luonteen vuoksi. Jotta voidaan minimoida näiden pienten riskien mahdollisuutta eskaloitua vaaralliseksi tartunnoiksi, on välttämätöntä omaksua järjestelmän optimaalinen hallintatapa, joka sisältää vankan ja kestäväen kalojen ja kasvien viljelyn. Tämä voidaan saavuttaa ylläpitämällä ahkerasti erittäin happipitoisia olosuhteita ja tarjoamalla runsaasti tarvittavia ravintoaineita. Tällä tavalla organismit pystyvät puolustautumaan infektoita tai sairauksia vastaan käyttämällä omaa vahvaa immuunijärjestelmäänsä.

3.1. Levät

Määritelmä

Levät ovat monipuolinen kokoelma fotosynteettisiä organismeja, jotka elävät pääasiassa vesiolosuhteissa, mutta voivat menestyä myös maalla ja jopa ankarissa ympäristöissä. Niiden koko vaihtelee mikroskooppisista yksisoluisista organismeista suuriin monisoluisiin organismeihin. Koska levistä puuttuu monia kasveista löytyviä erikoistuneita rakenteita ja kudoksia, kuten juuria, varsia ja lehtiä, niitä ei luokitella kasveiksi.

Leviin kuuluvat taksonomiset luokat, jotka koostuvat muun muassa viherlevistä, punalevista, ruskealevista ja piilevista. Ne erottuvat kyvystään kerätä valoenergiaa klorofyllin ja muiden pigmenttien kautta ja muuntaa hiilidioksidia ja vettä orgaanisiksi yhdisteiksi, tyypillisesti sokereiksi, fotosynteesin kautta.

Levien kehittyminen voi vaikuttaa kielteisesti akvaponisen järjestelmän suorituskykyyn. Koska levät ovat fotosynteettisiä organismeja, ne voivat kehittyä nopeasti ja helposti vedessä saadessaan valoa. Levien kasvuun vaikuttaa yleensä järjestelmän sisällä olevan veden pH, liuenneen hapen määrä ja typpipitoisuudet. On lähes itsestään selvää, että niitä syntyy akvaponisessa järjestelmässä, koska niitä esiintyy luonnostaan kaikissa vesilähteissä. Akvaponisissa viljelyjärjestelmissä leviä nähdään usein, vaikka niitä tyypillisesti hallitaan säätämällä lämpötilaa, valoisaa jaksoa ja valon voimakkuutta pitkin päivää. Leväkasvu voi olla osoitus systeemissä olevasta käyttämättömästä typestä, mikä tarkoittaa, että kalat tuottavat enemmän typpi yhdisteitä kuin kasvit pystyvät ottamaan vastaan.

Levien morfologia kattaa useita muotoja, mukaan lukien yksisoluiset olennot, joita kutsutaan kasviplanktoniksi, ja monisoluiset lajikkeet, joita kutsutaan makroleviksi. Nopeasti kasvava kasviplankton voi nopeasti lisääntyä ja sävyttää vettä, mutta makrolevät luovat pitkiä rihmamaisia säikeitä, jotka voivat tarttua säiliön pohjaan. Leväkehitys voi muuttaa veden kemiallista koostumusta ja aiheuttaa ongelmia pumppujen ja suodattimien toimintamekanismeihin. Levät kilpailevat ravintoaineista systeemin muiden eliöiden kanssa, ne voivat hyödyntää typen lähteinä nitraatteja ja ammoniumia lajista riippuen. Ne tuottavat happea päivällä ja käyttävät sitä energiana yöllä. Äärimmäisissä olosuhteissa yön aikana happea kuluttavien levien aiheuttama hapeton vesi saattaa tappaa kalat, koska liuennutta happea kuluu korkeita määriä. Rihmalevät voivat myös kasvaa erittäin suuriksi ja ovat usein vaikeasti hajottavia. Tämä osoittaa, että levien kerääntyminen voi vahingoittaa pumppuja ja suodattimia, mikä vaarantaa järjestelmän toiminnan ja saattaa vaatia kalliita korjauksia.

Akvaponisen viljelyjärjestelmän osien, kuten kalasäiliön seinämien, pumppujen ja suodattimien ympärillä olevien alueiden, ja kasvijuurien silmämääräinen säännöllinen tarkastus riittää levän kasvun seuraamiseen (kuva 8). Tarpeettoman levien kasvun välttämiseksi on tärkeää peittää akvaponisen viljelyjärjestelmän osat valoa estävällä materiaalilla tai kansilla, mikä estää myös veden haihtumista koko järjestelmästä. Koska kasvien kasvuun käytettävät valonlähteet (lamput) ovat usein lähellä vettä, on tärkeää suunnitella järjestelmä siten, että valo ei loista suoraan veteen. Paljastuneen veden jättäminen peittämättä esimerkiksi ravinnekalvopedissä tai keräyssäiliössä voi nopeasti lisätä levien kasvua ja siten nopeuttaa ravinteiden imeytymistä leviin, jolloin viljelyille kasveille jää vähemmän ravintoa. Koska kalasäiliö altistuu hyvin

todennäköisesti valolle, on väistämätöntä, että sinne myös kehittyy leväkasvustoa. Järjestelmä on siten puhdistettava heti, kun leväkasvu tulee näkyvämmäksi.



Kuvio 8. Leväkasvustoa akvaponisessa viljelmässä, mikrovihreää kasvua paikassa, joka on altistunut valolle (oikea kuva), leväkasvustoa kalasäiliössä niissä osissa, joita ei ole peitetty styroksilla (vasen kuva).

Case study!

Mikrolevien yhteisviljely vesiviljelyjärjestelmissä

Tässä tutkimuksessa arvioidaan *Chlorella* sp. ammoniakin hallintaan tarkoitettun kelluvan akvaponisen lauttajärjestelmän tuottamia mikroleviä. Akvaponisten järjestelmien toiminnan aikana seurattiin leväbiomassan, vihannesten ja järjestelmien välttämättömien ravintoaineiden poistumista. Järjestelmät tuottivat täydellä teholla toimiessaan $4,15 \pm 0,19 \text{ g/m}^2$ (kuivapohjainen) leviä, mitä voidaan pitää vaatimattomana, koska kasvuolosuhteet on suunniteltu pääasiassa kalan ja vihannesten tuotantoon. Siitä huolimatta havaittiin, että levät pystyivät säätelemään ammoniakkia, koska ne suosivat ammoniakkityyppiä nitraattityyppiä vastaan, ja ne voivat myös torjua nitrifioivien bakteerien aiheuttamaa pH:n laskua.

Akvaponisen järjestelmän leväkomponentti tarjoaa lukuisia todistettuja etuja. Levät voivat tuoda happea, tasapainottaa pH-tasoa ja säädellä järjestelmän ammoniakkitasoa säännöllisten toimintojen aikana. Koska levät sisältävät enemmän tyyppeä kuin vihannekset, ne pystyvät myös poistamaan tyyppeä tehokkaammin kuin vihannekset. Niiden tuotanto on tosin pienempi kuin vihannesten tuotanto, mikä on taloudellisesti epäedullista viljelijöille. Lisäksi levät kilpailevat vihannesten kanssa kasvutilasta ja koko tyypialtaasta pikemminkin kuin nitraattityypestä. Levillä on erityinen tehtävä akvaponisen järjestelmän vedenkäsittelyprosessissa, ja jos olosuhteet sallivat, niitä voidaan lisätä järjestelmän loppuun poistamaan vielä enemmän ammoniakkia. Mitä tulee typen poistamiseen yleisesti, levät ovat siinä tehokkaampia kuin vihannekset.

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. Muut bakteerit

Heterotrofiset bakteerit

Akvaponiseen viljelyyn liittyy merkittävä bakteeriyhteisö, jossa monet mikro-organismit muodostavat symbioottisen suhteen. Bakteeriryhmä, jota yleisesti kutsutaan heterotrofiseksi ryhmäksi, tunnetaan nimellä *Pseudomonas* spp. Taulukko 3 esittää tästä prosessista vastuussa olevat bakteerilajit. Kyseiset bakteerit käyttävät ensisijaisesti orgaanista hiiltä ravinteiden lähteenä, ja ne osallistuvat enimmäkseen kaloista ja kasveista peräisin olevan kiinteän jätteen hajoamisprosessiin. Heterotrofiset bakteerit metaboloivat kiinteät kalajätteet mineralisoitumisena tunnetun prosessin kautta. Tämä prosessi helpottaa tärkeiden hivenravinteiden vapautumista, joita kasvit voivat sitten hyödyntää akvaponisissa viljelyjärjestelmissä. Heterotrofiset bakteerit yhdessä tiettyjen luonnossa esiintyvien sienten kanssa auttavat kalojen jätteen kiinteän komponentin hajoamisessa. Näin kiinteään jätteeseen jääneet ravinteet vapautuvat veteen. Mineralisaatioprosessi on ratkaisevan tärkeä, koska sen avulla kasvit saavat käyttöönsä ravinteita, joita ei ole helposti saatavilla kiinteässä muodossa. Kasvien juurissa tapahtuvan ravinteiden

imeytymisen helpottamiseksi on välttämätöntä, että kalojen jätteet läpikäyvät molekyylihajoamisen yksinkertaisemmiksi aineosiksi.

Heterotrofisilla bakteereilla on kyky saada ravinteita monista orgaanisista aineista, kuten esimerkiksi: kiinteä kalojen jäte, ylimääräinen kalanruoka, lahoavat kasvit, kuihtuvat kasvinlehdet ja jopa kuolleet bakteeriorganismit. Akvaponisen järjestelmän yksiköt tarjoavat erilaisia ravinnelähteitä bakteereille, koska se on avoin järjestelmä syöttävien materiaalien suhteen, jotka eivät ole steriilejä. Biokiinteiden aineiden käyttö väliaineena heterotrofisten bakteerien kasvulle saattaa johtaa niiden pitoisuuden nousuun, mikä voi viime kädessä johtaa lisääntyneeseen hapen kulutukseen ja biosuodattimen suorituskyvyn heikkenemiseen. Toisin kuin nitrifioivat bakteerit, heterotrofit osoittavat paljon nopeampaa lisääntymisnopeutta, jonka arvioidaan olevan 40 kertaa nopeampi. Heterotrofiset bakteerit edellyttävät vertailukelpoisia ympäristöolosuhteita kasvaakseen nitrifioivien bakteerien tapaan, erityisesti ympäristöissä, joissa liuenneen hapen määrä on korkea. Heterotrofiset bakteerit kolonisoituvat yksikön kaikissa ainesosissa, ja niiden pitoisuus on huomattava alueilla, joille kiinteä jäte pyrkii kerääntymään. Nämä organismit sitoutuvat symbioottiseen suhteeseen muiden bakteerien kanssa helpottaakseen kiinteän jätteen hajoamista. Tämän yhteisön läsnäolo voi tehokkaasti vähentää kiinteän jätteen kertymistä.

Sulfaattia vähentävät bakteerit

Nitrifioivat ja mineralisoivat bakteerit (heterotrofiset bakteerit) ovat hyödyllisiä akvaponisissa järjestelmissä, mutta tietyillä muilla bakteerikannoilla voi olla haitallisia vaikutuksia. Yksi esimerkki haitallisesta bakteeriryhmästä on sulfaattia pelkistävät bakteerit. Nämä bakteerit sijaitsevat tyypillisesti ympäristöissä, joissa ei ole happea, eli anaerobisia olosuhteita, joissa ne saavat energiaa rikkiä sisältävän hapetus-pelkistysreaktion kautta. Taulukko 3 esittää tästä prosessista vastuussa olevat bakteerilajit. Ongelmana on, että tämä prosessi tuottaa rikkivetyä (H_2S), joka on erittäin vaarallinen aine vesieliöille, kuten kaloille. Rikkiä vähentäviä bakteereja on levinnyt laajalti ja ne elävät eri vesiympäristöissä, kuten järvissä, vesijättömailla ja suistoissa ympäri maailmaa. Lisäksi niillä on merkittävä rooli luonnollisessa rikin kierrossa. Nämä bakteerit ovat vastuussa rikkivetyyn liittyvästä hajuaistimuksesta, kuten mädäntyneiden munien hajusta, sekä sedimenttien pigmentaatiosta, jolle on ominaista harmaanmusta sävy. Yksi akvaponisen viljelyn haasteista on kiinteiden jätteiden kertyminen vauhdilla, joka ylittää heterotrofisten bakteerien ja niihin liittyvän yhteisön kyvyn käsitellä ja mineralisoida niitä tehokkaasti. Tämä epätasapaino voi johtaa hapettomien olosuhteiden kehittymiseen, jotka edistävät sulfaattia vähentävien bakteerien kasvua. Järjestelmissä, joissa kalojen tiheys on suuri, kalojen aiheuttama kiinteän jätteen merkittävä tuotto ylittää mekaanisten suodattimien kyvyn puhdistaa tehokkaasti ja oikea-aikaisesti. Näin ollen tämä tilanne edistää bakteerien lisääntymistä ja niiden myöhempää haitallisten aineenvaihdunnan tuotteiden muodostumista. Monissa tapauksissa ekspansiivisissa akvaponisissa järjestelmissä on kaasunpoistosäiliö keinona päästää rikkivetyä turvallisesti takaisin ilmakehään. Kaasun poiston prosessia pidetään tarpeettomana pienemmän mittakaavan järjestelmissä. Kuitenkin jopa rajoitetun mittakaavan järjestelmissä haitallisen aromin tunnistaminen, joka muistuttaa mätänevien munien tai käsittelemättömän jäteveden aromia, edellyttää asianmukaisten toimenpiteiden toteuttamista tehokkaan hoidon varmistamiseksi. Näiden bakteerien kasvu rajoittuu hapettomaan ympäristöön. Siksi niiden

leviämisen hillitsemiseksi on välttämätöntä varmistaa riittävä ilmastus ja hapetetun veden perusteellinen virtaus sekä tehostaa mekaanista suodatusta lietteen kertymisen estämiseksi.

Typpeä poistavat bakteerit

Typen poiston prosessia helpottaa myös joukko mikro-organismeja, joita pidetään ei-toivottuina. Taulukko 3 esittää tästä prosessista vastuussa olevat bakteerilajit. Nämä bakteerit, jotka muistuttavat sulfaatin pelkistäjiä, elävät anaerobisissa ympäristöissä. Ne edistävät nitraatin, erittäin tarpeellisen kasviravinteen, muuntamista ilman typeksi, jolloin kasvit eivät pysty käyttämään sitä. Denitrifikaatioprosessi voi johtaa merkittävään typen vähenemiseen, joka voi vaihdella 25 prosentista aina 60 prosenttiin. Nämä bakteerit ovat laajalle levinneitä erilaisissa ympäristöolosuhteissa ja niillä on merkittävä ekologinen merkitys. Kuitenkin näiden bakteerien läsnäolo akvaponisissa järjestelmissä voi mahdollisesti vähentää niiden tehokkuutta vähentämällä typpilannoitteita. Riittämätön hapetus muodostaa usein haasteen laajojen kelluvien kasvualustojen yhteydessä, erityisesti sellaisissa, joille on ominaista pitkänomaiset kanavat. Mahdollisen ongelman esiintyminen voidaan havaita, kun kasveilla ilmenee typpivajeen oireita, jopa tasapainoisessa järjestelmässä, ja kun vedessä on poikkeuksellisen vähän nitraattia. Laajamittaisten akvaponisten viljelyjärjestelmien yhteydessä on mahdollista käyttää erillistä denitrifikaatio-säiliötä. Siitä huolimatta on suositeltavaa priorisoida kasvien maksimaalinen nitraattien saanti, jolloin nämä arvokkaat ravinteet muunnetaan biomassaksi sen sijaan, että niitä vapautuisi kaasuna.

Taulukko 3. Bakteerilajit ja niiden toiminnot akvaponisessa järjestelmässä³.

Microbiological process	Genera
Nitrification	
-Ammonia oxidisation	<i>Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira, Nitrosolobus, Nitrosovibrio</i>
-Ammonia oxidisation by archaea	<i>Trosopumilus, Nitrososphaeras</i>
-Nitrite oxidation	<i>Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, Nitrospina</i>
-Complete ammonia oxidation	<i>Nitrospira</i>
Denitrification	<i>Dokdonella, Thermomonas</i>
Mineralisation	<i>Pseudomonas, Flavobacterium, Sphingobacterium, Arcobacter</i>
Anaerobic ammonium oxidation (Anammox)	<i>Brocadia</i>
Sulphate reduction	<i>Fusibacter, Bacteroides, Desulfovibrio, Dethiosulfovibrio</i>
Organic phosphorus mineralisation	<i>Modestobacter</i>
Iron cycling	<i>Acidibacter</i>
Nitrogen fixation	<i>Pontibacter, Pseudonocardia</i>

³ Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in akvaponinen viljely: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, 71(1), 1-13.

Haitalliset bakteerit

Ei-toivotut, haitalliset tai patogeeniset bakteerit sisältävät joko kasvien, kalojen tai ihmisten sairauksia. Lisätietoa kala- ja kasvi-patogeeneista on saatavilla seuraavista tutkimusraporteista: "Kala akvaponisessa viljelyssä - valinta, vaatimukset, ja rajoitukset" ja "Kasvit akvaponisessa viljelyssä - valinta, vaatimukset ja rajoitukset." Yleisesti ottaen tehokkaiden maataloustekniikoiden luomisella ja toteuttamisella on ratkaiseva rooli akvaponisten järjestelmien bakteeri-infektioiden lieventämisessä ja vähentämisessä. Taudinaiheuttajien ehkäisy järjestelmässä voidaan saavuttaa erilaisin toimenpitein.

Ensinnäkin on tärkeää asettaa etusijalle työntekijöiden hyvät hygieniakäytännöt. Tämä sisältää asianmukaisen henkilökohtaisen puhtauden ylläpitämisen ja asianmukaisten käytäntöjen noudattamisen sanitaatiassa. Lisäksi on välttämätöntä toteuttaa suojautumisstrategioita, joilla estetään jyrjsijöitä saastuttamasta järjestelmää ulosteen kautta. Laajamittaisten kasvihuonepohjaisten vesiviljelyjärjestelmien tapauksessa on tärkeää varmistaa, että luonnonvaraiset nisäkkäät sekä kotieläimet, kuten koirat ja kissat, pidetään poissa järjestelmästä patogeenien kulkeutumisen riskin minimoimiseksi. Lisäksi on ehdottomasti vältettävä sekä saastuneen veden että riittämättömästi esivalmistellun veden käyttöä. Lopuksi on ratkaisevan tärkeää huomioida, että mikä tahansa järjestelmässä käytetty elävä rehu (esimerkiksi kalarehuna käytettävät madot) voi mahdollisesti toimia kantajana vieraiden mikro-organismien siirtymiselle toisesta lähteestä. Myös jos ostettuja taimia käytetään akvaponisessa viljelyjärjestelmissä, on huolehdittava siitä, ettei kasvitaimitarhoista siirry virus- tai bakteerikontaminaatiota, koska niiden viljelyyn käytetään erilaisia substraatteja, kuten maaperää tai kompostia, jotka usein sisältävät myös patogeenisiä organismeja. Erityisen tärkeää on välttää lintujen ulosteiden saastuttamilta katoilta kerätyn sadeveden hyödyntämistä, ellei vedelle tehdä asianmukaisia esikäsittelytoimenpiteitä.

Yksi merkittävä lämminverisiin eläimiin liittyvä huolenaihe on *Escherichia coli* mahdollinen leviäminen, kun taas linnut ovat usein *Salmonella* spp:n kantajia. Nämä patogeeniset bakteerit voivat tunkeutua ympäristöön eläinten ulosteen kautta. Lisäksi on ehdottomasti varmistettava, että käytettävä vesi ei joudu kosketuksiin kasvien lehtien kanssa ilman ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä noudattaen. Toimenpiteillä pyritään lieventämään lukuisia kasvisairauksia ja minimoimaan kalojen veden saastumisriskiä suhteessa ihmisen tuotteeseen, erityisesti silloin, kun tuote on tarkoitettu raakaravinnoksi. Vihannekset on puhdistettava perusteellisesti ennen syömistä riippumatta siitä, onko ne kasvatettu vesiviljelyllä vai tavanomaisilla menetelmillä. Akvaponisen viljelyn yhteydessä on laajalti tunnustettu, että terve järki ja asianmukaisten hygieniakäytäntöjen noudattaminen ovat tehokkaita keinoja ehkäistä infektioiden esiintymistä ja leviämistä.

Bioturvallisuustoimenpiteiden toteuttaminen voi vähentää tehokkaasti patogeenisten bakteerien leviämisen riskiä. Yksi suositeltava käytäntö on karanteenitoimenpiteiden toteuttaminen vasta hankituille kaloille tai kasveille ennen niiden ottamista mukaan akvaponiseen järjestelmään. Lisäksi on oleellista noudattaa tiukkoja hygieniavaatimuksia laitteiden ja huoltoprotokollien osalta. Säännöllisten järjestelmän ylläpitokäytäntöjen toteuttaminen, kuten suodattimien puhdistus ja asianmukaisten virtausnopeuksien ylläpito, voivat tehokkaasti lieventää bakteeriongelmia edistämällä vankan ja tasapainoisen ekosysteemin muodostumista ja ylläpitämistä.

Määritelmä

Akvaponisessa viljelyssä sienet ovat monipuolinen kokoelma sienikunnan eukaryoottisia mikro-organismeja, joilla on rooli akvaponisen järjestelmän biologisissa toimissa. Sieniä löytyy yleisesti kasvualustasta ja biosuodattimen komponenteista. Niillä on keskeinen tehtävä hajottaa orgaanista ainetta, joka tulee syömättä jääneestä kalanrehusta, kalajätteistä ja lahoavasta kasvimateriaalista. Sienet, jotka toimivat hajottajina, auttavat monimutkaisten orgaanisten molekyylien muuntamisessa emäksisemmiksi molekyyleiksi vapauttaen siten ravinteita, kuten typpeä ja fosforia. Sienipopulaatioiden tehokas torjunta on ratkaisevan tärkeää harmonisen ja kukoistavan akvaponisen järjestelmän ylläpitämiseksi, mikä edistää kasvien optimaalista kehitystä ja kalojen hyvinvointia. Patogeeninen sieni akvaponisessa viljelyssä voi ensisijaisesti vaarantaa sekä järjestelmän kasvi- että kalakomponentit.

Sienet ovat välttämättömiä monimutkaisten orgaanisten aineiden hajottamisessa ja ravinteiden täydentymisessä kierrätyksen kautta. Sellulolyyttiset sienet, kuten *Aspergillus*, *Penicillium* ja *Trichoderma*, nopeuttavat luonnollista hajoamisprosessia. Sienilajeja, kuten *Candida albicans*, *C. parapsilosis*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *Rhizopus*, *Fusarium* spp., *Trichoderma* ja *Penicillium* spp. on löydetty myös akvaponisista viljelyjärjestelmistä – tosin näillä lajeilla ei ole vaikutusta kalojen hyvinvointiin. Veden homeet, vaikka pääosin saprofyyttisetkin, pystyvät kolonisoimaan erilaisia aineita ja muodostamaan loisia elävien isäntien kanssa, mikä vaikuttaa merkittävästi biologiseen tuottavuuteen.

Sienet viihtyvät hämärässä, kosteassa ympäristössä, jossa ne vapauttavat hydrolyyttisiä entsyymejä eristämään ravinteita kuolleesta orgaanisesta aineesta hyödyntäen sitä hiilen ja energian lähteenä ylläpitääkseen kehitystään ja lisääntymistä. Rikkaat ravintoalustat tuottavat enemmän hydrofobisia itiöitä kuin huonot ravintoalustat. Sienipopulaatioiden tehokas torjunta on elintärkeää harmonisen ja kukoistavan akvaponisen viljelyjärjestelmän ylläpitämiseksi, mikä edistää optimaalista kasvien kehitystä ja kalan hyvinvointia.

Akvaponisen viljelyjärjestelmän sienet liittyvät enemmän kasvi- tai kalatauteihin. Sisätiloissa akvaponiset viljelyjärjestelmät ovat alttiita sienitaudeille, esimerkiksi härmälle, joka leviää nopeasti koko kasvipopulaatioon, esimerkiksi kurkkuihin ja salaatteihin. Koska sisätiloissa pidettävät akvaponiset viljelyjärjestelmät luovat kosteutta ympäristöönsä, on äärimmäisen tärkeää säilyttää sopiva kosteus ja ilmanvaihto huoneessa, jotta vältetään sienitautien nopea leviäminen. Sienimyrkkyjä voitaisiin käyttää sienipesäkkeissä, mutta suurin osa tartuttavista sienistä, esimerkiksi kasveista, osoittaa näkyviä oireita, kun kasvi on jo täysin tarttunut ja kasvit on silloin hävitettävä. Sienitautien välttämiseksi on toimittava erityisen varovaisesti, ettei tuomalla sisään saastunutta maata, kasveja tai muita esineitä tuoda samalla patogeenisiä sieniä, jotka voivat mahdollisesti aiheuttaa sadon menetyksen.

Case study!

Entomopatogeenisten ja mykoparasiittisten sienten mahdollinen käyttö härmäsientä vastaan akvaponisessa järjestelmässä

On todettu, että entomopatogeeniset ja mykoparasiittiset sienet ovat turvallisia biologisia torjunta-aineita useille tuholaisille. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka hyvin mykoparasiittisen *Trichoderma virens*, entomopatogeeniset sienet *Lecanicillium attenuatum* ja *Isaria fumosorosea* estivät *Podosphaera xanthii* (homeen) kasvua. Lisäksi, kun kolme sienten biotorjunta-ainetta lisättiin akvaponisen järjestelmän veteen ja tarkkailtiin niiden kehitystä ja selviytymistä, havaittiin mahdollisia kielteisiä vaikutuksia järjestelmään. Tulokset osoittivat, että pitoisuudella 107 CFU/ml kolme biokontrolliainetta vähensivät oleellisesti härmäsientä. *L. attenuatum* -käsittelyt lehdet osoittivat huomattavan 85 %:n taudin vähenemisen kasvihuoneolosuhteissa (65-73 % suhteellinen kosteus-RH). Kun taudin vakavuus oli 32 % alle 65-73 %:n suhteellisessa kosteudessa, *I. fumosorosea*lla käsitellyt lehdet osoittivat taudin vakavuuden alhaisinta. Lisäksi havaittiin, että *L. attenuatum* -itiöt olivat pysyvimmat lehdillä; alle 65-73 %:n suhteellisessa kosteudessa itiöpopulaatio nousi 7,3 CFU:sta $9,54 \times 10^3$ CFU:aan/ml. Toisaalta 96 tunnin jälkeen kolmen testatun entomopatogeenisen sienen itiöt vesiviljelyssä vähenivät rajusti, yli 99 %. 96 tunnin kuluttua *L. attenuatum* alkuperäiset itiöpitoisuudet 10^7 CFU/ml laskettiin arvoon 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. Veden lähteet

Vesi on akvaponisissa järjestelmissä keskeinen väliaine, koska se jakautuu järjestelmän kahden pääkomponentin (kala- ja kasvikomponenttien) kesken, on se siten systeemin ravinneresurssien tärkein kantaja ja se myös määrittää yleisen kemiallisen ympäristön kalojen ja kasvien viljelylle sisätiloissa. Käytetty vesilähde vaikuttaa yksikön vesikemiaan. Siksi se on elintärkeä ainesosa, jolla voi olla merkittävä vaikutus järjestelmään. Akvaponisessa järjestelmässä veden lähteellä ja sillä, mitä vesilähde sisältää kemiallisesti, fysikaalisesti ja biologisesti, on suuri vaikutus järjestelmään, koska se asettaa lähtökohdan tärkeimmille veden laatuparametreille. Uusien vesilähteiden pH, kovuus, suolaisuus (liuenneiden suolojen

pitoisuus), kloori (jos vesihanaa käytetään) ja mahdolliset epäpuhtaudet (raskasmetallit, mikrobikontaminaatio) tulee aina testata, jotta veden käyttöturvallisuus voidaan varmistaa.

Vesijohtovesi

Kunnan vesilaitoksen tuottamaa juomavettä käsitellään usein erilaisilla kemikaaleilla bakteerien poistamiseksi. Kloori ja kloramiinit ovat pääasiallisia veden käsittelyssä käytettyjä yhdisteitä. Näiden kemikaalien esiintyminen akvaponisessa ekosysteemissä uhkaa kalojen, kasvien ja bakteerien hyvinvointia, koska niillä on myrkyllisiä ominaisuuksia. Näitä vedenpuhdistuksen kemikaaleja käytetään nimenomaan bakteerien poistamiseen vedestä, mutta niiden käytöllä on kielteisiä vaikutuksia vesiympäristön yleiseen terveyteen. Mikäli klooritesteillä havaitaan kohonneita kloorimääriä, on vesi käsiteltävä ennen käyttöä. Yksinkertaisin lähestymistapa sisältää veden varastoinnin ennen käyttöä, mikä helpottaa kaiken vedessä olevan kloorin haihtumista ja hajoamista ilmakehään. Tämä prosessi voi kestää yli 48 tuntia, vaikka se voi tapahtua nopeammin, jos vettä ilmastetaan voimakkaasti. Kloramiineilla on suurempi stabiilisuus ja pienempi taipumus vapautua haihtumalla. Pienissä kunnallista juomavettä hyödyntävissä akvaponisissa järjestelmissä poistokaasutus on kuitenkin tyypillisesti riittävä toimenpide. Suositeltava nyrkkisääntö on välttää vaihtamasta yli 10 prosenttia vedestä ilman etukäteistä testaamista ja kloorin poistamista. Lisäksi veden laatu riippuu sen koostumuksesta myös sillä perusteella mistä järjestelmän alkuperäinen vesi on saatu.

Yleisimmin EU:ssa hanasta saatu vesi valmistetaan niin, että se on turvallista kuluttajien käyttää, eli sillä on riittävä laatu myös akvaponiseen viljelyjärjestelmään. Euroopassa juomaveden alkulähde on yleensä peräisin järvistä, joista tai pohjaveden lähteistä. Vesi käy läpi useita puhdistuksen vaiheita niin, että se on juomaveden juomista koskevien direktiivien mukaista. Juomavesi suodatetaan hiekka-, sora- ja kalvosuodattimien läpi hiukkasten, bakteerien ja muiden epäpuhtauksien poistamiseksi, jonka jälkeen vesi desinfioidaan kloorauksella, UV-säteilytyksellä tai otsonoinnilla. Hanaveden pH-tasoa säädetään tarvittaessa ja laatua seurataan koko prosessin ajan, kunnes vesi jaellaan kuluttajille. Valvontaelinten asettamat tiukat vaatimukset viittaavat siihen, että vesihana on yksi sopivimmista vesilähteistä pienimuotoisille akvaponisille viljelyjärjestelmille.

Maanalaiset veden lähteet

Kaivoista otetun veden laatu riippuu pitkälti kallioperän laadusta ja siitä, miten vesi syntyy pohjavesivarantoon. Jos kallioperä on kalkkikiveä, vedessä on todennäköisesti melko korkeat kovuuspitoisuudet, mikä voi vaikuttaa veden pH-arvoon. Korkeat yleiskovuuspitoisuudet löytyvät vesilähteistä, kuten kalkkikivipohjaisista pohjavesistä ja/tai jokien uomista, koska kalkkikivi koostuu pääosin kalsiumkarbonaatista (CaCO_3). Kalkkikiveä olevan kallioperän kaivoista/pohjavesivarannoista hankitun veden karbonaattikovuus on yleensä korkea, noin 150–180 mg/ltr. Veden kovuus ei ole suuri ongelma akvaponisessa viljelyssä, koska emäksisyys kuluu luonnollisesti nitrifioivien bakteerien tuottaman typpihapon avulla. Kuitenkin, jos veden kovuuden taso on erittäin korkea ja nitrifikaatio on minimaalista

pienen kalabiomassan vuoksi, niin vesi voi jäädä lievästi emäksiseksi (pH 7–8) ja vastustaa akvaponisten järjestelmien luonnollista taipumusta happamoitua sekä nitrifikaatiokierron aikana, että kalojen hengityksen kautta. Tässä tapauksessa saattaa olla tarpeen käyttää hyvin pieniä määriä happoa emäksisyyden vähentämiseksi ennen veden lisäämistä järjestelmään, jotta estetään pH-vaihtelut järjestelmän sisällä.

Porakaivoista saadun veden laatu riippuu pitkälti kunkin alueen geomorfologisesta koostumuksesta. Tietyillä alueilla voi olla lisääntynyttä suolapitoisuutta tai liuenneita mineraaleja. Toisilla alueilla voi taas olla kohonneita rauta- tai sulfaattipitoisuuksia. Tällaisissa tapauksissa tulee käyttää suodattimia näiden ionien poistamiseksi sisään tulevasta vedestä. Veden suodattamisen kustannukset voivat nostaa akvaponisen järjestelmän kokonaiskäyttökustannuksia, minkä vuoksi tulee huolellisesti arvioida, olisivatko muut vesilähteet kannattavampia akvaponisen viljelyn käyttöön. Suodatusjärjestelmä on huollettava säännöllisesti, kun niiden enimmäispuhdistuskapasiteetti on käytetty loppuun, jolloin veden käsittelyn kustannukset voivat nousta entisestään. Pohjavesivarannosta saatavaa vettä tulee myös testata sertifioiduissa/akkreditoiduissa laboratorioissa ennen käyttöä, mikäli epäilyjä (vedessä on raudan tai rikin hajua), järjestelmään syötettävän veden laadun varmistamiseksi.

Sadevesi

Sadevesi on akvaponiseen viljelyyn erittäin edullinen vesilähde. Sadeveden pH on tyypillisesti neutraali ja se sisältää minimaalisesti karbonaatteja ja liuenneita mineraaleja sekä sen suolapitoisuus on mitätön. Tämä koostumus on ihanteellinen järjestelmän täydentämiseen ja estää suolaisuuden kertymisen ajan myötä. Kuitenkin tietyillä alueilla, esimerkiksi Itä-Euroopassa, USAn itärannikolla, ja osissa Kaakkois-Aasiaa, sateen pH on hieman happamampi, mutta sen ei pitäisi vaikuttaa veden laatuun. Usein on suositeltavaa kerätä ja varastoida sadevettä ja samalla nostaa veden kokonaiskovuutta lisäämällä mineraaleja puskurointikyvyyn parantamiseksi. Lisäksi sadeveden kerääminen ja käyttäminen vähentää tehokkaasti yksikön toimintakustannuksia ja edistää samalla parempaa vastuullisuutta. Sadevettä kerätään yleensä säiliöihin, jotka kaivetaan maahan, jotta veden lämpötila pysyy viileänä ja jotta siihen ei pääse valoa, mikä taas estää levien kasvua. Sadevesi ei tyypillisesti sisällä mikro-organismeja, mutta sadeveden säilyttämiseen käytetyt säiliöt tai tankit voivat edistää mikro-organismien kasvua. Sadeveden käytössä tulee olla varovainen – keräysjärjestelmä on valmistettava niin, ettei kosketus luonnonvaraisiin eläimiin ole mahdollinen sekä muut mahdolliset saastumislähteet, kuten läheisten puiden lehdet tai tehdas, joka tuottaa hienojakoisia hiukkasia päästöillään. Toinen tärkeä huomioitava seikka sadevettä käytettäessä on huomioida sen kausikohtainen saatavuus, sillä kesällä on monesti kuivempaa. Huomioon tulee ottaa myös erot lämpötiloissa, sillä suurten vesimäärien yhtäkkistä lisäämistä järjestelmään tulee välttää, jos lisättävä vesi on merkittävästi eri lämpöistä kuin järjestelmässä oleva (joko kylmempää tai lämpimämpää).

5. Veden käsittely akvaponisessa viljelyssä

Veden puhdistus

Sekä bakteeri- että virusorganismit voivat tarjota merkittäviä haasteita akvaponisissa viljelyjärjestelmissä. Vaikka järjestelmä toimii syklisesti ja pystyy teoriassa ylläpitämään itseään, on tapauksia, joissa patogeenien riski voi kasvaa. Yleisimmät veden desinfiointitekniikat ovat otsonikäsittely ja UV-säteilytys. UV-säteilyllä on tietyllä valon intensiteetillä kyky hajottaa biologisten kokonaisuuksien, kuten patogeenien ja yksisoluisien organismien, DNA:ta. Akvaponisessa viljelyssä UV-valo sijoitetaan tyypillisesti tiiviiseen putkenosaan, joka sijaitsee mekaanisen suodatinyksikön ja biosuodattimen välissä, tai sitten se sijoitetaan ennen pohjasäiliötä. Optimaalisen suorituskyvyn saavuttamiseksi on ratkaisevan tärkeää sijoittaa UV-lamppu vasta mekaanisen suodatusjärjestelmän jälkeen, jolloin estetään tukkeutumia aiheuttavien materiaalien pääsy järjestelmään.

Myös otsoni (O_3) vähentää tehokkaasti infektiota ja muita ei-toivottuja organismeja. Kun otsoni joutuu kosketuksiin veden kanssa, se läpikäy prosessin, jota kutsutaan halkeamiseksi, jolloin muodostuu happimolekyyliä (O_2) ja reaktiivisia happilajeja, jotka tunnetaan vapaana happiradikaalina ($O_2^{\cdot-}$). Tämä radikaali reagoi kemiallisesti ja hapettaa orgaanisia yhdisteitä. Lisäksi otsonimolekyylin radikaali O eliminoi bakteereja, planktonia ja rihmaleviä hyökkäämällä niiden biologisiin soluseiniin. Otsonilla on kuitenkin merkittävää reaktiivisuutta ja se voi mahdollisesti vahingoittaa biosuodattimessa olevia nitrifioivia bakteereja sekä vaikuttaa haitallisesti kalojen kiduksiin, kun sitä käytetään liikaa. Tästä syystä annostusta on säädeltävä jatkuvasti. On olemassa yhdistelmäratkaisuja, joissa otsoni- ja UV-käsittelyt yhdistetään – tämä auttaa poistamaan jäännösootsonia tehokkaammin. Erityiset otsonointilaitteet lisäävät ylimääräisiä kustannuksia ja niiden käyttö vaatii järjestelmän lisävalvontaa. Lisäksi tarvitaan erillinen säiliö, jossa otsonin poisto tapahtuisi ennen veden vapauttamista takaisin järjestelmään.

Kohdennettuihin toimenpiteisiin voidaan käyttää kemiallisia aineita veden mikro-organismipitoisuuden vähentämiseksi. Vetyperoksidia (H_2O_2) käytetään usein, mutta liialliset annokset voivat aiheuttaa merkittävää haittaa kalan hyvinvoinnille ja voi aiheuttaa haittaa suodattimen mikro-organismeille. Vetyperoksidia käytetään enimmäkseen tyhjien säiliöiden ja muiden laitteiden desinfiointiin järjestelmän epäaktiivisuuden aikoina, jolloin niissä ei ole kaloja tai vakiintuneita biosuodattimia käytössä.

Koska kaikki yllä mainitut desinfiointimenetelmät voivat vaikuttaa akvaponisen viljelyjärjestelmän kokonaisterveyteen, mukaan lukien kalat, kasvit ja biosuodatinta kolonisoivat mikro-organismit, on suositeltavaa välttää näiden liuosten käyttöä pienemmissä yksiköissä, koska desinfiointiapuaineet voivat vahingoittaa monimutkaista symbioottista vastavuoroisuutta. Akvaponista viljelyjärjestelmää käynnistettäessä on hyvä ensin luoda olosuhteet, joita voidaan pitää hygieenisinä ja jollain tapaa aseptisina. Huone on desinfioitava ja hygieniakäytännöt on otettava käyttöön (käsihygieniä, kenkien hygieniä, suojavaatteet jne.), jotta vältetään desinfiointimenetelmiltä, jotka voivat vahingoittaa jo vakiintunutta järjestelmää.

5.1. Veden laadun sääntely ja ongelmat

Veden laatu akvaponisessa viljelyjärjestelmässä on olennainen parametrikokonaisuus, joka vaikuttaa suoraan kaikkien systeemissä mukana olevien eliöiden – kasvien, kalojen ja mikro-organismien – terveyteen ja hyvinvointiin. Alla on koottu yleisimmät veden laatuun liittyvät ongelmat sisältäen mahdolliset ratkaisut ja tavat säädellä kyseistä parametria (taulukko 4).

Taulukko 4. Veden laadun parametrit ja mahdolliset ongelmat.

Parametri	Ongelma	Ratkaisu
Liennut happi	Matala liuenneen hapen taso	- Vähennä kalojen määrää - Lisää ilmastusta (lisää ilmakiviä tai isommat pumpput) - Jos ympäröivä lämpötila on noussut, silloin tarvitaan lisää ilmastusta jottei liennut happi vähene - Tarvittaessa vaihda kalapopulaatio (isommat kalat kuluttavat enemmän happea)
pH	pH liian matala (hapan)	- Lisää asteittain NaHCO_3 (veteen liuenneena) kunnes optimaalinen pH on saavutettu - Lisää bikarbonaatteja - Lisää tuoretta vettä (veden kovuuden mukaan)
	pH liian korkea (emäs)	Lisää happoa (H_3PO_4) pohjatankkiin
Lämpötila (veden)	Lämpötila liian korkea	- Peitä tai eristä vesisäiliöt, jos ne ovat suorassa auringonvallossa - Asenna veden jäähdytin
	Lämpötila liian matala	- Eristä vesisäiliöt - Asenna termostaatilla varustettu vedenlämmitin vakaan lämpötilan saavuttamiseksi
Typekkäät yhdisteet	Nitriitin tai ammoniakkin piikki	- Lopeta kokonaan tai vähennä kalojen ruokinta - Laimenna järjestelmässä olevaa vettä tuoreella vedellä - Lisää biofilterin ilmastusta - Lisää biofilterin pinta-alaa
Veden kovuus	Veden kovuus liian matala/korkea	- Liian matala – käytä lisäaineita veden kovuuden nostamiseksi (kalkkikiveä) - Liian korkea – käsittele ja suodata sisään tulevaa vettä

Mikroravinteet	Kasvit alkavat lakastua	• Riippuen kasvien lehtien vahingoista, lisää mineraalilannoitetta tarpeen mukaan • Monitoroi säännöllisesti veden laatua, jotta vältytään kasvien puutoksilta
Levän kasvu	Vihreän levän kasvu	• Suojaa peitteellä veden paljaat kohdat, minimoi veden altistuminen valolle

5.2. Veden laadun testaus ja monitorointi

Tarkkailun tiheys vaihtelee tarkasteltavan mittarin mukaan. Käynnistysjärjestelmien testaus kannattaa tehdä päivittäin kasvien ja eläinten alkuistutuksen yhteydessä, jotta tarvittavat säädöt voidaan tehdä ripeästi. Esimerkiksi kohonneiden ammoniakkipitoisuuksien korjaamiseksi voidaan vähentää syöttömääriä, tehostaa ilmastusta tai laimentaa vettä. Ravinnekiertojen tasapainon saavuttamisen jälkeen (seurannan kesto vähintään neljä viikkoa ilman merkittäviä muuttujien vaihteluita) säännöllinen viikoittainen seuranta on tyypillisesti tyydyttävää suotuisan vedenlaadun ylläpitämiseksi. Jos kuitenkin epäillään jotain ongelmaa (esim. kalojen ulkonäön tai käytöksen muutokset tai kasvien puutosoireet), veden laadun seurantaa kannattaa jatkaa useammin ja pidempään. Siksi kalojen ja kasvien hyvinvointia on seurattava päivittäin, jotta mahdolliset ongelmat havaitaan viipymättä. Kattavien seurantatietojen tallentaminen on ratkaisevan tärkeää. Tähän kuuluu kalojen ulkonäön ja käyttäytymisen tarkkailu (normaali tai epänormaali), kasvien kunnon arviointi (terve tai sairas) sekä vesikemiallisten parametrien, kuten pH:n, liuenneen hapen, ammoniakin, nitriittien ja nitraattien mittaaminen. Noudattamalla tätä lähestymistapaa mahdollisen ongelman taustalla oleva syy voidaan helposti havaita ja jos ongelma toistuu, voidaan aikaisempi tehokas ratkaisu ottaa nopeasti käyttöön. Taulukossa 5 on koottu tärkeimmät veden laatuparametrit ja yleisimmin käytetyt testaus- ja seurannan menetelmät.

Taulukko 5. Veden laadun testauksen ja seuraamisen aktiviteetit.

Parametri	Monitoroinnin aktiviteetit
Liuenut happi (DO)	• Tarkkaile kaloja ja ilmapumppujen toimintaa • DO-lukeman voi saada käyttämällä mittaussarjoja (halvempia, ei yhtä luotettavia, yksittäisiä mittauksia varten) • DO lukemat antureista paikan päällä tai online-valvontaa varten (kalliimpia, luotettavampia, jatkuvia mittauksia varten) • Kun järjestelmä, kalat ja niiden ruokintamäärät ovat vakiintuneet, mittauksia voidaan tehdä harvemmin
pH	• pH-testiliuskat (halpoja, ei niin tarkkoja) • pH-anturit – kannettavat mallit (ei kovin kalliita) • Jatkuvan seurannan pH-anturit – hieman kalliimpia, myös online-vaihtoehto • Mittauksia voidaan tehdä joko päivittäin tai mieluiten jatkuvasti muutosten ja niiden vaikutusten seuraamiseksi

Lämpötila (veden)	• Analoginen lämpömittari • Digitaalinen lämpömittari online-optiolla • Lämpötilan seurantaa tehdään jatkuvasti • Lämpötila-anturit tulevat usein yhdessä muiden mittalaitteiden kanssa (pH, DO)
Typekkäät yhdisteet	• Sarjat nitriitin, ammoniakin ja nitraatin mittaamiseen • Spektrofotometrinen analyysi • Nitraattien mittaamiseen tarkoitetut anturit • Mittaukset tehdään viikoittain tai muutaman kerran viikossa
Veden kovuus	• Testiliuskat ja titrimetrianalyysi • Riippuu pitkälti veden lähteestä ja siksi järjestelmän sisäistä kovuutta ei tarvitse tarkkailla niin usein
Mikroravinteet	• Mikroravinteiden pitoisuuksia on vaikea seurata talon sisällä • Kun kasvit alkavat osoittaa merkkejä hivenravinteiden puutteesta, se tarkoittaa, että ravinteet ovat loppuneet järjestelmästä • Hivenravinteiden kuukausittainen analyysi on suositeltavaa, yleensä akkreditoidut laboratoriot
Levän kasvu	• Silmämääräinen tarkastus – vihreä lima konttien/tankkien seinillä, kelluvilla kasvatusalustoilla

Lähteet:

- 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.

Funding – The preparation of this report has been supported by Interreg Central Baltic funded project CB0100007 “TransFarm - TRANSborder cooperation for circular soil-less FARMing systems”.