

Biologinen vedenkäsittely ja energian tarve kiertovesitykseen perustuvassa kalanviljelyssä Suomen oloissa

Selvitys Savon Taimen Oy:lle

15.2.2010

**Suomen elinkeinokalatalouden toimintaohjelma 2007-2013
Hanke n:o 0822016
Dn:o 1720/3561/08**

Kalavesi Konsultit Oy

Orimattilantie 524 B

07600 Myrskylä

p. 0405144155

Sisällysluettelo

1. Kalanviljely	3
2. Ravinnekuormitus	3
3. Kehityssuunnat	4
4. Vedenkierrätys kalankasvatuksessa	4
5. Menetelmän hyödyt ja haitat	5
6. Vedenlaatuvaatimukset	6
7. Nitrifikaatio	7
8. Kalanviljelyyn soveltuvat nitrifikaatioreaktorit	8
9. Mitoituksesta	9
10. Denitrifikaatio	10
11. Hapetuksen energiatarkastelu	10
11.1. Perusteet	10
11.2. Hapetus painehapettimella	12
11.3. Hapetus paineettomalla kolonnilla	12
11.4. Hapetus suoraan kala-altaaseen	12
11.5. Bioreaktoryypin vaikutus hapentarpeeseen	14
11.5.1. Trickling reaktori	14
11.5.2. Fluidized bed	14
11.5.3. Moving bed	14
11.5.4. Staattinen kelluva peti tai upotettu kennosto (Submerged)	14
12. Pumppauksen energian tarve	14
12.1. Nostokorkeus	14
12.2. Virtaama	15
12.3. Pumpun hyötysuhde ja tyyppi	15
13. Lämpötalous	15
13.1. Ilmanvaihto	15
13.2. Eristys	15
13.3. Ilmanvaihdon lämmön talteenotto	15
13.4. Tuloveden lämmitys	16
13.5. Lämmön talteenotto	16
13.6. Lämmön lähteet	16
14. Hiilidioksidin poisto	16
14.1. Ilmastuksen tarve	16
14.2. Ilmastus bioreaktorissa	16
14.3. Ilmastus altaassa	17
14.4. Ilmastus kolonnissa	17
15. Eri tekijöiden riippuvuudet toisistaan	17
16. Lopuksi	19

Biologinen vedenkäsittely ja energian tarve kiertovesitykseen perustuvassa kalanviljelyssä Suomen oloissa

1. Kalanviljely

Nykyisissä, intensiivisissä kalanviljelyn käytännöissä tarvitaan monenlaista tiedollista ja taidollista osaamista, vaikka toiminta sinänsä on hyvin yksinkertaista – kalalle annetaan ruokaa, se syö ja se kasvaa:

- 1) Kasvatuskalojen ravintona käytetään nykyisin lähes yksinomaan niille varta vasten suunniteltuja valmisrehuja. Rehujen raekoot ja reseptit riippuvat kalalajista ja kalakoosta. Aivan pienet poikaset saavat ravinnon jauhomaisena ja raekoko voi olla jopa 0,05 mm, kun suurimmat kalat napsivat noin 10 mm kokoisia pellettejä.
- 2) Happea kuluu ruuan sulattamiseen ja liikkumiseen. Tämän kalat saavat yksinomaan vedestä kidustensa avulla. Eri kalalajien hapentarve on vaihteleva, mutta periaatteessa saman rehumäärän sulattaminen kuluttaa suunnilleen saman määrän happea kalalajista riippumatta. Kalan muu aktiivisuus aiheuttaa enemmän vaihteluita. Lohikalat ovat tottuneet luonnossa veden korkeisiin happipitoisuuksiin ja niillä pidetäänkin noin 70 % kyllästysarvoa alarajana, jotta ne kasvavat kunnolla ja pysyvät rauhallisina. (Jos happi laskee liian alas, siitä aiheutuu toisinaan paniikkireaktioita kalalle, jolloin kuluu happea entistä enemmän.)
- 3) Kalojen erittämät yhdisteet ovat liiallisina pitoisuuksina haitallisia ja ne on saatava poistumaan altaasta vaihtamalla vettä. Ammoniakki ja hiilidioksidi ovat tärkeimmät yhdisteet ja kiintoainekset omana ongelmanaan.

Tavanomaisessa kalankasvatuksessa altaan vedenvaihdon määrittelee kalojen hapentarpeen tyydyttäminen. Kun kaloille annetaan virrata happikyllästykseltään noin 80-100 % luonnon vettä niin paljon, että kalojen hapentarve tulee tyydytetyksi, eivät mitkään kalan ruokinnasta riippuvat vedenlaatutekijät ole kriittisellä tasolla. (Eivät edes lähellä.)

2. Ravinnekuormitus

Kalanviljelyn aiheuttama ravinnekuormitus on ollut silmätikkuna, joskus aiheellisesti, mutta myös hyvin usein vain jonkinlaisen politiikan tekovälineenä. Tottahan on, että ravinteita pääsee vesistöön, mutta mistään likavedestä ei ole kysymys, sillä ravinteiden poistaminen ulosmenevästä vedestä ei onnistu juuri sen vuoksi, että vedet ovat liian puhtaita ja vesimäärät ovat suuria. Tyypillinen kalalaitoksen poistoveden fosforipitoisuus voisi olla 40-50 mikrogrammaa litrassa. Ainoa tapa, jolla läpivirtauslaitoksessa voidaan vettä käsitellä, on mekaaninen, laskeutus tai siivilöinti.

Tavanomainen viljelytekniikka verkkoaltainen pyrittäneen jatkossa toteuttamaan pitemmälle kehitetyillä rehudieeteillä, joissa kalan hyödynnettävissä olevan fosforin osuus tulee olemaan suurempi kuin nykyisin. Rehujen kehitystyön ja kalan rodunjalostamisen vaikutus ominaiskuormitukseen on kahdessakymmenessä vuodessa jo nyt vähentänyt ominaiskuormitusta noin kolmannekseen. Kokonaiskuormitus on vähentynyt vielä enemmän, sillä tuotannon volyyymi on nyt pienempi kuin silloin. Yleensä on katsottu, että vain fosforilla on merkitystä asiassa, mutta Itämeren osalta arvioidaan, että typpikin voi olla minimitekijänä. Ympäristöhallinnon tavoitteena on, että ominaiskuormitus saataisiin tasolle 4-5 g fosforia ja alle 40 g typpeä tuotettua kalakiloa kohti. Typen osalta raja on jo suurimmaksi osaksi selätetty, mutta fosforin osalta ei kaikkialla, joillakin paikoilla ja menetelmillä kylläkin.

3. Kehitysuunnat

Kala on vaihtolämpöinen eliö, jonka elintoimintojen vilkkautta ja samalla hapenkulutusta säätelee veden lämpötila. Vauhti kiihtyy noustaessa lähemmäs kullekin kalalajille ominaista optimilämpötilaa. Ylitettäessä optimi vauhti kyllä voi vielä lisääntyä, mutta muut riskit, esimerkiksi kalataudit, aiheuttavat ongelmia. Suomen oloissa tämä tarkoittaa sitä, että parhaat kasvuajat ovat touko- kesäkuu sekä toisena jaksona elokuun puoliväli- lokakuu. Muuna aikana vesi on liian lämmintä tai liian kylmää, jotta saavutettaisiin riittävä kasvu. Tehokas kasvukausi oikein hyvänä vuonna voi olla 6 kk, yleensä vähän lyhyempi. Veden lämpötilan säätäminen on kallista, vaatiihan esimerkiksi virtaama 100 l/s, jolla ylläpidetään kylmänä kautena noin 10 t kalaa, lämpötilan kohottamiseen yhdellä asteella yli 400 kW tehon. Käytännössä (pienpoikaskasvatusta lukuun ottamatta) on tyydyttävä siihen lämpötilaan, minkä luonto tarjoaa – ellei sitten oteta insinööriä apuun (kun muu ei auta) ja aleta vähentämään vedenkäyttöä ja soveltamaan erilaista vedenkäsittelytekniikkaa kalankasvatusveden laadun turvaamiseksi. Veden uudelleenkäyttö ja puhdistaminen tulee olemaan toinen linja, jota noudatetaan elinkeinoa kehitettäessä. Toinen suunta on pysyminen entisessä tekniikassa, kehittämällä rehujen ja kalojen ominaisuuksia ja ottamalla uusia kalalajeja viljelyyn.

4. Veden kierrätys kalankasvatuksessa

Kalan kasvua rajoittavat tekijät paljastuvat, kun tehdään testi, jossa vähennetään kala-altaaseen johdettavan vaihdettavan veden määrää ja vähennyksen aiheuttamat ongelmatilanteet aina korjataan tekniikalla.

Ensimmäinen rajoite on happi. Happea on helppoa ja melko edullistakin käyttää. Käytännössä kalan tarvitsema happi voidaan turvata niille, vaikka ei vaihdettaisi ollenkaan vettä. Hengittäessään kalat kuluttavat happea ja palamistuotteena on hiilidioksidi, jota syntyy 1,38g jokaista kulutettua happigrammaa kohti. Hiilidioksidi CO_2 altaan veteen kertyessään laskee sen pH arvoa ja tämän jatkuessa alkaa muuttua hiilihapoksi. pH:n laskiessa noin 5,5 paikkeille kalojen ongelmat alkavat tulla akuutisti esiin.

Muutosta torjutaan esimerkiksi ilmastamalla kala-altaan vettä suhteellisen voimakkaasti. Veteen kuplitettu ilma poistaa hiilidioksidia ja lisää samalla happea, mikäli ilmastettavassa altaassa hapen kyllästysarvo on alle 100 %. Toinen mahdollisuus on ilmastaa systeemissä kiertävää vettä, mutta tehokkainta on suoraan altaassa tehty ilmastus. Tämän käsittelyn ja mahdollisen puhtaan hapen avulla lähtökohtaiseen virtaamaan (verrataan läpivirtauslaitokseen) nähden tarvitaan vettä vain 1/5-1/10. Tämä vähennys sujuu hyvin, kunhan muistetaan, että kiintoainepitoisuus vedessä ei saa nousta liaksi. Hiilidioksidia ei saa olla yli 20 mg/l.

Kun edellisestä vielä pienennetään vaihdettavan veden virtaamaa, niin kalojen hyvinvointia ja kasvua alkaa rajoittaa veteen kertyvä ammoniakki, jota kala erittää pääasiassa kidustensa kautta ja myös osittain ulosteittensa mukana. Ammoniakki on myrkyllistä kaloille ollessaan vapaassa, ionisoitumattomassa muodossa jo pieninä pitoisuuksina. Matala pH-arvo vähentää ammoniakin myrkyllisyyttä. Kun ammoniakin pitoisuus alkaa nousta, käytetään vastalääkkeeksi bioreaktoria, jolla nitrifikaation avulla muutetaan ammonium nitriitin kautta nitraatiksi, mikä on käytännössä ilmenevissä pitoisuuksissa vaaraton yhdiste kaloille. Tämän osan ollessa toiminnassa mukana voidaan veden virtaamaa pienentää niin, että kokonaisvedentarve tuotettua kalakiloa kohti on noin 500-1000 litraa.

Mikäli tästä vielä pienennetään vedenvaihtoa, käy niin, että pitoisuuksia alkaa kertyä systeemiin liikaa ja prosessi ylikuormittuu, jolloin bioreaktorin toiminta heikentyy ja saattaa romahtaa. Lähes täydellinen vedenkierto on mahdollinen, jos systeemiin liitetään vielä anaerobinen prosessivaihe eli denitrifikaatio, jonka avulla nitraatti muuntuu vapaaksi typeksi. Kasvatuksessa syntyvä kiinteä ja laskeutuva aine käytetään hiilenlähteenä ja tarvittaessa metanolilisäyksellä tuodaan puuttuva hiili prosessiin. Denitrifikaation kautta virtaa vain pieni osa kiertävästä virtaamasta. Viipymä voi olla kahden tunnin luokkaa, jolloin päästään lähes hapettomiin olosuhteisiin. Reaktorista ulos tuleva vesi suodatetaan ja ilmastetaan ennen johtamista takaisin kala-altaan kiertoön. Koska denitrifikaatio nostaa alkaliniteettia, on se siltäkin osalta hyödyllinen kiertovesijärjestelmän osana. Tosin denitrifikaation on toimittava kunnolla, ettei aiheuteta nitriitin pitoisuuden kohoamista. Tämän riskin takia sitä ei ole vielä uskallettu laajemmin käyttää.

5. Menetelmän hyödyt ja haitat

Tämän menetelmän käyttäminen vaatii energiaa ja sen käytön optimointi hyvän kasvatustuloksen aikaansaamiseksi mahdollisimman pienin kustannuksin on tärkein kiertovesilaitoksen taloudellisuuteen vaikuttava tekijä. Koska laitoksen läpivirtaus voidaan pienentää lukemiin, joissa veden lämpötilan säätö tulee teknisesti ja taloudellisesti mahdolliseksi, voidaan kasvukautta jatkaa ympärivuotiseksi. Näin voidaan vähentää tiettyjä yksikkökustannuksia ja hyödyntää esimerkiksi hukkaenergiaa. Käytännössä noin puolet kasvatusajasta saadaan lohkaistua pois, tarkoittaen kaksinkertaista tuotantoa samoilla välineillä.

Kun virtaama pienenee, niin veden ravinnepitoisuus kasvaa tasolle, jolla veden puhdistuskeinot ovat käytettävissä sekä teknisessä mielessä, että myös kustannuksien puolesta. Vesien suojelemaan tästä tulee ajan mittaan ehkä merkittävä näkökulma.

Mikäli prosessi on hyvin hallinnassa, tarkoittaa menetelmän käyttö myös turvallisuutta kalojen terveyden suhteen. Monet kalojen taudit ovat torjuttavissa nimenomaan sillä, että vesilähde on turvallinen. On tietysti helpompi hankkia pieni määrä turvallista vettä kuin iso määrä.

Kun vedenlaatu on säädeltävissä lähinnä lämpötilan suhteen, voidaan kasvattaa erilaisia, jopa eksoottisiakin kalalajeja, koska olosuhteet voidaan järjestää niille sopiviksi. Suomen ilmasto-oloissa tarvitaan järjestelmän suojaksi rakennus, jotta olosuhteet olisivat säädeltävissä.

Koska käyttö ei onnistu ilman koulutusta ja harjoittelua, on voimavaroja järjestettävä opetukseen oppilaitoksissa ja työssä oppimisessa.

Joka tapauksessa menetelmä on sen arvoinen, että sitä kehitetään eteenpäin selkeänä tavoitteena pienentää tuotannon ympäristövaikutukset kokonaisuutena mahdollisimman pienen ”jalanjäljen” jättäväksi. Vedenkäsittelyn kokonaisuuden energian optimointi vedenlaatuvaatimusten mukaan on vedenkäsittelypaketin tutkimisen päämäärä.

6. Vedenlaatuvaatimukset

Kalojen kannalta seuraavat raja-arvot allasvedelle ovat mitoituksessa noudatettavia (makeassa vedessä)

Ammoniakki NH ₃ -N(vapaa)	0,01 mg/l
Nitriitti NO ₂ -N	0,5 mg/l
Hiilidioksidi CO ₂	20 mg/l
pH-arvo	6,5 – 7,2
Kiintoaine	mahd. vähän
Alkaliniteetti	0,2 mmol/l
Happi O ₂	7 mg/l eli noin 70-80 %-kyll.

Koska pH:n ollessa neutraaliarvon alapuolella vapaan ammoniakkin osuus kokonaisammoniumtypestä (TAN, total ammonia nitrogen) on hyvin pieni, pyritään kalankasvatuksen kiertovesisysteemeissä siihen, että ollaan alle pH 7,2 :n. Näin vapaasta ammoniakista ei juurikaan käytännössä ole harmia. Vapaan ja ionisoituneen ammoniakkin osuudet voidaan laskea kaavalla:

$$\text{NH}_3\text{-N}_{(\text{osuus})} = \frac{1}{1 + 10^{(10,068 - 0,033T - \text{pH})}} \times \text{TAN}$$

Kalanrehut sisältävät tyyppiä noin 60 g kilossa, joista kalaan sitoutuu osa ja osa poistuu allaslietteen mukana. Veteen lasketaan jäävän noin 30 g ruokittua rehukiloa kohti. Koska nitriitti on hankalin tyyppiyhdiste kaloille, on erityisesti systeemin käynnistysvaiheessa oltava tarkkana ja valvottava nitriitin tasoa. Tarvittaessa lisätään laimennusta vaihtamalla enemmän vettä. Kalat reagoivat nitriittiin erittäin limaa, joten tilanteen kehittymistä voi arvioida myös veden sameudesta. Tosin erityistä voi aiheutua muistakin syistä, mutta kiertovesisysteemeissä nitriitti voi olla yksi todennäköisimmistä. Nitriitti on siedettävämpää kaloille, jos pH on emäksisellä puolella ja jos vedessä on klorideja ja bikarbonaatteja. Suolaisessa vedessä sieto on moninkertainen, makeassa vedessä raja-arvot ovat alle 0,5 mg/l (NO₂-N). Erilaisia lukuarvoja on esitetty hyvin paljon, mutta tärkeintä on, että pyritään pienimpään mahdolliseen pitoisuuteen. Käytännössä haetaan pH:n suhteen lähinnä neutraalia aluetta.

Hiilidioksidia syntyy sivutuotteena sekä kalan että bakteerien metaboliassa. Yksi gramma kulutettua happea tarkoittaa 1,38 g tuotettua hiilidioksidia kalan hengityksen kautta. Lisäksi hiilidioksidia tulee nitrifikaatiossa ammoniumin hapettamisessa nitraatiksi niin, että yksi gramma hapetettua NH₄⁺-N saa aikaan 5,97 g hiilidioksidia. Hiilidioksidin ylärajana pidetään noin 20 mg/l.

Kiertävän veden puskurikyky vähenee nitrifikaation kuluttaessa alkaliniteettia. Jokaista grammaa ammoniakkia NH₄⁺-N, joka hapettuu nitraatiksi NO₃-N, kuluu 7,14 g alkaliniteettia CaCO₃ :na laskettuna. Heikosti puskuroiduissa pintavesissä ja nostettaessa kierrätysuhdetta, tulee useimmiten tarve lisätä alkaliniteettia annostelemalla esimerkiksi ruokasoodaa (NaHCO₃) kiertoveteen. Vähimmäispitoisuudeksi on esitetty 20-50 mg/l –CaCO₃ eli 0,4 – 1,0 mmol/l.

Kiintoaineelle ei ole selkeitä raja-arvoja, mutta yleensä se pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, koska sillä on erilaisia haittavaikutuksia kaloille. Lisäksi heterotrofinen bakteerikasvu lisääntyy kiintoainemäärän myötä. Samoin nitrifikaatioreaktorien pintoihin voi alkaa kasvaa myös ei-toivottua bakteerimassaa. Laskeutuva aines otetaan kiinni esimerkiksi pystyselkeyttimen avulla ja kiertävä vesi siivilöidään rumpusuodattimella käyttäen 40 -100 mikrometrin suodatinverkkoa.

Koska vesi kiertää järjestelmässä niin tehokkaasti, että kaikki kalojen ja vedenkäsittelyn tarvitsema happi on lisättävä veteen keinollisesti, pyritään happipitoisuus säilyttämään riittävän korkeissa lukemissa (esim. kala-altaassa 70 % kyllästyksen paikkeilla), jolloin kalat viihtyvät hyvin ja nitrifikaatioreaktoriin tulevassa vedessä on nitrifikaation tarvitsema happi käytettävissä. Jotta tämä onnistuisi, on veteen lähes jokaisessa kierrätyslaitoksessa liuotettava puhdasta happea.

Raakaveden hyvä laatu säästää vedenkäsittelyssä.

7. Nitrifikaatio

Suurin osa kiertovesilaitoksista toimii pelkästään nitrifikaatioon perustuvan biologisen käsittelyn avulla. Systeemiin vaihdetaan vettä sen verran, että pysytään hankalien tyyppiyhdisteiden pitoisuuksissa turvallisella alueella.

Kaavamaisesti esitettynä nitrifikaatiota käsitellään kahden bakteerisuvun yhteisen toiminnan tuloksena:

Nitrifikaatio



Bakteerit käyttävät reaktioissa syntyvän energian solumassan tuottamiseen, mutta koska tämä tapahtuu hitaasti ja tehottomasti, nitrifioivien bakteerien kasvu on myös hidasta. Tämän vuoksi nitrifikaatioreaktoreissa käytetään kantoaineena erityyppisiä materiaaleja, joilla tarjotaan mahdollisimman paljon pinta-alaa bakteerien asettua ja saadaan riittävästi toimivaa biofilmiä käsittelemään tuleva ammoniakkikuorma. Nitrifikaation käynnistymistä seurataan mittaamalla kiertävän veden tyyppiyhdisteiden pitoisuuksia. Koska veden lämpötila vaikuttaa bakteerien kasvunopeuteen, on kalanviljelyn yleensä viileissä vesissä varauduttava melko pitkään käynnistysaikoihin. Noin 20°C lämpöisessä vedessä käynnistyminen vie ainakin kuukauden ja jos ollaan lähempänä kymmentä astetta kestää käynnistys kaksi – kolme kuukautta.

Käynnistysvaihe on yleensä hankalin ja vaatii huolellista seurantaa. Samanaikaisesti tutkitut ammoniakki ja nitriitti kertovat muutoksillaan, että prosessi on lähtenyt käyntiin ja reaktion ovat saaneet aikaan halutut bakteerit. Nitrifikaatio käynnistetään yleensä ottamalla altaaseen kohtuullinen määrä kalaa ja ruokkimalla sitä normaalisti. Ensimmäisellä kerralla luotetaan siihen, että luonnon vesistä valikoituu ajan kanssa oikea bakteeripopulaatio reaktioita hoitamaan.

Myöhemmin, kun ollaan varmoja ympin turvallisuudesta kalatautien osalta, voidaan käynnistystä nopeuttaa siirtämällä valmista biofilmiä uuteen reaktoriin. Alussa veden vaihto pidetään sellaisella tasolla, että laskennallisesti tiedetään oltavan turvallisissa pitoisuuksissa. Asia varmistetaan mittauksin. Kun todetaan nitriitin kertymistä, ollaan erityisen tarkkana ja seurataan kalojen käyttäytymistä sekä muita vedenlaatutekijöitä, kuten pH-arvoa.

Kun on todettu, että nitrifikaatio toimii, huolehditaan siitä, että olosuhteet pysyvät sen jälkeen hyvinä sekä kaloille että biofilmille. Kaikki liian äkilliset muutokset ovat haitallisia. Lääkeaineet, jos lääkintään joudutaan, voivat aiheuttaa ongelmia (onneksi se on harvinaista). Nitrifikaatioon tuleva vesi on mekaanisesti melko hyvin käsiteltyä laskeutuksen ja siivilöinnin takia.

Vedenlaatututkimusten väliä voidaan harventaa, kun kokemusta kertyy. Kuitenkin kerran kuukaudessa tai kahdessa viikossa on hyvä tarkastaa tilanne.

8. Kalanviljelyyn soveltuvat nitrifikaatioreaktorit

Yleistä

Koska ravinne- ja kiintoainepitoisuudet nousevat kierrätettäessä, aikaansaadaan bioreaktoreissa biofilmin kasvua ja myös ei-toivottua heterotrofista bakteerikasvua sekä partikkeleiden tarttumista toisiinsa, tulee valita sellaiset reaktorityypit, joiden avulla käsiteltävän veden virtaus jakautuu koko ajan tasaisesti biofilmin eri osiin, kantoaineen pinnat pysyvät suhteellisen puhtaina ja ovat tarvittaessa helposti puhdistettavissa. Koska veden kierto vaatii pumppausta tavalla tai toisella, pyritään reaktoreissa pieneen virtausvastukseen. Kantoaineen mahdollisimman suuri ominaispinta-ala johtaa pienempiin laitemitoituksiin.

Vedenalainen bioblokkireaktori

Tämä on eräs ensimmäisistä kaupallisista sovellutuksista kalanviljelyyn. Reaktori on yleensä laatikkomainen, johon kuution muotoiset bioblokkit (pitkät papiljottityyppiset) on upotettu. Virtaus voi kulkea ylös tai alas, miksei sivuttainkin. Ominaispinta-ala on luokkaa 150- 250 m²/m³, mistä syystä tämän tyyppinen bioreaktori vie suhteellisen paljon tilaa. Allasrakenteena on käytetty esimerkiksi betonista kuutiomaista säiliötä. Usein syvyyttä on useita metrejä, joten säiliön tulee olla jäykkää materiaalia.

Reaktori puhdistetaan aika ajoin useimmin vastavirtahuuhtelemalla ja ravistelemalla blokkeja esim. ilman avulla. Virtausvastus on olematon, koska virtaus on hyvin hidas.

Trickling reaktori

Tästä tyyppistä on käytetty erilaisia versioita ja joissain tapauksissa tämä voi olla kahden peräkkäisen reaktorin sarjassa yleensä jälkimmäisenä, koska tarvittaessa tätä tyyppiä voidaan myös käyttää oman toimensa ohella hapen liuottimena ilmastamalla. Säiliö voi olla joko pyöreä tai neliskulmainen. Yleensä siihen kuuluu alaosan säiliö, johon vesi putoaa yläosan vedenpinnan yläpuolisen bioblokkipaketin tai muun putoavaa vettä hyvin pirskontavan materiaalin lävitse. Bioblokkien ominaispinta-ala on 150-250 m²/m³. Paine korkeutta tässä menetetään noin 3-4 m, mutta toisaalta korkeus on myös hyödynnettävissä hiilidioksidin ilmastamiseen pois vedestä juuri ennen veden palauttamista kala-altaaseen.

Kelluva ilmastettu peti

Reaktorisäiliö voi olla muodoltaan hyvin erilainen riippuen asennuspaikasta. Kantoaineena käytetään esimerkiksi tarkoitukseen erikseen suunniteltuja muovikappaleita, joilla haetaan mahdollisimman suurta ominaispinta-alaa. Noin 700-800 m²/m³ on ilmoitettu tehokkaaksi ominaispinta-alaksi. Petiä yleensä ilmastetaan jatkuvasti suhteellisen voimakkaasti. Muovipatjan paksuus riippuu myös ilmastuksen voimakkuudesta, koska koko peti olisi saatava liikkumaan ja vedenvaihto onnistumaan. Koska petiin puhalletaan ilmaa, on sen hapensaanti hyvin turvattu ja nitrifikaation toiminnasta on hyvät kokemukset. On myös käytetty muovitehtaille valmistuksen raaka-aineeksi tuotettua pellettiä, jonka halkaisija on muutaman millin luokkaa. Se on myös käyttökelpoista, mutta melko herkkää kulkeutumaan kiertoveden mukana ympäri laitoksen.

Ominaispaino näillä on yleensä 0,92-0,96, joten ne kelluvat niin, että pinta on hiukan veden päällä. Reaktoreita on sekä vaakavirtaukselle että ylhäältä alaspäin tai alhaalta ylöspäin suuntautuvalla. Virtaushäviötä ei juurikaan synny, mutta energiaa kuluu petin ilmastamiseen.

Fluidized (leijupeti) reaktori

Virtaussuunta vertikaalisessa reaktorissa on alhaalta ylös. Muodoltaan allas voi olla pyöreä tai nelikulmainen. Tärkeintä on, että vesi voidaan jakaa hyvin tasaisesti leijuttamaan hiekkapatjaa ja että koko patja on varmasti mukana liikkeessä. Laajapohjaisissa säiliöissä tämä ei ole helposti toteutettavissa. Suppilomaisella pohjalla on erikoisrakenteilla mahdollista saada peti liikkeelle, mutta ilmeisen nerokkaana pohjanmallina voidaan pitää Yhdysvalloissa kehitettyä Cyclo Bio (Marine Biotech Inc.) reaktoria, jossa vesi syötetään pohjan reunoilta ensiksi ulkovaippaa vauhdilla kiertäen ja sen jälkeen alhaalla olevan, säiliötä kiertävän raon kautta säiliöön, missä nopea virtaus saa hiekan liikkeelle ja pitkin negatiivista kartionpintaa nousemaan leijuntaan. Suomessa on käytössä muovirakenteisia (PE-rotatiovalettuja) ja lasikuitulujitteisia säiliöitä. Hiekan raekoko on keskimäärin alle millimetrin ehkä noin 0,5 mm. Ominaispinta-ala lisääntyy, kun raekoko pienenee ja hiekillä onkin teoreettisesti laskettuna huima ominaispinta-ala eli on luokkaa 10000-20000 m²/m³. Käytännössä kaikki pinta ei ole hyötöpintaa, sillä leijuessaan hiekka hankautuu ja osa biofilmistä lähtee kiertoan virtauksen mukana. Hiekkakerroksen annetaan laajentua käyttötilanteessa enintään noin kaksinkertaiseksi. Tällöin virtausvastusta syntyy hiekan leijuttamisesta suunnilleen hiekkapatjan paksuuden verran. Viipymä säiliössä on yleensä muutamia minutteja. Leijupetin jälkeen vesi on ilmastettava ja myös happea tulee lisätä niin, että altaaseen yleensä menee hapen suhteen ylikyllästeistä vettä. Leijupetiin voidaan käyttää myös muovirakeita, mutta niiden on oltava ominaispainoltaan selvästi yli yhden.

Muut reaktorit

Erilaisia reaktorityyppejä on käytössä lukuisia ja kaikkia ei välttämättä vielä ole nähty. Bioreaktoreja voidaan käyttää myös mekaaniseen suodatukseen, jolloin työvaiheen aikana peti pysyy paikoillaan ja puhdistettaessa kantoaine saa rajun käsittelyn, jolloin partikkelit irtoavat ja ne vastavirtahuuhdellaan pois. Tyyppi on käyttökelpoinen pienemmissä kohteissa, esimerkiksi laboratorioissa. Puhdistusvaihe voidaan hoitaa automaattisesti ajastimen tai paine-eron laukaisemana.

Pyörivä biokontaktori toimii niin, että pyörivään rumpuun asennettu materiaali uppoaa joka kierroksella veteen ja tulee ylös, jolloin pinnat saavat hyvin ilmasta happea. Näitä paketteja voidaan koota erilaisista aineksista, bioblokkien papiljoteista, palloista, vierekkäin asetetuista levyistä jne. Ominaispinta-ala 200-300 m²/m³.

9. Mitoituksesta

Mitoitusta varten olemassa oleva aineisto on osittain vaihtelevaa ja osittain laitevalmistajien omaa tietoa. On kuitenkin esitetty joitakin arvoja, joiden avulla saa käsityksen suuruusluokasta. Nitrifikaation toimintateho on niin monesta tekijästä riippuvainen ja erilaisia bioreaktoreita on niin monia, että kirjavuus aiheuttaa myös tietoihin vaihtelua. Laskelmissa voi olettaa kokonais-ammoniakin (TAN-N) määrän ruokittua rehukiloa kohden olevan noin 60 g, jolloin on turvallinen varamarginaali laskelmiin.

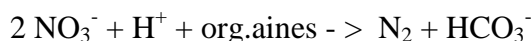
<u>Tyyppi</u>	<u>kantoaineen ominaispinta</u> <u>m²/m³</u>	<u>nitrifikaatio teho</u> <u>gTAN/m²/vrk</u>	<u>gTAN/m³/vrk</u>
<i>Trickling</i>	200	0,45	90
<i>Kelluva peti ilmastettu</i>	500-800	0,60	300-500
<i>Fluidized Leijupeti</i>	5000	0,1	500-800

Toisaalta mitoitus määräytyy myös hydraulisen kuorman perusteella niin, että esimerkiksi suodatinhiekkä pysyy suodattimessa ja samoin kelluvat muovikappaleet. Trickling reaktorissa pintakuorma voisi olla arviolta 10 - 20 m/h, kelluvassa petissä 40 m/h ja leijupetissä 80-100 m/h.

10. Denitrifikaatio

Denitrifikaatiossa typpi pelkistyy kaasuksi vähähappisissa olosuhteissa ja kupliintuu pois käsitellystä vedestä. Denitrifioivat bakteerit ovat heterotrofisia ja ne tarvitsevat hiiltä. Kalanviljelyn kiertovesitykseen denitrifikaatioreaktori sijoitetaan yleensä sivukiertona. Systemin kerätyt lietteet pumpataan reaktoriin, jotta saadaan kulutetuksi happi pois käsiteltävästä vedestä. Usein tämä ei riitä hiilen lähteeksi, vaan käytetään metanolia lisänä.

Reaktiot, kun hiilenlähteenä on orgaaninen aines:



Hiilenlähteenä metanoli:



11. Hapetuksen energiatarkastelu

11.1 Perusteet

Hapetus kokonaisuutena jaetaan kahteen osaan, hapen hankintaan ja hapen liuottamiseen veteen. Tässä arvioissa oletetaan, että happi hankitaan valmiiksi tehtynä nestehappena ja sen kustannus oletetaan suunnilleen päivän hintaan. Laskelmalle on otettu seuraavat lähtöarvot:

- 1) Altaille menevän veden happikyllästeisyyden oletetaan olevan 90 % ilman hapetusta bioreaktorin ja kalojen tuottaman hiilidioksidin poiston vaatiman ilmastuksen seurauksena.
- 2) Vertailukohtana oletetaan, että suoraan altaissa tapahtuva hapen liuotus keraamisilla hapettimilla on hyötysuhteeltaan 75 %, mikäli altaan syvyys on ainakin 2 m.
- 3) Jos veden lämpötila on yli 20°C, tulee menoveden happikyllästeisyyden olla vähintään 140 %.

- 4) Kiertovesisysteemin kokonaishapentarpeeksi oletetaan 750 g happea ruokittua rehukiloa kohti. Kalan hapentarve on noin 250 g kasvukiloa kohti.
- 5) Hiilidioksidin maksimiarvoksi altaassa otetaan 15 mg/l ja altaassa ei ole ilmastusta itsessään. Kun happea systeemissä kuluu, syntyy hiilidioksidia 1,38 -kertaisesti.

Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että altaassa on 10 tonnia kalaa ja veden lämpötilat ovat vaihtoehtoisesti 15 astetta tai 22 astetta.

Lämpötila 15°C

Otetaan sallituksi hiilidioksidin CO₂ muutokseksi 10 mg/l altaassa kiertävässä vedessä. Ruokinnan oletetaan olevan 1,0 % vuorokaudessa kalamassasta eli 100 kg. Rehukertoimen oletetaan olevan 1,0.

Tällöin altaan minimivirtaama on:

$$Q_{\min} = 1,38 \times (100 \text{ kg} \times 250000 \text{ mg}) / (10 \text{ mg/l} \times 86400 \text{ s}) = 29 \times 1,38 \text{ l/s} = 40 \text{ l/s}$$

Riittävän hapen turvaamiseksi tuloveteen tulee liuottaa happea (jos tulevassa vedessä on valmiina 90 % ja poistuvassa tulee olla vähintään 70 %, joiden erotus 2 mg/l) :

$$O_2\text{-nosto} = (25000000 / 40 \times 86400) - 2 \text{ mg/l} = 5,23 \text{ mg/l.}$$

Koska oletetaan, että altaassa tapahtuu muutakin hapenkulutusta kuin kalojen, otetaan 30 % varmuusmarginaali eli $1,3 \times 5,23 \text{ mg/l} = 6,8 \text{ mg/l}$.

Biologisen vedenkäsittelyn vaatima hapentarve lasketaan nitraatiksi hapetetun ammoniakkin tuotannon mukaan seuraavasti:

Ammonium typpi hapettuessaan nitraattitypeksi vaatii 4,57 g happea jokaista grammaa kohti. Laskennallisesti käytetään erilaisia arvoja kalankasvun tuottamasta ammoniakkin määrästä. Tähän laskelmaan otetaan arviot 30 ja 60 g/kalakilo.

Vuorokausiruokinta 100 kg eli ammoniakkia 30 g:n mukaan $30\,000 \text{ mg} \times 100 \times 4,57 \text{ gO}_2 = 13710000 \text{ mgO}_2/\text{vrk}$. Jos otetaan laskupohjaksi 60 g per kalakilo, saadaan $27420000 \text{ gO}_2/\text{vrk}$. Virtaamaan suhteutettuna nämä kulutukset ovat 4 mg/l ja 8mg/l.

Lisäksi systeemissä on myös jonkin verran heterotrofista bakteerikasvua, mikä kuluttaa happea, mikä olikin otettu huomioon jo kala-altaan hapentarpeen osalta, joten edellisten lisäksi lasketaan 2 mg/l tähän tarpeeseen.

Näin ollen kokonaishapenlisäystarve on (kala-allas + bioreaktori+ muu) välillä $= (6,8+4 + 2) \text{ mg/l} = \mathbf{12,8 \text{ mg/l}}$ ---- $(6,8 + 8 +2)\text{mg/l} = \mathbf{16,8 \text{ mg/l}}$.

Mitoituksessa oletetaan hapentarve yleensä tätä suuremmaksi.

Lämpötila 22°C

Arvioidaan korkeamman lämpötilan johtavan suurempaan ruokintasuhteeseen pitäen muuten samana alkukohtia. Ruokintaprosentiksi otetaan laskelmaa varten 1,35 %/vrk. Vastaavasti kuin edellisessä laskelmassa saadaan:

Rehun määräksi vuorokaudessa 135 kg. Altaan minimivirtaama hiilidioksidin muutoksen altaassa ollessa sama 10 mg saadaan laskemalla

$$Q_{\min} = 1,38 (135 \text{ kg} \times 250000 \text{ mg/kg}) / (10 \text{ mg/l} \times 86400 \text{ s}) = 1,38 \times 39 \text{ l/s} = 53,9 \text{ l/s}$$

Hapen liuotus samalla periaatteella kuin edellä antaa saman tuloksen happipitoisuudelle, koska virtaama kasvoi samassa suhteessa kuin ruokintakin.

11.2 Hapetus painehapettimella

Painehapettimen hyötysuhteeksi oletetaan 90 %.

Energian tarve muodostuu hapettimen paineesta ja virtaamasta eli pumppauksen vaatimasta energiasta. Näissä laskelmissa otetaan reaktorin paineeksi 1-2 bar, joka on keskimäärin käytetty paine tämän tyyppin hapettimissa. Painehapettimen avulla otetaan kyllästysarvoksi 250 %.

11.3 Hapetus paineettomalla kolonnilla

Kolonnin hyötysuhteeksi oletetaan 85 %.

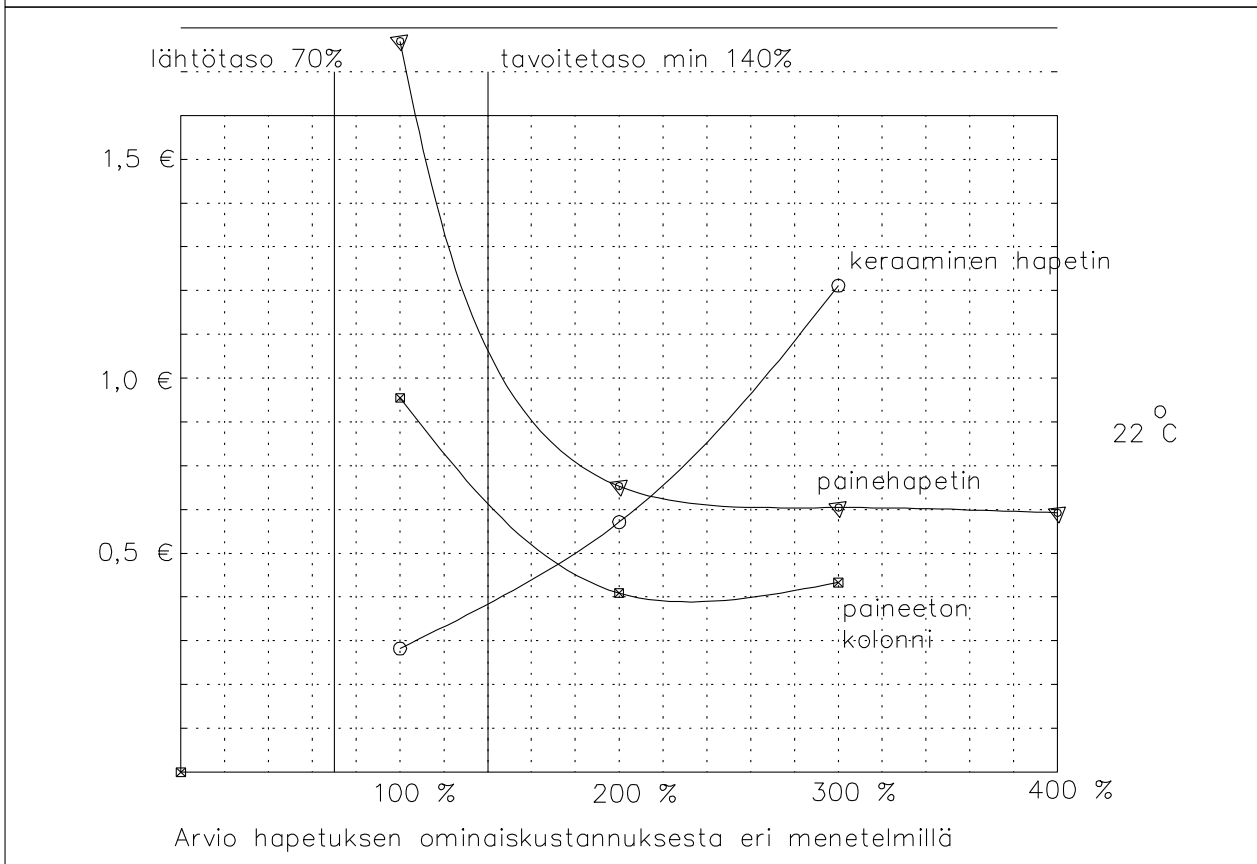
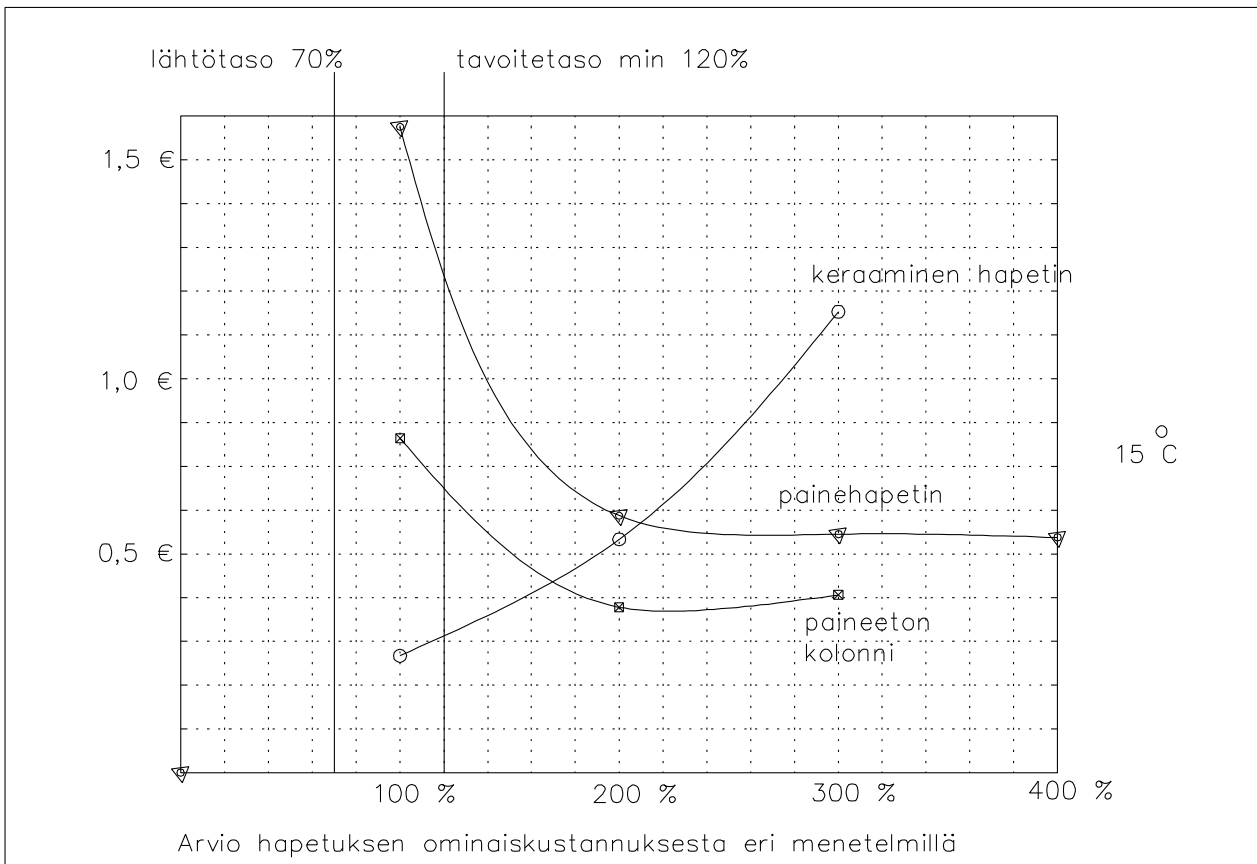
Energian tarve muodostuu suoraan nostokorkeudesta ja virtaamasta eli pumppauksen vaatimasta energiasta. Kolonnin avulla saatavaksi happitasoksi otetaan 180 %.

11.4 Hapetus suoraan kala-altaaseen

Diffusorin hyötysuhteena voidaan laskelmia varten pitää noin 70 %, mikäli kala-altaan happikyllästeisyys on luokkaa 70 %, kuten yleensä vaaditaan poistovedeltä.

Energiaa tässä ei tarvita, koska lasketaan, että happi tulee valmiiksi paineistettuna eli hyötysuhteen vaikutus on kustannuksien muuttuvana tekijänä.

Vertailu on esitetty kuvaajina seuraavalla sivulla.



11.5 Bioreaktoryypin vaikutus hapentarpeeseen

11.5.1 Trickling reaktori

Trickling reaktori, jossa esimerkiksi kennoston läpi tapahtuvalla veden valutuksella saadaan vesi uudelleen kiertoon hyvin ilmastettuna, tuottaa noin 85-90 % -kyllästeiseksi hapetettua vettä kiertoon. Yleensä käytetään vastavirtausta niin, että veden pudotessa ilma virtaa vastaan ylöspäin.

11.5.2 Fluidized bed

Fluidized bed on reaktori, johon ei voi syöttää ilmaa eikä happea, koska kaasukuplat tarttuisivat pieniin hiekanmuruihin ja keventäisivät niitä niin, että niitä lähtisi virtauksen mukana pois reaktorista. Tällaiseen reaktoriin menevän veden on sisällettävä happi, jonka reaktorin toiminta käyttää. Käytännössä reaktorin virtaama vaihtaa reaktorin veden muutamassa minuutissa. Arvioidaan edellä tehdyn laskelman perusteella, että reaktorin kuluttama happi on noin puolet kalojen kuluttamasta määrästä.

Pumppauksen vaatima energia riippuu varsinaisesti hiekkapatjan paksuudesta sekä hiukan myös hiekan raakoosta. Laskennallisesti voi käyttää arvoa, joka saadaan, kun hiekkapatjan paksuus kerrotaan kahdella. Kun fluidized suodattimen yhteydessä on käytettävä erillistä menetelmää hiilidioksidin poistamiseksi ja hapen lisäämiseksi, vaikuttaa näitä varten tehty ratkaisu lopullisesti pumpun mitoitukseen.

11.5.3 Moving bed

Moving bed reaktori on tavallisesti ilmastettu puhaltimen ja ilmanhajotusputkiston avulla. Oletus, että saavutettava kyllästysaste on 85 %. Puhallettu ilmanvirtaama on vähintään yhtä suuri kuin vedenvirtaama ja puhallin mitoitetaan reaktorialtaan syvyyden perusteella. Virtaus moving bed reaktorin läpi vaatii pumppaukseen vaikuttavaa putouskorkeutta vähimmillään noin 0,3 - 0,5 m.

11.5.4 Staattinen kelluva peti tai upotettu kennosto (Submerged)

Mikäli kantoaine on kokonaan veden alla, eikä sitä ilmasteta mitenkään, se kuluttaa happea kuten fluidized (leiju) peti. Virtaus suodattimen läpi ei yleisesti käytettävillä rakenteilla vaadi pumppauskorkeutta kuin vain sen verran, että vesi hiljalleen virtaa täytteen läpi. Pumppaus mitoitetaan staattisen nostokorkeuden perusteella. Reaktorin yhteydessä on käytettävä erillistä menetelmää hiilidioksidin poistamiseksi ja hapen lisäämiseksi. Näitä varten tehty ratkaisu vaikuttaa lopullisesti pumpun mitoitukseen.

12. Pumppauksen energian tarve

12.1 Nostokorkeus

Nostokorkeus vaikuttaa lineaarisesti energiantarpeeseen, mikäli pumpun hyötysuhteen arvo oletetaan vakioksi, kuten vertailulaskelmissa yleensä voidaan tehdä. Pumppua valittaessa on tärkeä valita toimintapisteen mukainen pumppu. Jatkuvasti käyvä pumppu kannattaa valita mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella, sillä jatkuvassa käytössä energiakustannuksissa saavutettava hyöty korvaa ajan kanssa mahdollisen korkeamman pumpun hinnan.

12.2 Virtaama

Virtaama vaikuttaa lineaarisesti energiantarpeeseen, mikäli pumpun hyötysuhteen arvo oletetaan vakioksi. Virtaama määräytyy hiilidioksiditason ja hapentarpeen perusteella.

12.3 Pumpun hyötysuhde ja tyyppi

Pumpun hyötysuhde eri virtaamille ja nostokorkeuksille tutkitaan pumpun ominaiskäyristä ja kohteeseen valitaan yleensä parhaalla hyötysuhteella toimiva pumppu. Virtaaman vaihtelu otetaan huomioon ja se, mikä on yleisimmin toteutuva käyttöpiste. Käytännössä tämä johtaa vertailuun eri pumpputyypin välillä lähinnä nostokorkeuden mukaan. Matalille nostokorkeuksille yleensä sopivat potkurityypiset pumput, ja jos on kyse veden siirtämisestä sitä juurikaan nostamatta, voidaan käyttää ns. mammut-pumppua veden pumppaukseen eli ilmapuhallinta, jolla ilma puhalletaan veden alle ja ilmapuhallin nousu siirtää vettä mukanaan.

Suurten vesimäärien siirtämiseen voidaan käyttää myös potkuripumppuja. Malleja on tarjolla sekä kokonaan veden alla toimivia, että kuivamoottorirakenteisia, joissa juoksupyörä on vedenpinnan alla, mutta moottori akselin päässä pinnan yläpuolella. Uppopumpun lämpöenergia siirtyy tehokkaimmin suoraan veteen.

13. Lämpötalous

13.1 Ilmanvaihto

Hiilidioksidin ylärajana huoneilmassa pidetään 1500 ppm. Ulkoilmassa on noin 350 ppm. Lasketaan 100 ruokintakiloa kohti syntyvän hiilidioksidia $100 \times 500 \text{ g} \times 1,38 = 69000 \text{ g}$. Laimennus 1500 ppm tasoon vaatii ilmanvaihtoa noin $1400 \text{ m}^3/\text{h}$. (Moolimassa 44 g/mol ja $1 \text{ mol} = 24,1 \text{ l}$.) Kun poistetaan vaihdettava ilma siten, että se menee ulos sellaisesta kohdasta, missä hiilidioksidipitoisuus on korkeimmillaan, voidaan ilmanvaihtoa selvästi pienentää. Arvioidaan sen olevan mitoitus varten noin $500\text{-}700 \text{ m}^3/\text{h}$ 100 kg:n vuorokausiruokintamäärää kohden.

Hapenkulutuksen korvaaminen vaatii ilmanvaihtoa olettaen puolet hapentarpeesta tulevan ilmasta, jolloin $100 \times 250 \text{ g} = 25000 \text{ g}$ vuorokaudessa, vaatien ilmanvaihtoa $20 \% \times 0,209 \times 1,4 \text{ kg} = 0,0145 \text{ kg/m}^3$. Kokonaisuudessa vuorokaudessa on $25000 \text{ g} / 14,5 \text{ g} = 1780 \text{ m}^3$ vuorokaudessa. Eli hapentarve tulee selkeästi tyydytetyksi, jos ilmanvaihto mitoitetaan hiilidioksidin poiston perusteella.

13.2 Eristys

Kasvatustalon eristys lasketaan seinien läpi kulkeutuvan lämmönhukan perusteella. Kuitenkin ilmanvaihdon kautta tarvittava energia on ratkaiseva, eikä kohtuullisesti eristetty rakennus vaadi suurempaa tarkastelua.

13.3 Ilmanvaihdon lämmön talteenotto

$1400 \text{ m}^3/\text{h}$ oleva ilmanvaihto vaatii lämpöenergiaa talvella, mikäli ulkona on 15 asteen pakkas ja sisällä on 18 astetta lämmintä yhteensä $(33 \times 1,2 \text{ kg} \times 1 \text{ kJ/kg C} \times 1400) / 3600 \text{ s} = 55440 / 3600 = 15,4 \text{ kW}$. Lämmön talteenotolla saavutetaan huomattava säästö, kun otetaan huomioon, että

tavanomainen ruokintamäärä on ainakin noin 500 kg/vrk kohtuullisen kokoisessa laitoksessa. Tulee pyrkiä noin 70 – 80 % lämmön talteenottoon ilmanvaihdossa.

13.4 Tuloveden lämmitys

Mikäli tuloveden lämpötilaa on nostettava, on tämäkin toteutettava lämpöä kierrättäen. Virtaama, joka olisi noin 500 l yhtä rehukiloa kohti, johtaisi 100 kg rehunkäytöllä vedenvaihtoon 50 m³/vrk, jolloin lämpötilan nosto esimerkiksi 20 °C:lla tarkoittaisi tehontarvetta 48 kW.

13.5 Lämmön talteenotto

Lämpöä voidaan kierrättää lämmönsiirtimen avulla noin 2/3, joten tarvittava lämpöenergia olisi tällöin 16 kW. Suuremmilla virtaamilla on mahdollisuus tehokkaampaankin lämmön talteenottoon, mutta tavanomaisilla pienillä virtauksilla talteenoton vaatima pumppaus vie hyötysuhteesta osansa.

13.6 Lämmön lähteet

Lämpöä voidaan saada muuten hukkaan menevänä energiana, jos laitos voidaan sijoittaa jonkin teollisuuslaitoksen yhteyteen. Tällaisia voivat olla eri tuotantolaitokset, joissa energian käyttö on runsasta tai joissa tarvitaan jäähdytystä jne.

Suora sähkö- tai esimerkiksi öljylämmitys ovat yleensä epätaloudellisia vaihtoehtoja.

Usein käytetty on lämpöpumppu, joka voi toimia hyödyntäen matalia lämpötiloja lämmönottoon ja siirtää keräämänsä lämmön veden lämmitykseen käyttäen sähköä noin kolmasosan siirtämästään energiasta.

Laitoksessa käyvien koneiden energiasta huomattava osa siirtyy lämpönä huoneeseen, mikäli ne ovat sijoitetut sisätilaan. Lämmön siirtäminen veteen tai sen siirtymisen estäminen vaatii ratkaisuja, joilla hukkaenergiaa voidaan hyödyntää laitoksen sisäisesti mahdollisimman tehokkaasti. Toisaalta kesäaikainen liikalämpö on saatava systeemistä ulos.

14. Hiilidioksidin poisto

14.1 Ilmastuksen tarve

Ilmastuksen tarkoituksena on palauttaa kaasutasapaino kiertovedessä. Veteen kertyneen hiilidioksidin poistaminen on tärkein syy ilmastukseen ja sen ohella samanaikaisesti vesi hapettuu.

14.2 Ilmastus bioreaktorissa

Ilmastavat bioreaktorit ovat moving bed ja trickling filter. Trickling –reaktorissa vesi putoaa kennoston läpi ja vastaan virtaava ilma tehokkaasti poistaa hiilidioksidia. Kaasu/vesi – suhteen tulee olla vähintään 5:1, mieluiten yli, jotta hiilidioksidi poistuisi hyvin. Trickling-reaktori on paras vaihtoehto, mikäli asiaa ajatellaan hiilidioksidin poistamisen ja nitrifikaation yhteistoiminnan kannalta.

Moving bed reaktoriin puhalletaan ilmaa kuplittaen sitä kelluvan muovikappalepedin läpi. Kappaleet kelluvat ja kuplat poreilevat läpi. Matalammilla kalatiheyksillä normaali ilmastusmäärä

yleensä riittää hiilidioksidin poistoon, mutta kun ollaan noin 100 kg/m^3 tiheyksissä, on lisättävä systeemiin muuta kaasunpoistoa. Ohjearvona on esitetty, että ilmamäärän olisi oltava noin kaksinkertainen moving bed reaktorin tilavuuteen nähden tunnissa.

14.3 Ilmastus altaassa

Ilmastus voidaan hoitaa myös suoraan kala-altaassa. Tietystikään altaaseen ei voi laittaa kovin paljon ilmastimia, koska se häittäisi kalojen pitoa altaassa. Etuna on se, että hiilidioksidia poistuu altaasta sitä mukaa, kun sitä syntyy. Menetelmiä ovat suora kuplitus ilman hajottajien kautta tai sitten allaskohtainen lisäkierto, jossa noin 1 barin paineella pumpataan ejektori-ilmastimeen altaan vettä, joka ilmastuu rajusti altaan vierellä olevassa laatikossa ja palaa takaisin altaaseen. Tätä tapaa on käytetty kierrätettäessä vettä altaassa ilman biologista käsittelyä. Tämä menetelmä on käyttökelpoisin matalissa lämpötiloissa ja kiertovesisysteemien yhteydessä todennäköisimmin suurten altaiden yhteydessä.

Puhaltimella puhallettava ilmamäärä on esimerkiksi noin kaksinkertainen altaan tilavuuteen nähden tunnissa ja puhallussyvyys tällöin noin 1 metri.

14.4 Ilmastus kolonnissa

Kolonnia käytetään ilmastukseen yleisesti. Kolonni vaatii nostokorkeutta noin 2,5 m tai mikäli halutaan alipaine tehostamaan kaasunpoistoa, noin 3,5m. Kolonneja voidaan käyttää myös hapetukseen ja otsonilla desinfiointiin. Ilmastumista voi tehostaa vastaan virtautettavalla ilmalla. Tämän lisäksi kolonnin alaosalla voi hapettaa puhtaalla hapella, samalla kun yläosa ilmastaa.

15. Eri tekijöiden riippuvuudet toisistaan

Vaadittavat toiminnot kiertovesijärjestelmässä ovat:

- 1) Altaiden veden vaihto
 - veden laadun turvaamiseksi niin, että kiintoaineen, ammoniakkin ja hiilidioksidin pitoisuudet eivät pääse haitallisesti nousemaan altaassa
 - riittävän happimäärän toimittamiseksi altaaseen
- 2) Lämpötilan säätö
 - ympärivuotisen kasvun aikaansaamiseksi
 - optimaalisen kasvatuslämpötilan järjestämiseksi
- 3) Kiintoaineen poisto kierrosta
 - kalojen terveyden ylläpitämiseksi lähinnä kidusbakteerien vähentämiseksi
 - heterotrofisen bakteeritoiminnan minimoimiseksi
 - bioreaktorin pintojen puhtaana pitämiseksi
- 4) Biologinen vedenkäsittely
 - kalojen erittämän ammoniakkin muuttamiseksi nitriitin kautta nitraatiksi hapettumisreaktiassa
- 5) Veden hapettaminen
 - riittävän hapen turvaamiseksi kaloille ja biologiselle puhdistusreaktiolle

- 6) Veden desinfiointikäsittely
- mahdollisten haittoja aiheuttavien bakteerien lisääntymisen kurissa pitämiseksi
- 7) Veden ilmastaminen
- hiilidioksidin poistamiseksi kiertävästä vedestä

Näiden lisäksi kierrossa voi olla typenpoisto, mutta se vaatii tekniikkaa, jota on vähemmän käytetty, eikä sitä voi käyttää ennen kuin muu järjestelmä on täysin hallinnassa. Typenpoiston voi sijoittaa aluksi poistoveden puhdistukseen ja sen jälkeen, kun menetelmä on hallinnassa, veden voi palauttaa kiertoon. Typenpoistoreaktorissa veden alkaliniteetti eli puskurikyky nousee.

Taulukko. Kiertovesityksen osa-alueet ja niiden riippuvuus toisistaan.

TOIMINTO	MENETELMÄ/LAITE	MAHDOLLISUUS HYÖD. TOISESSA TOIMINNOSSA	HUOMAUTUKSET
1 .ALTAIDEN VEDENVAIHTO	PUMPPAUS		
	1.AIRLIFT= MAMMUTP.	- ILMASTUS	CO ₂ poisto
		- HAPEN LISÄYS	Alle 100 % kyllästyksessä
		- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Huoneen ja koneiden lämpöä veteen puhalletun ilman mukana
	2.POTKURIPUMPPU	- HAPEN LISÄYS KOLONNILLA	Vaatii nostokorkeutta >4 m
		- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Uppomoottorinen
2. BIOLOGINEN VEDEN- KÄSITTELY	3. KESKIPAKOPUMPPU	-HAPEN LISÄYS PAINE- HAPETTIMELLA	Vaatii nostokorkeutta > 10m
		HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Uppomoottorinen
2. BIOLOGINEN VEDEN- KÄSITTELY	1. TRICKLING - REAKTORI	- ILMASTUS	CO ₂ poisto
		- HAPEN LISÄYS	Alle 100 % kyllästyksessä
		- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Huoneen ja koneiden lämpöä veteen ilmasta, joka virtaa reaktorin läpi ja johdetaan ulos.
		-JÄÄHDYTYS	Haihdunta reaktorissa jäähdyttää.
	2. MOVING BED	- ILMASTUS	CO ₂ poisto
		- HAPEN LISÄYS	Alle 100 % kyllästyksessä
		- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Huoneen ja koneiden lämpöä veteen ilmasta, joka puhalletaan reaktorin läpi ja johdetaan ulos.
	3. SUBMERGED	- KIINTOAINEN POISTO	Toimivat mekaanisen suodattimen tavoin adheesiovoimien pyydystäessä partikkeleita
	4. FLUIDIZED (leijupeti)		

3. HAPEN HANKINTA	1. NESTEHAAPPI	- OTSONOINTI	Otsonin raaka-aine.
	2. HAPPIGENERAATTORI	- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Kompressorin lämpö voidaan siirtää veteen tai ilmaan
		-OTSONOINTI	Otsonin raaka-aine.
4. VEDEN HAPETTAMINEN	1.KERAAMINEN DIFFUUSERI		
	2. HAPETUSKOLONNI	-OTSONOINTI	Otsonin liuotus paineettomasti
	3. PAINEHAPETIN	-OTSONOINTI	Otsonin liuotus ejektorilla käyttäen erillistä kiertoa
5. VEDEN LÄMMITTÄMINEN	1. SUORA LÄMMITIN		Sähkö, öljy... tms.
	2. LÄMPÖPUMPPU	-JÄÄHDYTYKS	Jos on samanaikainen jäähdytyksen ja lämmön tarve
		-HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Voidaan ottaa lämpöä ilmanvaihdosta ja poistovedestä.
	3. LÄMMÖNSIIRIN	-HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Lämpöä ulkopuolisesta lämmönlähteestä tai poistovedestä
6. VEDEN JÄÄHDYTTÄMINEN	1. KYLMÄKONE	VEDEN LÄMMITTÄMINEN	Jos on samanaikainen jäähdytyksen ja lämmön tarve.
	2. JÄÄHDYTYSTORNI	TRICKLING REAKTORI	
7. VEDEN DESINFOINTI	1. UV-LAITE	- HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	Kehittää lämpöä
	2. OTSONIGENERAATTORI		
	3. OTSONIREAKTORI	- ILMASTUS/HAPETUS	
8. HILIDIOKSIDIN POISTO	1. DIFFUUSERI	- ILMASTUS	hapen lisäys alle 100 %
	2. KOLONNI		hapen lisäys alle 100 %
	3. BIOFILTTERI		moving bed / trickling filter

16. Lopuksi

Energiaa kuluttavien vedenkäsittelyjen osalta hinnan vaikutus on täysin suoraviivainen. Ainoa hinnan menetelmävalintaan vaikuttava kohde on vedenhappipitoisuuden nostaminen puhtaalla hapella, jolloin vertailu tehdään generaattorilla tuotetun hapen ja ostetun nestehapen välillä.

Koska energiakustannus on merkittävä osa tuotantokustannuksista, tulee energiaa käyttävien järjestelmän osia vertailla kyseisen kohteen vaatimusten ja olosuhteiden perusteella.

Mahdollinen käytettävissä oleva hukkaenergia hyödynnetään veden tai huoneilman lämmityksessä.

Eri kalalajien lämpötila- ja vedenlaatuvaatimukset vaikuttavat valittaviin ratkaisuihin ja siten energiantarpeeseen.

Kaiken kaikkiaan tekijöitä, jotka vaikuttavat energiantarpeeseen, on paljon, joten eri kombinaatioiden vertailuun on paneuduttava huolellisesti. Yllä olevassa selvityksessä on esitelty perusteita eri vaihtoehtojen vertailua varten.