



Lämpötilan hallinnan mahdollisuudet ja kustannukset kalanviljelyn osittaiskierron konseptissa

Santeri Rukkila

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Rukkila, Santeri

Lämpötilanhallinnan mahdollisuudet ja kustannukset kalanviljelyn osittaiskiertokonseptissa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2022, 53 sivua

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: Suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Tavoitteena oli selvittää kalankasvatuksen osittaiskiertokonseptin lämpötilan hallinnan mahdollisuudet ja kustannukset. Osittaiskiertokasvatus on vaihtoehtoinen tapa kalankasvatukselle, joka pohjautuu kiertovesikasvatukseen. Kiertovesikasvatus on yleinen kalankasvatustapa, jossa vettä uudelleen kierrätetään kala-altaiden ja puhdistuslaitteiden välillä. Osittaiskiertokasvatuksessa vedenkäsittelyä on kevennetty jättämällä pois biologinen vedenpuhdistus. Osittaiskiertokasvatus on kompaktimpi ja investointikustannuksiltaan halvempi tapa kasvattaa kalaa, mutta vedenkulutus on siinä kiertovesikasvatusta suurempaa. Tämä voi lisätä käyttökustannuksia erityisesti lämpötilanhallinnassa.

Selvitettiin osittaiskiertokonseptin kala-altaiden lämpötilan hallinnan energiatarpeet energialaskujen avulla. Lämpötilan hallinnan mahdollisuuksien ja kustannusten selvittämisen myötä oli tarkoituksena luoda laskentamalli, jonka avulla voidaan kätevästi selvittää energiantarve prosessille eri vesimäärien kohdalla.

Opinnäytetyön tulokseksi saatiin laskentamallin, jonka avulla on mahdollista selvittää osittaiskiertokonseptin veden lämpötilan hallinnan energiakustannukset eri vesimäärillä. Laskentamallia voidaan hyödyntää järjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Opinnäytetyössä tuotettiin myös toimeksiantajalle eri kehitysideoita energiatehokkuuden kannalta kuten lämmön talteenotto sekä tarvittaessa ilmanvaihto.

Avainsanat (asiasanat)

Kalanviljely, Osittaiskiertokasvatus, Kiertovesikasvatus, Lämpötilan hallinta, Energialaskeminen, Kustannustehokkuus,

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1–7 on salassapidettävä ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 16.5.2027

Rukkila, Santeri

Possibilities and costs of temperature control in the partial circulation concept of fish farming

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2022, 53 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The aim is to find out the possibilities and costs of temperature control in the partial recirculation aquaculture system of fish farming. Partial recirculation aquaculture system is an alternative to fish farming based on recirculating aquaculture system. Recirculating aquaculture is a common method of fish farming in which water is recirculated between fish tanks and the purification equipment. In partial circulation systems biological water treatment is removed and water is pumped into the pool using a mammoth pump. Partial recirculation aquaculture is a more compact and investment wise less expensive way to grow fish, but again more expensive in terms of water consumption.

The energy needs of temperature control of fish tanks in the partial circulation concept are investigated using energy calculations. By exploring the possibilities and costs of temperature management, the aim is to create a calculation model that can be used to conveniently determine the energy demand for a process for different amounts of water.

The result of the thesis was a calculation model that makes it possible to determine the energy costs of controlling the water temperature of a partial cycle concept with different amounts of water. The calculation model can be used to improve the energy efficiency of the system. The thesis also produced various development ideas for the client in terms of energy efficiency, such as heat recovery and, if necessary, ventilation.

Keywords/tags (subjects)

Fish farming, Partial recirculation aquaculture system, Recirculation aquaculture system, Temperature control, Energy calculation, Cost-effectiveness,

Miscellaneous (Confidential information)

Annexes 1-7 are confidential and has been removed from public office. The basis for secrecy is Section 24 (17) of the Julkisuuslaki 621/1999, a company's business or professional secret. The period of secrecy is five (5) years, the secrecy period ends on May 16, 2027.

Lyhenteet

LUKE = Luonnonvarakeskus

l/s = litraa sekunnissa

°C = Celsius-aste

kWh = Kilowattitunti

HV = Hevosvoima

PPM = Partikkelia minuutissa

RAS = Kiertovesikasvatus

PRAS = Osittaiskiertokasvatus

FAO = Food and Agriculture of United Nations

Sisältö

1	Johdanto	9
2	Kehittämishanke	10
2.1	Perustietoa	10
2.2	Ongelma.....	10
2.3	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	11
2.4	Tutkimusmenetelmät	11
3	Kalanviljely	13
3.1	Perustietoa kalanviljelystä.....	13
3.2	Yhteiskunnalliset vaikutukset	15
3.3	Ympäristövaikutuksia	15
3.4	Lainsäädäntö ja luvat.....	17
4	Sisämaan kalanviljelymenetelmät.....	18
4.1	Kiertovesikasvatus	18
4.1.1	Perustietoa.....	18
4.1.2	Toiminta	21
4.1.3	Lämmönsäätö kiertovesilaitoksessa	24
4.2	Läpivirtauskalankasvatus.....	26
4.3	Osittaiskiertokasvatus	27
4.3.1	Perustietoa.....	27
4.3.2	Toiminta	28
4.3.3	Osittaiskiertokonseptin malliversio Yhdysvalloissa	29
5	Lämpötilan hallinta.....	31
5.1	Lämpötilan hallinnan merkitys kalankasvatuksessa.....	31
5.2	Laskennan lähtötiedot ja kaavat.....	33
5.3	Laskenta	35
5.3.1	Veden lämpötilanhallinta.....	35
5.3.2	Ilmanvaihto	38
6	Tulokset	39
6.1	Laskennan tulokset.....	39
6.2	Kehittämissideat.....	41
6.2.1	Jäteveden lämmön talteenotto	41
6.2.2	Ilmastointi	43

7	Investointi.....	44
7.1	Lämmönsiirrin.....	44
7.2	Lämpöpumppu	45
8	Johtopäätökset ja pohdinta.....	46
	Lähteet	49
	Liitteet	53

Kuvioluettelo

Kuvio 1.	Mannermaan kalankasvatusk laitoksen Suomessa vuonna 2020 (Lähde: Kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohje 2020.).....	14
Kuvio 2.	Typen ja fosforin ominaiskuormitus Manner-Suomen kalankasvatuksessa 1980–2016 (kg/tn tuotettua kalaa). (Lähde: Kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohje 2020, 21).....	17
Kuvio 3.	Tyypillinen kiertovesilaitos. (Lähde: Recirculating Aquaculture Systems n.d).....	20
Kuvio 4.	Tyypillinen kiertoprosessi. (Lähde: Disrupting traditional aquaculture with Recirculating Systems (RAS) n.d).....	20
Kuvio 5.	Kiertovesikasvatuksen toimintaprosessi. (Lähde: Luonnonvarakeskus).....	26
Kuvio 6.	Läpivirtauskalankasvatus (Lähde: Flow-Through Farms n.d).....	27
Kuvio 7.	Shepherdstownin osittaiskiertokasvatus malli. (Lähde: Summerfelt, Davidson, Waldrop, Tsukuda & Bebak-Williams 2004).....	31

Taulukkoluetelo

Taulukko 1.	Tuloveden lämpötilat 2005–2015. (Lähde: Luonnonvarakeskus)	37
Taulukko 2.	Veden lämpötilan hallinnan energiakulutus.	40

1 Johdanto

Opinnäytetyössä tarkasteltiin lämpötilan hallinnan mahdollisuuksia ja kustannuksia kalanviljelyn osittaiskiertokonseptissa. Toimeksiantaja on rakentanut Laukaalle osittaiskiertokasvatusprosessin kalanviljelyä varten. Tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon energiaa kala-altaiden veden lämmönsäätely kuluttaisi ja tarkastelua varten rakennettiin laskentamalli, jonka avulla toimeksiantaja voi selvittää energiankulutuksen eri vesimäärillä. Saatujen tulosten myötä voidaan prosessiin tehdä tarvittavat investoinnit lämpötilan hallintaa varten. Opinnäytetyössä siis kehitettiin olemassa olevaa prosessia laskennallisilla keinoin, eli kyseessä on määrällinen kehittämistyö. Työn teoriaosuudessa kuvataan aiheen kannalta tärkeitä eri kalanviljelytapoja teoreettisesta ja teknisestä näkökulmasta. Muita viljelytapoja käytettiin vertailukohteina Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokonseptille.

Lämpötilan hallinnan mahdollisuuksien selvitys edesauttaa osittaiskiertokonseptin energiatehokkuuden optimointia. Toimeksiantajalla on myös oletamus, että lämpötilan hallinnan avulla prosessista voidaan tehdä tehokkaampi myös kalankasvatuksen kannalta. Osittaiskiertokonseptin optimointia olisi tarkoitus tuoda toimeksiantajalle rahallisia säästöjä. Jos kyseinen konsepti yleistyy kalanviljelykeinoon, energiankäytön optimisointi tulisi vaikuttamaan positiivisesti myös ympäristöystävällisyyden näkökulmasta, sillä hukkaenergia olisi pieni. Kalankasvatuksen suosio on nousussa maailmalla, joten kaikki selvitykset sekä kehitykset kyseiseltä alalta ovat tärkeitä niin Suomessa, kuin maailmallakin.

Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimi Luonnonvarakeskus. Luonnonvarakeskus on Suomen maa- ja metsätalousministeriön alainen tutkimus- ja asiantuntijaorganisaatio. Se muodostettiin 1. tammikuuta 2015 yhdistämällä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT, Metsätutkimuslaitos Metla, Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus Tiken tilastotuotanto sekä Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos RKTL. Heillä on neljä eri tutkimusyksikköä sekä yksi tutkimusinsfraktuuri palveluyksikkö. Tutkimusyksiköt erikoistuvat luonnonvaroihin, tuotantojärjestelmiin, biotalouteen ja ympäristöön sekä tilastopalveluihin. Luonnonvarakeskuksen päätehtävänä on harjoittaa edellä mainittujen tutkimusyksikköjen aloilla tutkimus- ja kehittämistyötä. (Luken organisaatio n.d.)

2 Kehittämishanke

2.1 Perustietoa

Opinnäytetyössä tutkittiin Luonnonvarakeskuksen kalan kiertovesikasvatuksesta pohjautuvaa osittaiskiertokonseptia ja siihen tehtäviä energiatehokkuuden selvityksiä. Kiertovesikasvatus on kalankasvatusten menetelmä, jossa samaa vettä pumpataan ja käsitellään kala-altaan ja puhdistuslaitteiston välillä. Tyypilliset vedenkäsittelyvaiheet ovat kiintoaineen poisto, kaasujen vaihto ja biologinen vedenkäsittely, joka muuttaa kalojen erittämän ammoniumin nitraatiksi. Menetelmä säästää paljon vettä, sillä uutta vettä tarvitaan kiertoon vain 1–2 %. Kiertovesikasvatuksen suosio on kasvanut Suomessa ja maailmalla, sillä se on ympäristöystävällistä, sekä kaloja voidaan kasvattaa ja valvoa optimitiloissa ympäri vuoden. Osittaiskiertokasvatuksessa taas biologinen vedenkäsittely jätetään pois. Kyseinen osittaiskiertoprosessi on vaihtoehtoinen tapa kalanviljelylle, minkä avulla säästetään investointikustannuksissa. Tätä myöten osittaiskiertokasvatus on kiertovesikasvatukseen verrattuna halvempi investoinnin kannalta sekä laitospaikalla voidaan minimoida infran vaatima tila. Osittaiskiertokasvatus pyrkii monitoiminnallisten teknologioiden hyödyntämiseen, yksinkertaiseen rakenteeseen ja käyttöön sekä edullisten massatuotettujen komponenttien käyttöön. Osittaiskiertokonseptin vedenkäytössä ei päästä yhtä intensiiviseen vedenkäyttöön kuin kiertovesikasvatuksessa, sillä kalojen erittämä ammonium poistetaan järjestelmästä vettä vaihtamalla.

2.2 Ongelma

Lämpötila vaikuttaa olennaisesti vaihtolämpöisten kalojen kasvuun. Suomessa veden lämpötila on lohikalojen viljelyyn optimaalinen keväällä ja syksyllä. Optimilämpötila on lohikalalajista riippuen 12–16 °C. Talvella kalojen kasvu on hyvin vähäistä, sillä luonnonvesien lämpötilat ovat niin viileitä. Kylminä aikoina, eli talvikuukausina, kasvatusprosessi täytyy siis kokonaan keskeyttää. Kesällä taas pintavesien lämpötila usein ylittää optimialueen lämpiminä kesäviikkoina ja ruokintaa joudutaan rajoittamaan tai jopa keskeyttämään. Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokasvatus järjestelmä sijaitsee ulkotiloissa ja on näin hyvin herkkä säävaihtelulle. Kasvatusprosessin keskeyttäminen hidastaa ja hankaloittaa kalanviljelyä, minkä takia olisi ideaalista, jos prosessi voitaisiin pitää ympäri vuoden käynnissä.

2.3 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko mahdollista sekä taloudellisesti kannattavaa säädellä osittaiskiertokasvatuksen kiertoveden lämpötilaa. Tarkoituksena oli rakentaa Excel -sovelluksella laskentamalli, jonka avulla voitiin selvittää, kuinka paljon energiaa kuluu lämpötilanhallintaan eri vesimäärillä. Energiankulutusmäärän avulla voidaan prosessiin suunnitella investointeja, kuten lämmönsiirrin ja lämpöpumppu. Energian käytöstä sekä investoinneista syntyvien kustannusten avulla voitiin verrata, onko osittaiskiertokonseptin kannalta kustannustehokkaampaa lämpötilan hallinta vai prosessin sulkeminen huonojen kalankasvatus olosuhteiden aikana. Toimeksiantaja sai itselleen energialaskentamallin, jonka avulla pystytään selvittämään tarvittavan energian määrän lämpötilan hallintaa varten eri vesimäärillä sekä energiatehokkuutta parantavia kehittämisideoita.

Tavoitteen saavuttamiseksi asetettiin seuraava tutkimuskysymykset:

Mitkä ovat lämpötilan hallinnan mahdollisuudet osittaiskiertokonseptissa?

Mitkä ovat lämpötilan hallinnan kustannukset osittaiskiertokonseptissa?

Millä tavalla lämpötilan hallinta kehittää osittaiskiertokonseptia?

Tutkimuskysymysten tarkoituksena oli johdatella opinnäytetyön aihetta sekä kuvata mitä työllä pyritään saavuttamaan. Kysymykset rajaavat tiedonhankintaprosessia ja ne helpottavat opinnäytetyön toteutusta. (Opinnäytetyön raportointi n.d.)

2.4 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö on kvantitatiivinen tutkimus eli määrällinen tutkimus. Määrällinen tutkimus on käytössä silloin kun tutkittavat aiheen muuttujat ovat tiedossa. Tässä tapauksessa muuttujat ovat osittaiskiertokonseptin tekniikka ja lähtöarvot. Sen avulla kuvataan ja tulkitaan ilmiöitä mittausmenetelmillä, joiden avulla kerätään numeerisia tutkimusaineistoja. Määrällinen tutkimus siis perustuu mittaamiseen ja tuloksena saatujen lukuarvojen analysointiin. Tutkimusmenetelmänä toimivat määrällinen analyysi eli laskennalliset analyysimenetelmät. Määrällisen analyysin tarkoituksena on tarkastella syy-seuraus-

suhteita erilaisten ilmiöiden välillä numeroiden ja tilastojen avulla. Tutkimuksessa ensimmäisenä vaiheena kerättiin aineisto, jonka avulla luotiin teoriapohja opinnäytetyölle. Tämän jälkeen lähtöarvojen avulla rakennettiin laskentamalli. Lopuksi saatuja tuloksia analysoidaan ja pohditaan.

Aineistoina hyödynnettiin aikaisempia tutkimuksia, tietokannoista löytyviä artikkeleita sekä Luonnonvarakeskukselta saatua valmista aineistoa. Aineiston keruussa on hyödynnetty tietokantoja sekä toimeksiantajan itse keräämiä lähteitä. Kalanviljelystä sekä kalanviljelytavoista kuten kiertovesikasvatuksesta löytyy suuria määriä tietoa niin kirjallisuudesta kuin internetistä. Näiden lähteiden avulla luotiin monimuotoista ja todenmukaista tekstiä aiheesta. Osittaiskiertokasvatuksesta löytyy tietoa paljon vähemmän kuin muista kasvatustutkimuksista. Kyseisestä kasvatustutkimuksesta saatava tieto on suurelta osin riippuvainen toimeksiantajalta saatuihin lähteisiin sekä muutama muuhun.

Tutkimuksen luotettavuuden arviointi on tärkeä osa tutkimusta. Aineiston perusteella pitää pystyä tekemään tutkimuksen johtopäätökset. Tutkimuksen tulee myös olla toistettava, eli menetelmällä saatu tulos ei saa vaihdella laskentakerrasta toiseen, eikä myöskään silloin, kun laskija vaihtuu. Iso osa lähteistä saatiin kansainvälisiltä organisaatioilta tai Luonnonvarakeskukselta, joten niiden uskotaan olevan hyvin luotettavia. Opinnäytetyön luotettavuuteen vaikutti eniten kehittämisprosessissa tehtävä laskentamalli. Laskentamallin luotettavuuteen vaikuttaa lähtötietojen saatavuus ja luotettavuus sekä itse laskentamallin pätevyys. Opinnäytetyötä tehdessä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä, eli työtä tehdessä noudatettiin yleistä huolellisuutta ja tarkkuutta tietojen käsittelyssä. Opinnäytetyössä otetaan huomioon tutkijoiden aiheeseen tekemiä tutkimustöitä, joihin viitataan asianmukaisella tavalla. Opinnäytetyössäni aineiston keruu ei edellyttänyt kyselyn tekemistä kenellekään. Työn eettisyys tulee esille siis lähinnä käyttämieni aineistojen rehelliseen ja asianmukaiseen hyödyntämiseen, sekä muiden tekemien tutkimusten julkaisujen oikeaoppiseen viittaamiseen.

Opinnäytetyön laajan teoriataustan takia on tärkeää rajata aineistoa. Teoriaosuudessa keskityttiin vain maalla tapahtuvaan kalankasvatukseen, joka nähtiin tärkeimmäksi aiheen kannalta. Eri kasvatustekniikoiden toiminta ja tekniikka kuvataan, mutta laitteistojen tarkka kuvaus ei ole oleellista, sillä opinnäytetyön aiheena ei ole laitteiston teknillinen kuvaus. Itse laskentamalliin liittyen tärkeimpänä ra-

jauksena oli, että kyseinen prosessi vaatii vain koneellista lämmitystä, ei jäädytystä. Koneellista jäädytystä ei tarvita, sillä kesäisin tulovedenlähteenä voidaan käyttää viileämpää pohjavettä. Jäädytyksen tarve sisällytettiin kuitenkin mukaan laskentamalliin, jotta sitä voidaan soveltaa muissa kohteissa.

3 Kalanviljely

3.1 Perustietoa kalanviljelystä

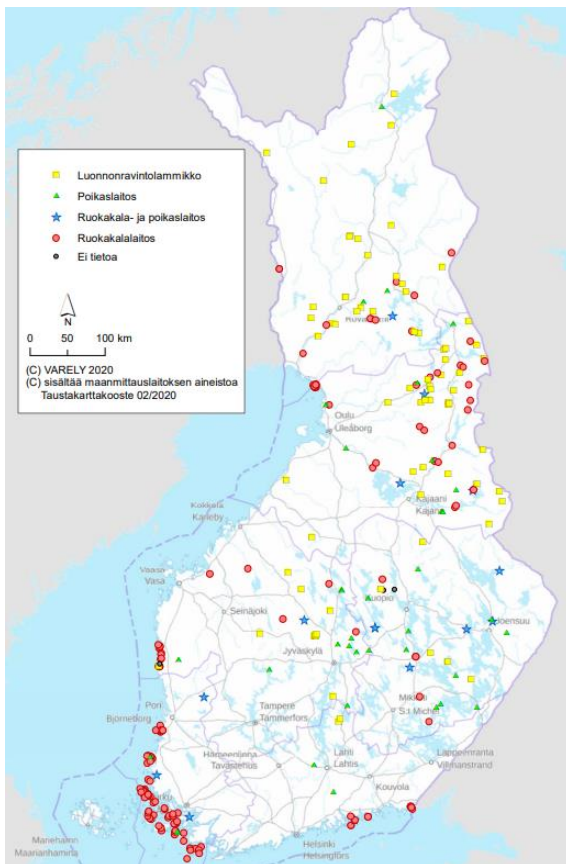
Kalanviljely tarkoittaa kalan kasvatusta, yleensä ravinnoksi, seuratuissa tiloissa kuten kala-altaissa, kalalammikoissa tai verkkokasseissa. Kalanviljelyn suosio on kasvussa maailmalla ja tällä hetkellä yli puolet ihmisten kuluttamasta kalasta on viljeltyä kalaa. Suurena syynä on kasvavan ihmisväestön ruuan tarpeen tyydyttäminen sekä ympäristön elinvoimaisuuden säilyttäminen. Kasvava ihmisväestö johtaa suurempaan kysyntään kalaproteiinille, mikä on taas johtanut luonnonvaraiseen liikakalastukseen ja luonnonvaraisten kalakantojen vähenemiseen. Kalanviljely on siis kestävä tapa ruuantuotannolle. Kalanviljelyn avulla voidaan myös taata kaloille riittävä ravinto, optimaaliset elinolosuhteet sekä suoja petoeläimiltä. (Kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohje 2020, 15–17.) Kalanviljelyllä voidaan myös turvata uhanalaisten tai taantuneiden kalalajien ja –kantojen elinvoimaisuus. Kyseisiin kalaistutuksiin käytetään emokalastoilla tai luonnonemokaloista hankittua mätää. (Luonnonvarakeskus n.d.)

Vuonna 2018 maailmalla tuotettiin kokonaisuudessaan 158 miljoonaa tonnia kalaa ihmisravinnoksi. Maailmalla suurimmat kalanviljelymaat ovat Kiina, Indonesia, Peru, Intia, Venäjä, Yhdysvallat sekä Vietnam. Kalanviljely on siis yleisintä Aasiassa, jossa ihmisväestö on suuri sekä kalankasvatus mahdollisuudet ovat hyvät. (The state of world fisheries and aquaculture 2020, 7–10.) FAO:n mukaan maailman viljellyimpiä kaloja vuonna 2017 olivat karpit, jotka vastasivat n. 25 % koko maailman tuotannosta (Cai, Zhou, Yan, Lucente & Lagana 2017, 4–5).

Luonnonvarakeskuksen (2021) keräämien tilastojen mukaan vuonna 2020 Suomessa kasvatettiin kalaa 15,1 miljoonaa kiloa ihmisravinnoksi. Noin 95 % Suomessa viljelystä kalasta on kirjolohta. Koko ruokakalatuotannon arvo oli 63,1 miljoonaa euroa ja Suomessa toimii 246 kalanviljelytoimintaa tekevää yritystä. Sekä Luonnonvarakeskus (2021) että Suomen Kalankasvattajaliitto (2022) painottavat, että Suomessa on erinomaiset edellytykset kalanviljelylle, sillä Suomella on suuri määrä järviä ja jokia sekä

pitkä rannikko. Suomen ruokakalasta noin puolet tuotetaan Ahvenanmaalla. Kalanviljely on Suomessa tarkasti säädeltyä ja kalojen kasvattajat tarvitsevat ympäristösuojelulain mukaiset luvat kalanviljelyyn. Luvat säätelevät kalanviljelyssä käytettäviä alueita, tapoja sekä kalankasvatusmääriä. (Vesiviljely 2021; Kalanviljely elinkeinona 2022.)

Suomessa tuotetusta kalasta suuri osa on tuotettu Ahvenanmaalla sekä saaristomerellä. Sisämaalla taas on tavallista taas kasvattaa kalanpoikasia, jotka myöhemmin siirretään mereen. Suomessa kalankasvatus tapahtuu kalanviljelylaitoksissa, verkkokasseissa, luonnon viljelylammissa ja kiertovesilaitoksissa. (Fishfarming in Finland n.d, 15.) Kuviossa 1 esitetään mannermaan kalankasvatuslaitokset Suomessa vuonna 2020. Kuvioista voidaan nähdä, että suurin osa Suomen ruokakalalaitoksista sijaitsee saaristomerellä. Ruokakalalaitoksia kuitenkin esiintyy myös pitkin Suomen rantaviivaa, sekä Lapissa ja Pohjois-pohjanmaalla. Sisämaassa kalankasvatus tapahtuu lähtökohtaisesti luonnonvaralammikoiden avulla.



Kuvio 1. Mannermaan kalankasvatustiltojen Suomessa vuonna 2020 (Lähde: Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje 2020.)

3.2 Yhteiskunnalliset vaikutukset

Kalankasvatuksella on positiivisia vaikutuksia yhteiskunnalle ruuantuotannon näkökulmasta. Kalankasvatuksen avulla voidaan tuottaa kotimaisesti ruokaa kuluttajalle ja raaka-ainetta vähittäismyynnin tarpeisiin. Kotimainen tuotanto tarkoittaa myös vähentyvää riippuvuutta ulkomaalaisesta ruoka-aineesta. Kalankasvatus on ekologisesti tehokas tapa ravinnon tuottamiselle, sillä vaihtolämpöisinä eläiminä kalat tulevat hyödyntämään niille annetun ravinnon tehokkaammin kuin tasalämpöiset. Kalaa kasvatetaan optimaalisissa ja valvotuissa tiloissa, mistä johtuen kalaa voidaan kasvattaa kestävästi. Kestävästi tuotettu kala pienentää Suomen ruuantuotannon ilmastovaikutuksia. (Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje 2020, 22.)

Viljellyn kalan hiilijalanjälki on huomattavasti muita eläintuotantomuotoja pienempi, mikä tekee siitä yhden ympäristöystävällisimmistä tavoista tuottaa eläinproteiinia. Maailman väestön noustessa, ruuan tuotanto pienemmillä ympäristövaikutuksilla tulee olemaan tärkeää. (Kalanviljely 2022).

3.3 Ympäristövaikutuksia

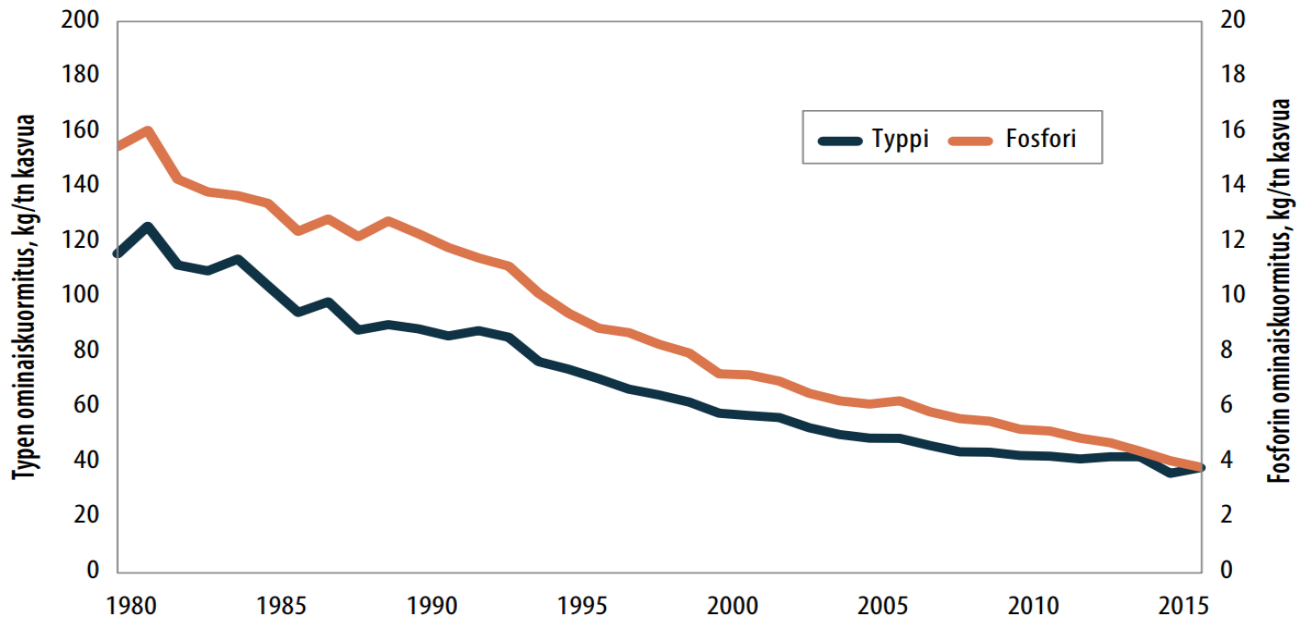
Kalanviljelystä johtuvat ympäristöpäästöt ovat muihin eläinproteiinin tuotantokeinoihin verrattuna pienet, mutta viljelylaitoksilla voi olla suuretkin vaikutukset sen lähiympäristöön, joten ympäristöstä huolehtiminen on oleellinen osa kalanviljelyä. Vesiviljelyjärjestelmät voivat tuottaa suuria määriä jätevettä, joka sisältää kiintoaineita, typpeä ja fosforia. Typpi ja fosfori aiheuttavat kalanviljelyn jätekomponenteista eniten ympäristöongelmia. Typpiyhdisteiden hapettaminen vähemmän haitalliseen muotoon on erityisen tärkeää kiertovesilaitoksissa, joissa sama vesi kiertää prosessia ympäri, sillä ne ovat vaarallisia kaloille. Jäteveden määrä on suoraan verrannollinen kalantuotannon määrään, joten on siis ympäristön kannalta tärkeää, että kalanviljelylaitoksissa on tehokkaat jätevedenpuhdistuslaitteistot. Makea vesi on tärkeä luonnonvara kalanviljelyssä, mutta sen käyttöä on valvottava tarkasti, sillä luonnonvarojen kohtuuton käyttäminen vaikuttaa kielteisesti ekosysteemeihin. (Turcious & Papenbrock 2014, 837–838.)

Vuonna 2017 globaali vesiviljelysektori oli vastuussa 0,49 % maailman ihmisten tuottamista kasvihuonepäästöistä. Kalanviljelystä johtuvat päästöt ovat pienet verrattuna maaeläinten lihatuotannosta

johtuviin päästöihin. Kalanviljelyn alhainen päästöintensiteetti johtuu entreenisen metaanin puutteesta, kalojen korkeasta hedelmällisyydestä sekä tarvittavan ruokarehun alhaisesta muunnossuhteesta. Vesiviljely on siis tehokkaampi tapa tuottaa eläinproteiinia verrattuna maaeläimiin. Kalanviljelyn päästöistä 57 % johtui rehun tuotannosta ja muista päästöistä suurin osa syntyy kalatilan energiankäytöstä ja viljelyn vesijärjestelmän nitrifikaatiosta sekä typpiyhdisteiden denitrifikaatiosta. MacLeod, Hasan, Robb ja Mamun-Ur-Rashid (2017, 5) painottavat sitä, että kalanviljelyn määrän kasvun myötä on tärkeää selvittää viljelyn todellinen potentiaali päästöjen suhteen. Vesiviljelyala on vielä suhteellisen nuori maaeläintalousaloihin verrattuna, joten se oletettavasti tarjoaa runsaasti vaihtoehtoja teknisille innovaatioille niin rehutuoannossa kuin itse kalojen viljelyssä. (MacLeod, Hasan, Robb & Mamun-Ur-Rashid 2017, 1–5.)

Suomessa merkittävä ympäristövaikutus kalankasvatuksessa on syntyvät ravinnepäästöt. Ne kuormittavat vesistöjä ja aiheuttavat rehevöintiä. Kalankasvatuksen ravinnepäästöjen vaikutus on valtakunnallisesti pieni, mutta niillä voi olla paikallisesti merkittävä vaikutus. Ravinnepäästöt ovat suurilta osin peräisen kalojen rehusta. Ravinnepitoisuuden nousu luonnon vesissä kasvattaa rihmalevien määrä, jotka kuollessaan kuluttavat vesistöjen pohja-alueiden happea. Tämä taas voi johtaa kalaston yksipuolistumiseen. Sisämaalaitoksilla ravinnekuormitus on suurimmillaan kesä-heinäkuussa, jolloin kalojen ruokinta on suurinta. Kalankasvatuksesta johtuvaa rehevöintiä kiihdyttävät typpi ja fosfori. Vuonna 2018 kalankasvatuksen typpi- ja fosforikuormituksen osuus ihmistoiminnan aiheuttamasta kuormituksesta Suomessa oli 2 % ja 1 %. (Ympäristöministeriö 2020, 19–21).

Kuviosta 2 voidaan nähdä, että typen ja fosforin ominaiskuormitus on ollut tasaisessa laskussa viimeisten vuosikymmenten aikana. Ominaiskuormituksella tarkoitetaan kuormittajayksikköä kohden laskettu ympäristökuormitus, eli vaikka kalankasvatuksen suosio on nousussa, siitä johtuvat ympäristökuormitukset ovat laskussa. Suurimpia syitä niiden laskulle ovat tehokkaammat sekä optimaalisemmat kalankasvatustilat, jotka keräävät ja hyödyntävät kasvatuksesta syntyvän typen ja fosforin. Kuvion 1 avulla voidaan myös nähdä, että kuormitukset tulevat laskemaan vielä seuraavienkin vuosien aikana, kunhan kalalaitosten tehokkuutta ja optimaalisuutta kehitetään samaan tahtiin.



Kuvio 2. Tyypin ja fosforin ominaiskuormitus Manner-Suomen kalankasvatuksessa 1980–2016 (kg/tn tuotettua kalaa). (Lähde: Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje 2020, 21)

3.4 Lainsäädäntö ja luvat

Kalanviljelylle asetettu lainsäädäntö ohjaa ympäristönsuojelua. Sen kannalta tärkeimpiä lainsäädöksiä ovat vesilaki ja ympäristösuojelulaki. Kalanviljelyä ohjaavia muita lakeja ovat myös jätelaki, luonnonsuojelulaki sekä lait, jotka vastaavat vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä. Vesilain tarkoituksena on varmistaa vesivarojen yhteiskunnallisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä käyttö. Tämän avulla varmistetaan Suomen vesivarojen puhtaus ja vähennetään veden käytöstä johtuvia haittoja ympäristölle. Ympäristösuojelulaki taas varmistaa, että kalanviljely ei pilaa ympäristöä ja täten myös ehkäistä ja vähentää päästöjä. Ympäristösuojelulain avulla myös ehostetaan luonnonvarojen tehokasta ja kestävää käyttöä. (Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje 2020, 23–25.)

Suomessa kaikki kaupallinen kalanviljely, jossa käytetään vähintään 2 000 kiloa kuivarehua vuodessa tai luonnonvaralammikko, joka vie yli 20 hehtaaria tilaa, vaatii aluehallintaviraston myöntämän ympäristösuojeluluvan. Vesitalouslupa vaaditaan veden johtamiseen, vesistö rakentamiseen sekä vesistön säännöstelyyn. Vesieläinten käsittelyn takia tarvitaan myös eläintautilain nojalla lupa vesieläinten kasvattamiseen ja perkaamiseen. (Eskelinen, Vielma, Kankainen & M. Setälä 2014.)

4 Sisämaan kalanviljelymenetelmät

Opinnäytetyön kannalta tärkeimpiä kalanviljelymenetelmiä ovat maalla tapahtuvat viljelymenetelmät. Työssä kuvataan aiheen kannalta tärkeimmät kasvatuskeinot, eli kiertovesikasvatus, läpivirtauskasvatus sekä osittaiskiertokasvatus.

4.1 Kiertovesikasvatus

4.1.1 Perustietoa

Kiertovesikasvatuksen tarkoituksena on taata vaihtoehtoinen ja kestävä kalankasvatustapa, jossa kasvatetaan tervettä kalaa pienellä tuoreen veden kulutuksella (Recirculating Aquamarine Systems 2020, 1). Ympäristöystävällisistä syistä kalantuotannon kasvun potentiaalia nähdään etenkin kiertovesikasvatuksessa, mutta sen tekniikassa on vielä kehitys- ja tutkimustarpeita (Kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohje 2020, 15). Kiertovesikasvatus on kalankasvatusmenetelmä, jossa kalankasvatuslaitoksen vettä kierretään pumppaamalla sitä kala-altaan ja sen puhdistuslaitteiston välillä. Menetelmä säästää vettä, koska yksi kierto vaatii uutta vettä vain 1–2 % kiertävän veden määrästä. Vähäinen vedenkulutus tekee kiertovesikasvatuksesta hyödyllisen paikoissa, joissa vesi on rajoitettu vara. Kiertovesikasvatuksessa veden puhdistamiseen käytettävällä teknologialla pystytään pienentämään merkittävästi ravinnekuormitusta. Fosforipäästöt ovat kiertovesilaitoksessa vain noin 20 prosenttia normaalista kalankasvatuksesta. Kasvatuslaitosmalli, jossa samaa vettä kierretään prosessin ympäri kuitenkin edellyttää tekniikan kannalta suuret investointikustannukset sekä energian kulutuksen kannalta myös suuret ylläpitokustannukset. (Kalan kiertovesikasvatus 2020.)

Kiertovesikasvatuksen tekniikka perustuu mekaanisten ja biologisten suodattimien käyttöön. Mekaaninen suodatus puhdistaa vedestä kiintoaineet, minkä jälkeen biologinen suodatus hajottaa vedestä ammoniakin ja nitriitin bakteerien avulla. Veden huolellinen puhdistaminen on tärkeää kalojen terveyden kannalta ja puhdistamisen avulla taataan, että samaa vettä voidaan kierrättää prosessissa huolelta. Vähäisen veden käytön lisäksi kiertovesikasvatuksen muita hyviä puolia ovat ne, että sen avulla voidaan kasvattaa kalaa täysin kontrolloiduissa olosuhteissa, kalanruokintastrategia on optimaalinen,

kalat pysyvät taudittomina sekä kalojen kiinniotto on helppoa. Kontrolloidut olosuhteet takaavat vakaan, säästä riippumattoman kalantuoton, toisin kuin tavallinen kalanviljely. Huonoja puolia kiertovesikasvatukselle on täyspäiväinen sähköntarve, hyvän vesilähteen tarve, monipuolinen ja helposti sulatettava ravinto sekä yleinen suuri tarve teknisesti osaavalle henkilöstölle. (Bregnballe 2015, 9–11.)

Kiertovesikasvatuksen suosio on kasvussa Suomessa ja maailmalla. Suomalaisissa laitoksissa kasvatus tapahtuu yksinomaan halleissa ja näistä sisämaan laitoksista suurin on Varkaudessa sijaitseva Finnforrel Oy:n kiertovesilaitos, jonka tarkoituksena on tuottaa vuodessa miljoona kiloa kirjolohta. Kiertovesilaitosten teknologia on uutta ja laitos toimii suuressa mittakaavassa, minkä vuoksi tuotannon riskit ovat hyvin suuret. Laitokset kuluttavat myös runsaasti energiaa, joten niiden ylläpito on kallista. Tähän mennessä Suomessa sijaitsevia kiertovesilaitoksia ei olla vielä saatu taloudellisesti kannattaviksi ja Suomessa onkin jo menneet muutamia kiertovesilaitoksia konkurssiin kannattavuusongelmien vuoksi. (Latokartano 2018.)

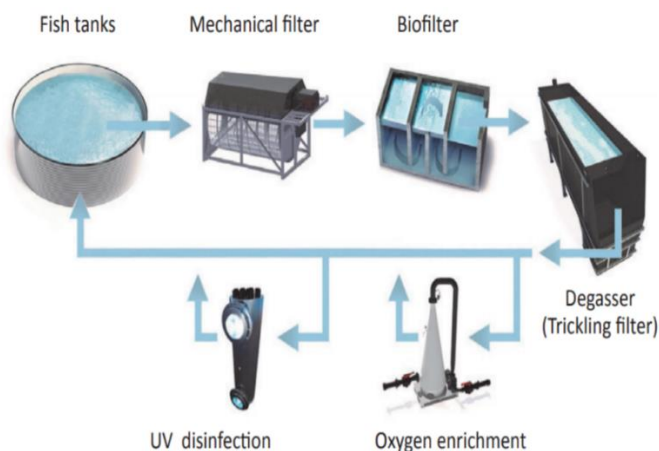
Bregnballe (2015, 13–14) mukaan kiertovesikasvatustiloksessa kaloja ruokitaan useasti päivässä. Ruuan kala muuttuu energiaksi ja hyödyntää sen kasvuenergiana. Kiertovesikasvatuksessa käytetään kuivarehua. Kuivarehun käyttö on puhdasta, turvallista sekä se täyttää kalojen ravintotarpeet. Kuivarehun korkea käyttöaste on tärkeä, sillä se minimoi kalojen erittyvien tuotteiden määrän, jolloin prosessin puhdistus ei kuormitu tarpeettomasti. On siis tärkeää optimoida rehun käyttö niin, että syömittömän rehun määrä on mahdollisimman pieni. Kalanviljelijä saa tällöin parhaan kasvatustuloksen samalla kun prosessin puhdistuslaitteet eivät kuormitu tarpeettomasti. Rehun määrän selvittämisessä apuna käytetään rehukerointia FCR, joka kuvaa kuinka monta kiloa rehua kuluu jokaista tuotettua kalakiloa kohden. (Bregnballe 2015, 13–14.)

Kiertovesilaitoksissa kasvatetaan teuraskalaa sekä poikasia. Poikaikalan kasvatuksen tarkoituksena on tuottaa poikasia ruokakalakasvatukseen tai istukkaiksi, joiden avulla voidaan korjata ja vahvistaa luonnon vesissä olevia kalakantoja. (Kalaistutukset 2020.) Ruokakalatuotannossa tarkoituksena on, että kala kasvatetaan markkinakokoon, jonka jälkeen se perataan ja prosessoidaan elintarvikekäyttöön. Kiertovesikasvatuksen ylläpito on kallista, joten kasvattaja pyrkii valitsemaan sopivat kasvatetta-

vat kalalajit, joita voidaan myydä korkeaan hintaan ja täten pitää kiertovesikasvatusta yllä. (Latokartano 2018.) Laitoksissa kasvatetaan tällä hetkellä kirjolohta sekä arvokkaampia kalalajeja, kuten kuuhaa, sampea ja siikaa sekä niiden mätiä ja poikasia. Kirjoloheen kasvatusta tapahtuu uudemmissa kiertovesilaitoksissa, joissa kasvatuksen kannattavuutta pyritään tavoittelemaan suuremmalla tuotannolla. Kiertovesikasvatustilaksessa tuotetun kalan osuus oli vuonna 2019 vielä alle neljänneksen Suomessa tuotetun kalan kokonaismäärästä. (Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje 2020, 45.) Kuviossa 3 nähdään miltä tyyppinen kiertovesikasvatustilaksen allasalue voi näyttää. Kuvion 4 avulla on visualisoitu kiertovesilaitoksen kierron vaatimat laitteet sekä niiden järjestys prosessissa. Laitteistojen tarkempi toiminta kuvataan seuraavassa kappaleessa.



Kuvio 3. Tyyppinen kiertovesilaitos. (Lähde: *Recirculating Aquaculture Systems n.d*)



Kuvio 4. Tyyppinen kierto-prosessi. (Lähde: *Disrupting traditional aquaculture with Recirculating Systems (RAS) n.d*)

4.1.2 Toiminta

Kiertovesikasvatuksessa vettä pumpataan kala-altaiden ja puhdistuslaitteiden välillä keskipakopumpujen avulla. Kierron alussa kiintoaineet poistetaan mekaanisen suodatuksen avulla. Kiintoaineiden huolellinen poistaminen on tärkeää veden laadun kannalta, mutta myös siltä osin, että biologinen puhdistus ei kuormitu. Kiintoaineet otetaan talteen kierrätystä varten. Biologinen suodatus tapahtuu mekaanisen suodatuksen jälkeen. Biologisen puhdistuksen nitrifikaatio hapettaa kalojen erittämän ammoniumin ensin nitriiniksi ja sitten nitraatiksi, jota kalat sietävät korkeinkin pitoisuuksina. Biologisen suodatuksen jälkeen vettä ilmastetaan hiilidioksidin poistamiseksi. Tämän jälkeiset vedenkäsittelyvaiheet sisältävät pH:n säädön, hapetuksen ja usein myös desinfioinnin UV:n tai otsonin avulla. Prosessista poistuu vettä ja uutta vettä lisätään kiertoon 1–2 %. (Kalan kiertovesikasvatus 2020.)

Kiertovesikasvatuksen oleellisin osa on kala-allas. Kalalajeista ja tuotantosuunnitelmasta riippuen valitaan altaan koko ja muoto. Suosittuja allastyyppejä ovat pyöreät altaat sekä uoma-altaat. Pyöreässä altaassa vesi liikkuu altaan keskustaa ympäri. Veden ympäri pyöriminen takaa sen, että altaassa olevat kiintoaineet eivät säily altaassa kauaa, mikä tekee pyöreästä allastyypistä itsepuhdistuvan. Uoma-altaassa veden virtaus ei usein takaa itsepuhdistuvuutta. Pyöreät altaat vievät kuitenkin enemmän tilaa, joten on mahdollista yhdistää edellä mainitut allastyypit ja luoda D-päinen uoma-allas, jonka avulla saadaan pyöreään altaan itsepuhdistus ominaisuus ja uoma-altaan ergonominen tilan käyttö. (Bregnballe 2015.) Kiertovesikasvatustiloksessa joko kaikki kala-altaat käyttävät samaa puhdistuslaitteistoa tai jokaiselle altaalle on omat puhdistuslaitteet. Kun kaikki altaat käyttävät samaa kiertoa, säästetään investointikustannuksissa, mutta jos yhdessä altaassa esiintyy tautia, niin yhteisen vesityksen vuoksi ne leviävät myös muihin altaisiin. (Kiuru 2022.)

Kiertovesilaitoksen vedenkierron ensimmäinen vaihe on mekaaninen suodatus. Mekaanisen suodatuksen pääideana on poistaa vedestä kiintoaineet, kuten kalojen ulosteiden ja syömätön rehu. Kiertovesikasvatuksessa syntyviä kiintoaineita poistetaan niiden koon mukaan. Suurempia, yli 100 µm kokoisia kiintopaloja voidaan poistaa painovoimaerottelun avulla. Pienempiä kiintoaineita, eli 100–30 µm tulee poistaa mekaanisen suodatuksen avulla. Suosituin tapa mekaaniselle suodatukselle on hienoseulonta suodatus, kuten esimerkiksi rumpusuodatin. (Espinal & Matulic 2019.) Tyypillisin mekaani-

nen suodatin kiertovesiprosessille on rumpusuodatin, pyörreselkeytin, hiekkasuodatin tai partikkeli-suodatin. Kiintoaineiden poiston tehostamista varten voidaan erityyppisiä suodattimia sarjaankytkä. Kiertoveden isoimmat partikkelit voidaan poistaa pyörreselkeyttimellä, jonka jälkeen kirkaampi vesi ajetaan rumpusuodattimen läpi, jolloin hienempi kiintoaine saadaan poistettua. (Kiertovesiviljelyn perusteet n.d.) Rumpusuodattimet ovat kuitenkin luotu kestämään suuret määrät kiintoainetta ilman tukkeutumista, joten sarjaan kytkeminen ei ole välttämätöntä. Mekaanisen suodatus on prosessille tärkeä yleisesti veden puhtauden kannalta, mutta se myös takaa sen, että biologinen suodatus ei tukkeudu. Biologisen suodatuksen tasainen toimivuus parantaa prosessin nitrifikaatiota, sekä optimoi puhdistus prosessia. (Bregnballe 2015, 19) Rumpusuodattimet ovat suunniteltu poistamaan suuret määrät kiintoainetta nesteestä, vaatimatta esisuodatusta. Neste kulkeutuu pyörivän, perforoidun tai kolmiolangasta tehdyn rummun lävitse. Rummulle jääneet kiintoaineet poistetaan automaattipesulla. Pesuvesi ohjautuu kouruun, josta se johdetaan lietelinjaan ja mahdolliseen jatkokäsittelyyn. (Rumpu- ja kiekkosuodattimet n.d.)

Mekaanisen suodatuksen jälkeen vesi kulkeutuu biologiseen suodatukseen. Biologinen suodatus viittaa prosessiin, jossa hyödylliset bakteerit hajottavat ammoniakkia ja nitriiniä ja muuttavat ne nitraattiyhdisteeksi, joka on vähemmän myrkyllistä (Sharpe 2022). Kiertovesikasvatustiloksen mekaaninen suodatus ei kykene poistamaan kaikista pienimpiä partikkeleita, joiden mukana kulkeutuu merkittävä osa fosfaatista ja typestä. Fosfaatti ei ole myrkyllistä kaloille, sillä se on inertti aine, eli se ei reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa. Typen myrkyllisyyteen vaikuttaa typpiyhdisteen muoto. Myrkyllisimpiä kaloille ovat nitriitti ja ammoniakki (NH₃). Biosuodattimessa ammoniakki muunnetaan ensin nitriitiksi ja sitten vaarattomaksi nitraatiksi. Suodattimen toisenvaraiset bakteerit hajottavat orgaanisen aineen ja ammoniakkin kuluttamalla happea ja tuottamalla hiilidioksidia sekä lietettä. Hajotetun ammoniakkin bakteerit muuttavat nitraatiksi. (Bregnballe 2015, 20–21.)

Biologisen suodatuksen nitrifikaatioprosessi tuottaa happoa, jolloin veden pH-taso laskee. Tämän takia prosessia täytyy vakauttaa lisäämällä veteen emästä. Prossiin voidaan asentaa kalkin sekoitusjärjestelmä, joka tiputtaa tasaisesti veteen kalkkia, täten lisäten veden emäksen määrää. Toinen vaihtoehto on automaattinen annostelujärjestelmä, joka säätelee emäksen määrää mittareiden ja palautepulssi annospumpun avulla. (Guide to Recirculation Aquaculture: Chapter 2 n.d.)

Biologisen vedenkäsittelyn jälkeen vedestä poistetaan ylimääräiset kaasut, joita on kerääntynyt veteen kaloista sekä puhdistusprosessista. Veden sisältämä kaasu on hiilidioksidia, jota syntyy kalojen hengityksestä sekä biologisen suodatuksen bakteereista. Kaasut ovat haitallisia kalojen terveydelle sekä kasvulle. Kaasujen poisto tapahtuu vettä ilmastamalla eli niin sanotulla veden strippauksella. (Bregnballe 2015, 25.) Ilmastuksessa ajetaan joko ilmaa veteen tai vettä ilmaan. Ilmastuksessa voidaan ilmaa ajaa veteen suurella paineella luoden kuplia. Turbulenttinen kosketus ilmakuplien ja veden välillä ajaa kaasut pois. Vettä voidaan myös valuttaa suodatinjärjestelmän läpi, jonka avulla hiilidioksidi saadaan pois. Laitteistona kaasunpoistossa voi toimia ilmastuskaivojärjestelmä tai valutus suodatinjärjestelmä. (Guide to Recirculation Aquaculture: Chapter 2 n.d.)

Vedessä täytyy olla tarvittava määrä happea kalojen hengittämistä varten. Prosessiin on jo lisätty happea ilmastamalla. Kalanmäärästä, veden viipymästä ja ruokinnasta riippuen on kuitenkin tarpeellista, että prosessi sisältää lisähapetuksen. Hapetuksessa käytetään joko nestemäistä happea tai happigeneraattorin avulla itsetehtyä happea. Nestemäinen happi on yleensä puhtaampaa ja vähemmän riskialtista, kuin happigeneraattorin avulla tehty happi. Kiertovesiproessia tulee hapettaa jatkuvasti. Kiertovesikasvatuksen altaiden tulovedenhapetuksessa pyritään 120–180 % kylläisyysprosenttiin, eli selkeään ylikylläisyyteen. On haluttua, että itse kala-altaiden happipitoisuus on 90–100 %. Altain happipitoisuuden seuraaminen on tärkeää. (Kiertovesiviljelyn perusteet n.d.)

Ennen kuin kiertovesi lasketaan takaisin kala-altaaseen, se desinfioidaan vielä kerran. Kiertovesikasvatuksessa yleisimmät tavat veden desinfiointille ovat UV-valo desinfiointi ja otsonointi. UV-valon avulla desinfiointi perustuu siihen, että syklinen valon luonti tunkeutuu bakteerin tai viruksen soluseinämän läpi ja tuhoaa sen DNA:n. Kyseiset taudinaiheuttajat eivät enää kykene monistumaan ja täten kuolevat pois, tehden vedestä kaloille vaarattoman. Kalanviljelyssä UV-lamppujen on oltava veden alla, jotta ne toimivat halutulla teholla. Toinen kiertoveden desinfiointi tapa on otsonointi. Otsonointi on tehokkaampi tapa taudinaiheuttajien hajottamiselle. Otsonoinnin avulla ei veteen myöskään jää mitään haitallisia jäämiä. Otsonointia on kuitenkin kritisoitu vedenpuhdistustapa, sillä otsonin yliannostus voi aiheuttaa vakavia vammoja kaloille, sekä sen liika hengittäminen on haitallista kiertovesilaitoksessa toimiville henkilöille. Otsonointi vaatii siis tarkan annostelut sekä tiukan seurannan. Desinfiointin jälkeen vesi palautuu takaisin kala-altaaseen. (Bregnballe 2015, 27.)

Kiertovesiprosessiin lisättävä uusi vesi voidaan ottaa suoraan joista, järvistä ja merestä. Prosessiin tuleva uusi vesi sterilisoidaan ja desinfioidaan ennen kuin se sekoitetaan kiertoveden kanssa. Kiertovesijärjestelmässä vesi voidaan ottaa myös taudittomasta lähteestä kuten porakaivosta tai kaivosta, jolloin vettä ei ole välttämätöntä puhdistaa. (Guide to Recirculation Aquaculture: Chapter 2 n.d)

Kiertovesikasvatus vaatii tuotannon tarkkaa valvontaa, jotta kalanviljely säilyy optimaalisena. Kasvatuksessa tapahtuvat tekniset viat voivat johtaa suuriin tuotannon menetyksiin. Nykyaikaisilla kiertovesilaitoksilla on tavanomaista valvoa ja ohjata veden lämpötilaa, happitasoja, vesitasoja ja pH:ta sekä pumpun moottoritoimintoja. Prosessin mittarit ja anturit ovat integroitu keskusohjausjärjestelmään, jonka avulla prosessia valvotaan. Kalojen automaattinen ruokinta on myös mahdollista integroida järjestelmään. Kun jokin parametreista siirtyy pois esiasetetusta arvosta, systeemin käynnistys/pysäytysprosessi pyrkii ratkaisemaan ongelman automaattisesti. Jos ongelma ei ratkea, hälytys laukeaa. Kasvatusprosessi vaatii automaatiosta huolimatta aktiivisen työntekijän, joka kykenee toimimaan paikan päällä hälytyksen käynnistyttyä. (Guide to Recirculation Aquaculture: Chapter 2 n.d.)

4.1.3 Lämmönsäätö kiertovesilaitoksessa

Kiertovesilaitoksissa tulevan veden lämpöä säädellään riippuen tuloveden lämpötilasta ja kasvatettava kalalajista. Pintavesi tuloveden lähteenä takaa vuodenajasta riippuen suuret lämpötilaerot, kun taas pohjaveden lämpötilan muutokset ovat pienempiä. Kiertoveden lämpötilan hallinta on tehokasta, sillä jokaisesta kierrosta vain 1–2 % on uutta vettä. Tuloveden lämpötilaa voidaan nostaa poistoveden lämpöenergian avulla. Kiertovesiprosessissa lämpöenergia siirretään lämmönvaihtimien avulla. Veden viilennyksessä voidaan käyttää hyväksi myös lämpöpumppuja. (Kiertovesiviljelyn perusteet n.d.)

Lämmönvaihtimen avulla vettä lämmitetään muiden nesteiden avulla. Nesteet kiertävät kennostossa kapeita virtauskanavia pitkin mahdollistaen lämmön johtumisen nesteiden välillä. Lämmönvaihtimen kennosto kerää kiintoainetta, joten sen puhdistaminen on tarpeellista ajoittain. Lämpöpumpussa pumpun kylmäaine höyrystyy ja höyry lämpenee paineen alla. Höyrystä syntynyt lämpö siirretään lämmityskohteeseen. Lämpöpumpun avulla voidaan myös jäähdyttää muuttamalla kylmäaineen virtausta. Lämpöpumppuja ei tarvitse huoltaa yhtä usein kuin lämmönsiirtimiä, mutta niiden nesteiden

pintoja täytyy tarkkailla ja järjestelmän mahdolliset sihdit ja suodattimet täytyy aika ajoin puhdistaa. (Kiertovesiviljelyn perusteet n.d.)

Kiertovesilaitosten lämmitykseen vaikuttaa myös laitoksen ilmanvaihto. Kala-altaat sijaitsevat lähes aina hallissa, jossa on koneellinen ilmanvaihto. Se kuluttaa suuren määrän energiaa varsinkin talvella, jolloin lämmityksen tarve on suurempi. Ilman esilämmitys voidaan hoitaa poistoilman lämpöenergialla ja tarvittava loppulämmitys saadaan vaikka hukkaenergiasta. Hukkaenergian ollessa vähäistä voidaan loppulämmityksen tarve myös saavuttaa esimerkiksi lämpöpumpulla tuotetulla energialla. Kiertovesilaitoksissa tarvittava sisälämpötila tulee olla muutama aste kiertoveden lämpötilaa korkeampi. Tämän avulla vältetään kosteuden keräytymiseltä laitoksen rakenteisiin ja laitteisiin. Lämmityksen lisäksi kiertovesilaitoksen ilmanvaihdon tulee huolehtia hallin hiilidioksidipitoisuuden pysymisestä tarvittavan alhaalla. (Kiertovesiviljelyn perusteet n.d.)

Kuviossa 5 on havainnollistettu kiertovesilaitoksen veden kiertoprosessi sekä kuvattu lyhyesti mikä tarkoitus jokaisella vaiheella on. Tarkoituksena on esittää kiertovesikasvatuksen monimutkaisuus sekä eri tekijöiden yhteisvaikutus, joiden avulla prosessi toimii.



Kuvio 5. Kiertovesikasvatuksen toimintaprosessi. (Lähde: Luonnonvarakeskus)

4.2 Läpivirtauskalankasvatus

Tosin kuin kiertoovesikasvatuksessa, läpivirtauskasvatuksessa samaa vettä ei kierretä prosessin ympäri uudestaan vaan nimensä mukaisesti sama vesi virtaa prosessin läpi vain kerran. Täten kyseisissä laitoksissa teknologia on hyvin yksinkertaista ja laitos vaatii vain kala-altaan sekä poisto ja tuloputken vedelle. Läpivirtaus laitoksissa kasvatetaan kalanpoikasia maa- ja keinoaltaissa. Läpivirtauslaitoksissa kasvatetut poikaset on tarkoitus sijoittaa jatkokasvatukseen ja istutuksiin. Kyseisessä kasvatusmuodossa olosuhteet, kuten veden laatu ja valon määrä, muistuttavat suurilta osin luonnonolosuhteita. Läpivirtauslaitoksissa ravinteiden poisto on hankalaa, sillä vesimäärät ovat suuret. Läpivirtauslaitoksissa lietteen keräys ei yleensä ole jatkuvatoimista, eikä lietteen jatkokäsittely yhtä pitkälle vietyä kuin kiertoovesilaitoksissa. (Kiuru 2022: Raceways 2019.)

Läpivirtauskasvatustiloja voi esiintyä niin merellä kuin maalla. Merellä tapahtuva läpivirtauskasvatustapahtuu verkkoaltaiden avulla, kun taas maalla tapahtuva kasvatustapahtuu tavallisten kasvatustaloiden avulla. Maalla sijaitsevat läpivirtauskasvatustilat muistuttavatkin paljon muita maalla sijaitsevia tiloja, ainoana erona on puhdistuslaitteiden puute sekä veden kertakäyttöisyys. Kuviossa 6 näkyy joen rannalla sijaitseva läpivirtauskala-tila. Joesta otettu vesi virtaa kala-altaiden läpi ja palaa sitten takaisin virtaukseen.



Kuvio 6. Läpivirtauskalankasvatustila (Lähde: Flow-Through Farms n.d)

4.3 Osittaiskiertokasvatustila

4.3.1 Perustietoa

Vedenkulutuksen määrän kannalta osittaiskiertokasvatustila sijoittuu edellä mainittujen kierto-vesikasvatustilan ja läpivirtauskasvatustilan väliin. Osittaiskiertokasvatustilassa jätetään pois biologiseen vedenkäsittelyyn tarvittava laitteisto. Tätä myöten osittaiskiertokasvatustila on kierto-vesikasvatustilaan verrattuna halvempi investoinnin kannalta sekä tilapaikalla voidaan minimoida infran vaatima tila. Luonnonvarakeskuksessa kehitetty osittaiskiertokasvatustila pyrkii monitoiminnallisten teknologioiden hyödyntämiseen, yksinkertaiseen rakenteeseen ja käyttöön sekä edullisten massatuotettujen komponenttien käyttöön. Osittaiskiertokasvatustila on kierto-vesikasvatustilan tavoin uutta teknologiaa, jonka ansiosta kyseiset prosessit kehittyvät koko ajan. (Kiuru 2022.)

Osittaiskiertokasvatusta pidetään kiertomenetelmille vaihtoehtoisena tapana kasvattaa lohikaloja sekä tarvittaessa sitä voidaan soveltaa muihin kalalajeihin. Kiertovesikasvatusta sekä osittaiskiertokasvatusta on kehitetty rinnakkain, kunnes noin kaksikymmentä vuotta sitten kehittäminen keskitettiin lähes ainoastaan kiertovesikasvatukseen. Osittaiskiertokasvatus siis jätettiin sivusijalle. Tähän päivään mennessä kiertovesikasvatuksesta ei ole vielä saatu taloudellisesti kannattavaa, joten kiinnostus osittaiskiertokasvatusta kohtaan on nousussa. Osittaiskiertokasvatuksen avulla kalanviljelyä voidaan myös puskea vieläkin ympäristöystävällisemmäksi energiankulutuksen kannalta, sillä osittaiskierron vähäisempi laitteistontarve kiertovesikasvatukseen tarkoittaa myös pienempää energiantarvetta. Land-based salmon handbookin mukaan maailmalla oli vuonna 2020 toiminnassa vain viisi osittaiskiertolaitosta, joista neljä sijaitsee Islannissa ja yksi Yhdysvalloissa. Suunnitteilla tai rakenteilla on yhdeksän osittaiskiertolaitosta, joista 8 tulee sijaitsemaan Norjassa ja yksi jälleen Yhdysvalloissa. (Kiuru 2022.)

4.3.2 Toiminta

Osittaiskiertokasvatus on vielä suurelta osin kehittämisvaiheessa maailmalla, joten yhtä oikeaa ja optimaalista osittaiskiertoa ei ole olemassa. Osittaiskiertojärjestelmät vaihtelevat siis suuresti toisiinsa nähden. Edellä mainittuun läpivirtauskalankasvatukseen voidaan esimerkiksi asentaa ilmastusjärjestelmä, jolloin järjestelmästä tulee yksinkertainen osittaiskiertokasvatusjärjestelmä. Pääosin osittaiskiertoa kuitenkin kuvaillaan kiertovesikasvatuksen kaltaisena prosessina, josta puuttuu biologinen suodatus ja nimensä mukaisesti vain osa prosessin vedestä kierretään. Kiertovesikasvatuksessa yleisesti 99 % kierron vedestä on jo kierrätettyä vettä, kun taas osittaiskiertokasvatuksessa se vaihtelee suuresti järjestelmästä riippuen. On järjestelmiä jossa 80 % prosessin vedestä kierretään uudestaan ja on järjestelmiä, jossa vesi ei enää kierrä uudestaan eli 0 % prosessin vedestä kierrätetään. Osittaiskiertokasvatuksen toiminnan hahmottamiseksi kuvaan kaksi erilaista prosessia. Kuvataan Yhdysvaltalaisen Shepherdstownin osittaiskiertomallin ja Luonnonvarakeskuksen oma osittaiskiertokonsepti.

Osittaiskiertoprosessi sisältää yhden tai useamman kalanviljelysäiliön. Useamman altaan ollessa käytössä vesivirtauksen tulee kulkea altaiden läpi rinnakkain, eikä sarjassa kuten perinteisissä uoma-allas kasvatustalleissa. Osittaiskiertokasvatuksessa pyöreillä altailla on etu, sillä veden pyörivän virtauksen myötä tankit pystyvät erottamaan kiintoaineen vedestä helposti.

4.3.3 Osittaiskiertokonseptin malliversio Yhdysvalloissa

Osittaiskiertokasvatus hahmottamisen avuksi kuvataan Yhdysvaltoihin rakennettu malliversio. Malliversio rakennettiin Shepherdstownin lähistölle Länsi-Virginiaan, joten tässä kuvauksessa kutsun sitä Shepherdstownin osittaiskiertokasvatusjärjestelmäksi. Länsi Virginiassa sijaitseva osittaiskiertokonsepti rakennettiin Shepherdstowniin vuonna 1999. Järjestelmän tarkoituksena oli tarkastella osittaiskierron mahdollisuuksia ja kannattavuutta sekä veden laatua ja jätteen talteenotto tehokkuutta, kun kasvatetaan kirjolohta ja nieriä. Kalankasvatuksen jälkeen tutkijat haluavat myös tarkastella sähköenergian kustannuksia ja muita ylläpitokustannuksia. Tämän kuvauksen avulla tullaan havainnollistamaan prosessin yleinen toiminta sekä sen eroavaisuus kierto-vesikasvatukseen.

Järjestelmässä on kolme Cornell-tyyppistä kaksipoistoista kala-allasta kytketty rinnakkain. Mekaanisena puhdistuslaitteena toimii rumpusuodatin. Järjestelmä sisältää myös pumppukaivon, kolme rinnakkain putkitettua pumppua, kaskadi-ilmastuskolonnin ja pohjasäiliön. Pohjasäiliön tarkoitus on tukea matalapaineista hapetusyksikköä sekä ohjata prosessin vettä takaisin viljelysäiliöön. Cornell-tyyppinen kala-allas on Yhdysvalloissa laajalti käytössä, sillä se toimii samalla pyörreselkeyttimellä, joka fraktioi nopeasti laskeutuvat kiintoaineet keskipoiston pienempään vesivirtaukseen. Shepherdstownin osittaiskiertojärjestelmän kolme tankkia ovat halkaisijoiltaan 3,66 m sekä syvyydeltään 1,10 m. Yhden tankin tilavuus vaihtelee 6,4–9,6 m³ välillä ja tankkien vesitilavuus vaihtui 15–26 minuutin välein mikä tarkoittaa, että järjestelmän kokonaisvirtaus on 1100–1900 l/min. Osittaiskiertoprosessille on tärkeää korkea veden vaihtointensiteetti, jotta prosessin kiintoaineita voidaan jatkuvasti sekä tehokkaasti puskea ulos järjestelmästä. Nopea veden vaihtuvuus on myös tärkeä, jotta kaloille saadaan kuljetettua happea nopeasti virtauksen mukana. Prossista poistuu vettä kiintoaineiden kanssa altaiden keski- viemärin kautta. Noin 12–18 % vedestä poistuu yhden kierron aikana, verrattuna kierto-vesijärjestelmään, jossa vettä poistuu yhden kierron aikana vain 1–2 %.

Osittaiskiertokonseptissa ei ole biologista suodatusta, mutta mekaaninen suodatus on osa prosessia ja sen tarkoitus on helpottaa kiintoaineiden poistoa. Shepherdstownin prosessissa kierron jäljelle jääneestä 82–88 % vedestä kulkeutuu altaiden sivuviemäreiden kautta mekaaniseen suodatukseen. Kyseisessä prosessissa suodatuksessa toimii rumpusuodatin. Rumpusuodattimesta poistuva vesi siirtyy

pumppukaivoon, josta se pumpataan eteenpäin prosessissa. Pumppukaivo on itsepuhdistuva ja kooltaan melko pieni.

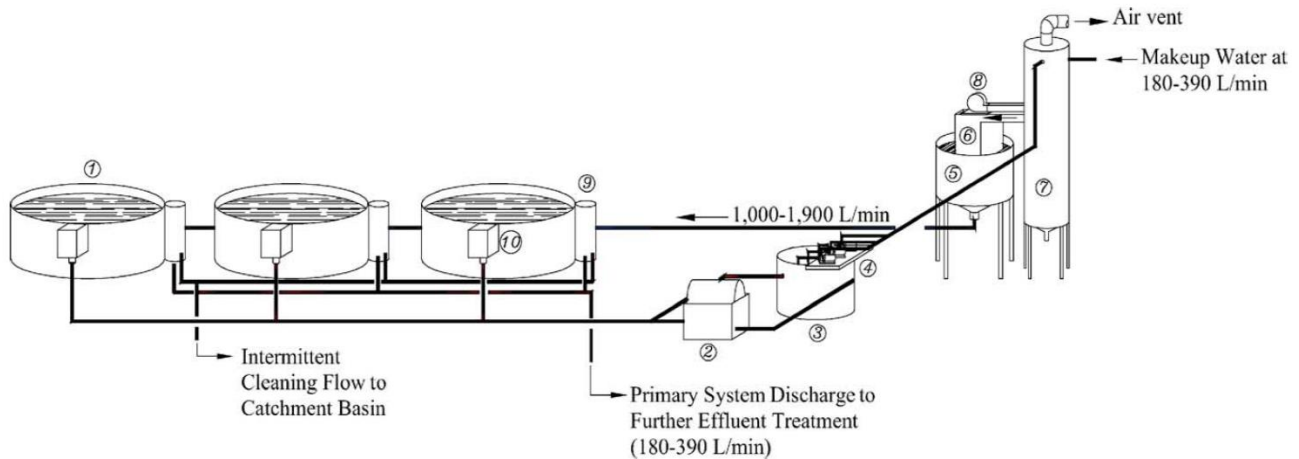
Prosessissa on kolme rinnakkain putkitettua 1,5 hv:n keskipakopumppua, joiden tarkoituksena on palauttaa vesi prosessin alkuun. Tämän osittaiskiertoprosessin kierto alkaa ilmastuksella eli suodatuksesta vesi pumpataan ilmastuspylvään yläosaan. Prosessissa kaksi pumppua ovat kokoajan toiminnassa ja kolmas pumppu on varapumppu. Kolmas pumppu voidaan myös käynnistää, kun halutaan lisätä altaiden huuhtelunopeutta ja täten nopeuttaa puhdistusprosessia.

Kiertovesikasvatuksen tavoin osittaiskiertokasvatuksesta tulee poistaa ei-haluttuja kaasuja kuten hiilidioksidia. Tämä prosessi tapahtuu ilmastamalla. Shepherdstownin prosessissa ilmastus tapahtuu 4,9 m korkean ja 1,1 m leveän pakkotuulettimen ilmastustornin avulla. Vesi johdetaan tornin yläosaan, josta ilmastusprosessi alkaa. Ilmastuksen aikana prosessiin lisätään täydennysvettä 14–21 % järjestelmän läpikulkevasta vedestä. Osittaiskiertoprosessin veden pH-arvoja voidaan säädellä säätämällä vedestä poistetun hiilidioksidin määrää. Säättely tapahtuu tuulettimen avulla ja veden pH-arvot pyritään pitämään 7,50–7,55 välillä. Prosessin pH:ta mitataan vain kala-altaassa.

Ilmastuksen jälkeen vesi siirtyy painovoiman avulla ilmastustornista hapetukseen. Shepherdstownin järjestelmässä hapetuksen lähteenä toimii LHO-järjestelmä, eli matalapaineinen hapetinjärjestelmä. Veden hapen määrää valvotaan neljän O₂-anturin avulla. Prosessin kolmen viljelytankin kunkin ulostuloon asennettiin yksi anturi ja neljäs anturi asennettiin mittaamaan virtauksen hapen määrää juuri ennen viljelysäiliöitä. Veteen pyritään laittamaan liuennutta happea 10 milligrammaa yhtä vesilitraa kohden.

Shepherdstownin osittaiskiertojärjestelmässä putkien koko ja kaltevuus mitoitettiin sen mukaan, että ne kykenevät liikuttamaan vettä tarvittavalla nopeudella, jotta putkien sisällä ei tapahdu sedimentaatiota. Putkien mitoituksilla pyritään myös minimoimaan vedenkorkeuden menetykset, sillä prosessiin tuotava vesi virtaa järjestelmään painovoiman avulla. Putkistoon sijoitettiin strategisesti myös puhdistuspisteitä, jotka mahdollistavat putkiston nopean ja yksinkertaisen huuhtelun. Huuhtelun avulla pyritään estämään lian kertyminen putkien sisäpinnoille. (Summerfelt, Davidson, Waldrop, Tsukuda &

Bebak-Williams 2004, 157–181.) Kuviossa 7 havainnollistetaan Shepherdstownin osittaiskiertokasvatustusmalli.



Kuvio 7. Shepherdstownin osittaiskiertokasvatustus malli. (Lähde: Summerfelt, Davidson, Waldrop, Tsukuda & Bebak-Williams 2004)

5 Lämpötilan hallinta

5.1 Lämpötilan hallinnan merkitys kalankasvatuksessa

Lämpötilan hallinta on tärkeä muuttuja kalankasvatuksessa. Sen avulla voidaan ylläpitää optimaalinen veden lämpötila ympäri vuoden, mikä taas eliminoi kalojen ruokinnassa ja kasvunopeudessa esiintyvät vuodenajasta riippuvat vaihtelut. Sitä ei voida kuitenkaan hyödyntää useissa kalankasvatustavoissa vaihtelevan veden määrän takia. Maalla tapahtuvalle intensiiviselle vesiviljelylle, kuten kiertovesikasvatukselle, vesi on hyvin kriittinen tekijä ja sen lämpötilan hallinta on tärkeää optimaalisen kalankasvatuksen kannalta. Lämpötilan hallinnan teknillisenä tavoitteena on kustannus- ja energiatehokas laitteisto. (Better temperature control in fish farms 2011.)

Lämpötila on oleellinen elementti organismien kasvulle ja selviytymiselle. Veden lämpötila on elintärkeä kalojen kasvulle sillä ne ovat vaihtolämpöisiä eläimiä, joten ne eivät voi hallita omaa ruumiinlämpöään vaan niiden ruumiit tasapainottuvat ympäröivän veden mukaan. Boydin mukaan (2018) eri kalalajien lämmönsietokyvyt myös vaihtelevat. Kylmän veden lajit eivät siedä 20–25 °C lämpötilaa. Läm-

pimän veden lajit selviävät melko alhaisissakin talvilämpötiloissa, mutta lisääntymistä varten ne tarvitsevat yli 20 °C vettä ja kasvamista varten yli 10–15 °C vettä. Trooppisen veden kalalajit taas kuolevat 10–20 °C lämpötiloissa ja vaativat yli 25 °C kasvua varten. Boyd kuitenkin painottaa, että kyseiset asteluvut ovat yleisiä lukuarvoja ja jokaisella kalalajilla on omat tarkemmat veden asteluvut elämiselle. (Boyd 2018.)

Lämpötilan hallinta takaa varmuuden kasvattaa kalaa ympäri vuoden. Veden lämpötilan hallinta voi kuitenkin olla kustannusten kannalta taakka kalanviljelylle. Laitteiston investointi-, käyttö- ja huoltokustannukset voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Kalanviljelylaitoksille suuri yksittäinen tekijä on lämmön talteenotto. Lämmöntalteenottojärjestelmän olemassaolo on tärkeä järjestelmälle, sillä se tulee määrittämään laitoksen kokonaisenergiatarpeen sekä vaadittavien lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden koon. Lämmön talteenoton myötä tulovesi vaatii vähemmän lämmitystä, jolloin lämmityslaitteesta voidaan mitoittaa pienempi, mikä taas säästää investointikustannuksissa sekä energiakustannuksissa. Lämmön talteenotto voi myös olla lämmönsiirtimen avulla passiivista, eli talteenottoprosessi ei itsessään vaadi energiaa, mikä tekee siitä energiatehokkuuden kannalta järkevän. Lämpöpumppu taas kuluttaa sähköenergiaa, minkä takia on tärkeää, että se toimii talteenoton kanssa samassa. Lämmön talteenotto takaa siis pienemmän energiakulutuksen sekä pienemmän mitoitusvaatimuksen lämpöpumpulle. Pienempi lämpöpumppu taas säästää huoltokustannuksissa. (Towers 2013.)

Towersin (2013) mukaan yksi iso ongelma kalanviljelyn veden lämpötilan hallinnassa on lämmönsiirtimen puhtaana pitäminen. Ravinnepitoisen veden mukana tulevat kiinteät aineet voivat liata tai jopa tukkia lämmönvaihtimen kapeat tilat. Ravinnepitoinen vesi voi myös johtaa bakteerien kasvuun. Lämmönvaihdin siis vaatii ajoittaista huoltoa ja puhdistusta. Puhdistus voi olla kemiallisia kylpyjä tai mekaanista paineistetun veden suihkuttamista. Lämmönsiirtimen likaantumisen kannalta on tärkeää pitää silmällä veden painetta ja lämpötiloja siirtimen tulo- ja poistoaukkojen ympärillä. Paineiden ja lämpötilojen muutoksen avulla voidaan likaantuminen havaita nopeasti varhaisessa vaiheessa ennen kuin se kerkeää vaikuttamaan energiakustannuksiin. (Towers 2013.)

Veden lämpötilan hallinnassa tulee ottaa huomioon muutakin kuin vain lämmön ja jäähdytyksen tuottava laitteisto. Veden lämpötilaan vaikuttaa kalojen ja rehun lämmöntuotto, laitteiston hukkalämpö,

ilmanvaihto, henkilöstö, sääolosuhteet, veden määrä ja kasvatusalaiden sekä putkistojen eristykset ja käytetty materiaali. Veden lämpötilaan vaikuttaa siis monta tekijää, joten kun halutaan selvittää lämpötilan hallinnan mahdollisuuksia ja kustannuksia, tulee kohteesta riippuen ottaa huomioon veden lämpötilaan vaikuttavat tekijät.

5.2 Laskennan lähtötiedot ja kaavat

Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokonsepti on melko yksinkertainen verrattuna muihin maailmalla nähtäviin osittaiskiertomenetelmiin, mutta samat lainalaisuudet pätevät niihinkin. Järjestelmä on rakennettu kolmen kontin ympärille, kaksi 12 metristä konttia ja yksi kuusi metrinen kontti. Vuonna 2020 konteissa käytettiin vettä 10 000 l/syötetty rehukilo. Vuonna 2022 mentiin jo tiukempaan vedenkäyttöön, mutta intensiteetti nousi pikkuhiljaa kalojen ja ruokinnan kasvaessa. 12 metrin konteissa uuden veden virtaus pidettiin tasolla 2,5 l/s ja 6 metrin kontissa 1,25 l/s. Prototyyppien rakenne vaati tuon verran virtausta, jotta ulosteiden poisto toimi. Jälkimmäisessä 6 m kontissa maksimiruokinta oli 20 kg/vrk, joten loppuvaiheessa vedenkäyttö oli pienimmillään 5400 l/syötetty rehukilo.

Toimeksiantaja uskoo, että pienellä muutoksella poistovesitykseen, vedenkäyttöä voidaan edelleen vähentää merkittävästi. Kyseisen osittaiskiertokonseptin kaltaisissa pienissä systeemeissä ei voida kiinnostaa vedenkäyttöä enempää, sillä veden nitriittipitoisuus nousee muuten liian korkeaksi. Nitriittiä muodostaa altaan pinnoilla elävät biofilmibakteerit, ja pienissä altaissa on enemmän seinämäpinta-alaa suhteessa vesikuutioihin kuin suurissa altaissa. Teoriassa suurissa altaissa pitäisi päästä jopa 1000 l/syötetty rehukilo vedenkulutukseen, jos käytössä on vettä, jonka alkaniteetti on alhainen. Tällöin vedenkäyttö olisi samaa luokkaa kuin kiertovesilaitoksissa.

Luonnonvarakeskus haki alarajaa veden käytölle kasvatuskokeissa ja tarkoituksena oli rakentaa laskentamalli, jolla lämmönsäädön kustannukset saadaan kätevästi selville eri vedenkäyttöillä. Lisäksi huomioidaan passiivisen energian siirron ja lämpöpumpputekniikan hyötysuhteet. Tarvittavan tekniikan ja hyötysuhteet kuvattiin työssä. Laskennassa tutkitaan myös mahdollista ilmanvaihdon energiakustannuksia. (Kiuru 2022.)

Veden lämmittämiseen kuluvan energian määrä (kWh) lasketaan kaavalla 1.

$$Q = (\rho \cdot C_p \cdot V \cdot (t_2 - t_1)) / 3600 \quad (1)$$

Missä

ρ = Veden tiheys, kg/m³

C_p = Veden ominaislämpökapasiteetti, kj/kg°C

V = Veden kulutus, m³

t_2 = Lämmitetyn veden lämpötila, °C

t_1 = Lämmitettävän veden lämpötila, °C

3600 = Yksikkömuunnoskerroin, kj -> kWh

Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve (kWh) lasketaan kaavalla 2.

$$Q_{iv} = t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot C_{pi} \cdot q_{v,tulo} \cdot ((T_{sp} - \Delta T_{puhallus}) - T_{lto}) \cdot \Delta t / 1000 \quad (2)$$

Missä

t_d = Ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde, h/24 h

t_v = Ilmanvaihtolaitoksen viikottainen käyntiaikasuhde, vrk/7 vrk

ρ_i = Ilman tiheys, kg/m³

C_{pi} = Ilman ominaislämpökapasiteetti, j/kg·K

$q_{v,tulo}$ = Tuloilmavirta, m³/s

T_{sp} = Sisäänpuhalluslämpötila, °C

$\Delta T_{puhallus}$ = Lämpötilan nousu puhaltimessa, °C

T_{lto} = Lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila, °C

Δt = Ajanjakson pituus, h

Lämmön talteenottolaitteen jälkeinen lämpötila (°C) lasketaan kaavalla 3.

$$T_{lto} = T_u + (\phi_{lto} / (t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot C_{pi} \cdot q_{v,tulo})) \quad (3)$$

Missä

T_u = Ulkoilman lämpötila, °C

ϕ_{lto} = Lämmöntalteenotolla talteenotettu kuukauden keskimääräinen teho, W

t_d = Ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde, h/24 h

t_v = Ilmanvaihtolaitoksen viikottainen käyntiaikasuhde, vrk/7 vrk

ρ_i = Ilman tiheys, kg/m³

C_{pi} = Ilman ominaislämpökapasiteetti, j/kg·K

$q_{v,tulo}$ = Tuloilmavirta, m³/s

Lämmöntalteenotolla talteenotettu teho (W) lasketaan kaavalla 4.

$$\phi_{ito} = n_{a,ivkone} \cdot t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot q_{v,poisto} \cdot (T_s - T_u) \quad (4)$$

Missä

$n_{a,ivkone}$ = Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde, W

t_d = Ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde, h/24 h

t_v = Ilmanvaihtolaitoksen viikottainen käyntiaikasuhde, vrk/7 vrk

ρ_i = Ilman tiheys, kg/m³

C_{pi} = Ilman ominaislämpökapasiteetti, j/kg·K

$q_{v,poisto}$ = Poistoilmavirta, m³/s

T_s = Sisälämpötila, °C

T_u = Ulkolämpötila, °C

Ilmavirtojen (dm³/s) mitoitus huoneen epäpuhtauksien mukaan lasketaan kaavalla 5.

$$q_{tulo} = G_{co2} / (C_{poisto} - C_{tulo}) \quad (5)$$

Missä

G_{co2} = Epäpuhtausvirta, cm³/s

C_{poisto} = CO₂-pitoisuus poistoilmavirrassa, cm³/m³

C_{tulo} = CO₂-pitoisuus tuloilmavirrassa, cm³/m³

5.3 Laskenta

5.3.1 Veden lämpötilanhallinta

Veden lämmitykseen tarvittavan energiamäärän selvitys on itsessään yksinkertainen laskutoimitus.

Tarkan energiamäärän selvittämistä varten täytyy kuitenkin ottaa huomioon myös muut veden läm-

pötilaan vaikuttavat tekijät. Tässä tapauksessa kalojen ja rehun tuottama lämpöenergia sekä laitteiston tuottama lämpöenergia. Selvitetään näiden tekijöiden tuottama lämpö celsius-asteina, joka sitten miinustetaan tarvittavasta tulolämpötilasta. Laskentamallissa otetaan huomioon myös lämmöntalteenotto, vaikka toimeksiantajan järjestelmässä ei sellaista tällä hetkellä ole.

Laskennan alussa selvitetään lämmitysenergian tarve kaavalla kaavalla 1. Energiatarve lasketaan jokaiselle kuukaudelle erikseen. Veden kulutus riippuu veden virtausmäärästä ja on täten muunneltavissa oleva arvo. Menoveden lämpötila on 14°C ja tuloveden lämpötila riippuu vedenlähteestä ja vuodenaikasta. Tulokseksi saadaan jokaisen kuukauden lämmitysenergiatarve kilowattitunteina ja kun nämä tulokset yhdistetään, saadaan koko vuoden lämmitysenergiatarve. Laskentamallissa kuvataan myös lämmitystarve per litra eli kWh/l sekä veden käyttö per rehukilo eli l/kg.

Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertolaitoksessa tulovesi saadaan putkella läheisestä järvestä. Vedenlähteitä on kaksi: Järven pintavesi ja syvänevesi. Lähteistä löytyy mittaustiedot vuodesta 2005 vuoteen 2015. Laskentamallissa käytettiin hyväksi näiden mittaustietojen keskiarvoja, sillä toimeksiantajan mukaan niiden lämmöt ovat pysyneet samoina tähän vuoteen asti. Taulukosta yksi nähdään tuloveden keskilämpötilat joka kuukaudelle vuosilta 2005–2015. Joka kuukaudelle on valittu lämpimin lämmönlähde kolmen lähteen väliltä, jotta veden lämmitys vaatii vähiten energiaa. Valittu lähde on merkitty tummankeltaisella. Heinäkuussa ja elokuussa tuloveden lämpötila nousee yli halutun menovedenlämpötilan, eli 14°C. Näinä kuukausina vettä siis tarvitse lämmittämisen sijaan jäädyttää. Koneelliselle jäädytykselle ei ole kuitenkaan tarvetta, sillä tuloveden lähteeksi voidaan vain valita kylmempi vedenlähde, esimerkiksi pohjavesi, joka kyseisinä kuukausina alittaa halutun menoveden lämpötilan. Tuloveden lähteitä voidaan myös sekoittaa keskenään, jolloin heinä- tai elokuussa ei myöskään tarvitse lämmittää vettä, joka osittain otetaan viileämmästä lähteestä. Taulukossa yksi on myös kuvattu kolmas tulovedenlähde, jokivesi. Tätä lähdetä ei kuitenkaan tarvita, sillä se on liian viileää sekä joki virtaa laitosaluetta alempana, kun taas järvi sijaitsee korkeammalla, jolloin vesi saadaan järjestelmään painovoimaisesti.

Tuloveden lämpötilat 2005–2015. (kuukausi/celsius)			
	pinta	syväne	joki
Tammikuu	1,4	1,9	0,7
Helmikuu	1,5	2,1	0,6
Maaliskuu	1,7	2,2	0,7
Huhtikuu	2,6	2,9	2,1
Toukokuu	7,5	6,3	7,0
Kesäkuu	13,7	8,8	5,5
Heinäkuu	17,8	10,1	0,0
Elokuu	18,3	11,4	0,0
Syyskuu	13,9	12,2	0,0
Lokakuu	8,2	8,1	5,0
Marraskuu	3,7	3,8	3,5
Joulukuu	1,6	1,8	1,1

Taulukko 1. Tuloveden lämpötilat 2005–2015. (Lähde: Luonnonvarakeskus)

Laskennassa tulee ottaa huomioon osittaiskiertojärjestelmästä veteen siirtyvä hukkalämpö. Hukkalämpö lämmittää itsessään vettä ja täten pienentää lämmityslaitteiden energiantarvetta. Hukkalämpöä siirtyy veteen kaloista sekä laitteistosta. Kalojen tuottama lämpö riippuu kalojen ja rehun määrästä, rehun sisällöstä sekä kalatyypistä. Laitteistosta etenkin pumppaus ja mekaaninen suodatus voivat tuottaa lämpöä. Laitteiston lämmöntuotto riippuu siitä, ovatko ne kosketuksissa allasveden kanssa ja täten niiden hukkalämpö siirtyy veteen. Muita lämpöä tuottavia tekijöitä ovat valaistuksen ja mitauslaitteiden tuottama lämpö, mutta niiden tuottama lämpö oletettavasti hyvin pieni osa kokonaisuutta. Esimerkiksi kalojen ja rehun tuottaman lämpöenergian laskennassa rehun käyttö selvitetään kertomalla tuotantokapasiteetti rehukertoimella. Rehun lämmöntuotto saadaan selvitettyä kertomalla hiilihydraattien, rasvan ja proteiinin energia niiden prosentuaalisella määrällä ja lopuksi siitä miinustetaan kalan energia. Kalojen lämmöntuotto selvitetään kertomalla rehun käyttö rehun lämmöntuotolla. Lopuksi megajoulet vaihdetaan kilowattitunneiksi. Rehun sisältöä voidaan muuttaa halutulla tavalla.

Laskentamallissa otetaan huomioon myös lämmön talteenotto, vaikka toimeksiantajan järjestelmässä sitä ei ole. Lämmön talteenotossa hyödynnetään poistuvan veden lämpötilaa tulovedenlämmityksessä. Tämän avulla tuloveden lämmityksessä säästetään energiankulutuksessa ja koko järjestelmän

energiatehokkuus paranee. Talteenotettu lämpöenergia miinustetaan tuloveden lämmittämiseen menevästä lämpöenergiasta. Lämmön talteenotolla on suuri vaikutus lämmityksen kokonaistarpeeseen.

5.3.2 Ilmanvaihto

Laskentamallin ilmanvaihto-osiossa tarkoituksena oli rakentaa laskentamalli, jonka avulla voidaan selvittää ilmanvaihdon energiakustannukset rakennukselle, jonka sisälle osittaiskiertojärjestelmä voitaisiin sijoittaa. Ensin rakennettiin tyypillinen laskuri rakennuksen ilmanvaihdon energiatarpeen selvittämiseksi. Toiseksi selvitettiin kuinka paljon koko järjestelmä tuottaa energiaa, joka tulisi poistaa ilmanvaihdon avulla. Tärkeimpänä huomioonotettava asiana on kalojen hiilidioksidin tuotto.

Aluksi selvitettiin ilmanvaihdon lämmityksen energiatarve, joka saadaan laskettua kaavalla 2. Laskentamallissa kaavan ainoat arvot, joita ei voida muuttaa ovat ilman tiheys ja ilman ominaislämpökapasiteetti. Laskennassa mennään sillä oletuksella, että ilmanvaihto on päällä 24 tuntia päivässä, seitsemän päivää viikossa. Tuloilmavirta saadaan kertomalla ulkoilmavirta ja pinta-ala keskenään ja saatu tulos jaetaan tuhannella, jotta arvo on muodossa m^3/s . Ulkoilmavirta arvon selvittämisessä tulee hyödyntää käyttötarkoituksen arvoja. Esimerkiksi asuinkerrostalossa ulkoilmavirta on $0,5 \text{ dm}^3/(s \cdot m^2)$, kun taas sairaaloissa ulkoilmavirta on $4 \text{ dm}^3/(s \cdot m^2)$. Kalanviljelyn osittaiskiertokasvatuslaitokselle ei löydy kyseistä arvoa, joten toimeksiantajan tulee päättää se itse.

Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarpeen kaavasta löytyy myös arvo T_{lto} , eli lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila. Kyseinen arvo selvitetään kaavalla kolme. Laskennassa hyödynnetään säävyöhykkeen kolme ulkoilman lämpötiloja, sillä Luonnonvarakeskuksen laitos sijaitsee kyseisellä vyöhykkeellä. Kaavan kolme laskeminen vaatii arvon ϕ_{lto} , eli lämmön talteenotolla talteenotettu kuukauden keskimääräinen teho. Kyseinen arvo voidaan laskea kaavalla neljä. Kaavan kolme ja neljä laskemisen myötä voidaan viimein laskea kaava kaksi ja selvittää ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve. Vastaus saadaan kilowattitunteina.

Ilmanvaihdon laskentamallissa on myös selvitetty ilmanvaihdosta talteenotettu energia, tuloilman lämpöenergian tarve sekä ilmanvaihdon lämmityspatterin teho. Kyseisten lukuarvojen laskemisessa käytetään samoja lukuarvoja, joita käytettiin jo edellisissä kaavoissa.

Ilmanvaihdon laskennassa selvitettiin myös ilmajvirtojen mitoitusarve huoneen epäpuhtauksien mukaan. Laskenta suoritettiin kaavalla viisi. Ensin selvitettiin epäpuhtausvirta, joka saadaan laskemalla rakennuksen sisällä tapahtuvan hiilidioksidin syntyminen. Usein tarvitsee selvittää vain ihmisten määrä ja oleskeluaika, mutta tässä tapauksessa suurin tekijä hiilidioksidin synnylle ovat tietenkin kalat. Hiilidioksidin määrä riippuu rehu- ja kalamäärästä sekä järjestelmän tyypistä. Laskennassa hyödynnettiin tietoa, että kalat tuottavat 350 grammaa hiilidioksidia sekä 18,2 grammaa ammoniumia syötettyä rehukiloa kohti. Ammoniumin määrä on tärkeää, kun lasketaan kiertovesikasvatusta, sillä biofilteri tuottaa 146 grammaa hiilidioksidia puhdistessaan 18,2 grammaa ammoniumia. Osittaiskiertokasvatuksessa ei ole kuitenkaan biologista suodatusta, joten hiilidioksidia muodostuu rehukiloa kohti 350 grammaa osittaiskiertolaitoksessa, kun taas kiertovesilaitoksessa rehukiloa kohti syntyy 496 grammaa hiilidioksidia. (Summerfelt & Sharrer 2003.) Epäpuhtausvirran selvittämiseksi siis laskettiin rakennuksen sisällä tapahtuvan hiilidioksidin kokonaistuoton määrä grammoina vuorokaudessa, joka laskentaa varten muutettiin muotoon kuutiosenttimetriä sekunnissa.

Kaavan viisi laskemista varten tarvittiin myös CO₂-pitoisuuden tulo- ja poistoilmavirrat. Tuloilmavirran lukuna käytettiin 400 cm³/m³, koska ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden voidaan olettaa olevan 400 ppm. Poistoilman CO₂-pitoisuus taas riippuu rakennukselle asetetusta hiilidioksidimäärän raja-arvosta. Laskentaoppaan mukaan on määrätty, että sisäilman hiilidioksidin hetkellisen pitoisuuden suunnitteluarvo huonetilan suunniteltuna käyttöaikana voi olla enintään 800 ppm suurempi kuin ulkoilman pitoisuus (Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella 2018).

6 Tulokset

6.1 Laskennan tulokset

Tulokseksi saatiin laskentamalli, jonka avulla voidaan selvittää järjestelmän veden lämpötilan hallinnan energiankulutusmäärä eri vesimäärillä. Tarkoituksena ei ollut laskea yhtä lukuarvoa tietyillä parametreilla vaan luoda laskuri, jonka avulla voidaan selvittää lämpötilan hallinnan energiakustannukset eri muuttujien avulla. Toimeksiantaja voi muuttaa prosessin veden lämpötiloja, veden virtausmäärää, rehun määrää tai kalojen määrää vapaasti ja laskuri kertoo muuttuvan energiankulutusmäärän. Taulukosta kolme nähdään miten laskentamallin tulokset ovat kuvattu. Prosessin kokonaislämmöntarve on

kuvattu alimmaisena, mutta taulukossa kuvataan myös kuinka paljon energiaa kuluu yhden litran lämmittämiseen, kuinka monta litraa voidaan lämmittää yhdellä kilowattitunnilla sekä kuinka monta kilowattituntia kuluu yhden litran lämmittämiseen yhdellä asteella. Yleinen muistisääntö on, että tuhanen litran lämmittäminen yhdellä asteella ylöspäin kuluttaa noin yhden kilowattitunnin energiaa.

Lämmitystarve per litra	
0,00764	kWh/l
Veden lämmitys yhdellä asteella	
0,00124	kWh/l
1000 litraa lämmitetään yhdellä asteella	
1,240	kWh
Lämmitystarve per kWh	
130,9	l/kWh
Lämmitystarve vuodessa	
301102	kWh

Taulukko 2. Veden lämpötilan hallinnan energiakulutus.

Laskentamallin oli tarkoitus vastata toimeksiantajan nykyisen osittaiskiertokonseptin tarpeita, mutta samalla taata mahdollisuus laskentamallin käyttöön myös tulevaisuudessa tehtäville osittaiskiertolaitoksille. Tuloksena siis saatiin tehtyä laskentamalli, jonka avulla voidaan selvittää veden lämpötilan hallinnan vaatiman energiantarve. Laskentamalli ottaa huomioon prosessissa tuotettavan lisälämmön määrän. Laskennassa lisälämpöä tuottaa kalojen ja rehun määrä sekä laitteisto. Laskennassa otettiin huomioon myös laitteisto, eli tässä tapauksessa lämmön talteenotosta vastaava lämmönsiirrin sekä lämpöpumppu. Lämmön talteenotolla on suuri vaikutus järjestelmän kokonaistarpeeseen, joten se oli tärkeää sisällyttää laskuriin. Myös lämpöpumpun COP-arvo on otettu huomioon. Lämpöpumpun tarkoituksena on huolehtia lisälämmityksestä, eli tarvittavan lämmön tuotosta, mitä ei talteenotolla

saada lämmitettyä. Laskentamalli täten siis kertoo lämmitystarpeen sekä tarvittavan energian mikä laitteistoilta vaaditaan.

Laskentamallin avulla voidaan myös laskea se, miten lämmitysenergiatarve muuttuu tuotannon kasvaessa tai pienentyessä. Tuotantokapasiteettia, eli tuotannon määrää, nostamalla täytyy myös nostaa rehun määrää, jotta kalat saavat tarvittavan määrän ravinteita. Rehun käytön noustessa tulee myös nostaa veden virtauksen määrää, sillä laitos vaatii tarvittavan määrän vettä per rehukilo, jotta puhdistus toimii. Tuotannon noustessa nousee siis myös lämpötilan hallinnan energiantarve. Samalla kuitenkin nousee myös järjestelmän tuottaman lisälämmön määrä. Veden lämpötilan hallinnan energiankulutuksen laskentamallin avulla voidaan myös tehdä tulevaisuudessa investointeja energiatarpeen mukaan.

Ilmanvaihdon energiakulutuksen selvittäminen oli opinnäytetyössä toissijainen tavoite, jonka tarkoituksena oli toimia lähinnä pohdintana. Ensin luotiin laskentamalli, jonka avulla pystytään selvittämään rakennuksen lämmitysenergian nettotarve sekä ilmanvaihdon tehontarve. Laskennassa hyödynnettiin Ympäristöministeriön rakentamismääräyskokoelmaa, jonka ohjeet noudattavat voimassa olevia tekniisiä standardeja ja määräyksiä. Tulokseksi saatiin laskentamalli, jonka avulla voidaan selvittää joka kaudelle ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve sekä ilmanvaihdon tehontarve rakennuksessa. Ilmanvaihdon laskennan toisessa osiossa luotiin laskuri järjestelmän hiilidioksidin kokonaistuotolle sekä laskettiin ilmapirran tarve epäpuhtausvirran mukaan. Ilmanvaihdon laskentamallia voidaan myöskin hyödyntää tulevaisuudessa tehtävissä ilmanvaihdon energiatarpeen selvityksissä sekä siitä tehtävissä investoinneissa.

6.2 Kehittämisideat

6.2.1 Jäteveden lämmön talteenotto

Oleellinen tapa energiatehokkuuden parantamiseen on lämmön talteenotto poistovedestä. Lämpöenergiaa voidaan siis ottaa poistuvasta vedestä ja hyödyntää sitä tuloveden lämmittämiseen. Näin tuloveden lämmittämisen tarvittava ulkoinen energiamäärä pienenee ja lämmityskustannuksissa säästetään. Veden lämmön talteenotto on yleistynyt asuinrakennuksissa, sillä energiatehokkuusvaatimukset ovat kasvaneet ja lämmön talteenottotekniikka on kehittynyt. Poistuvan veden, eli jäteveden lämmön

talteenotolla voi kuitenkin olla seurauksia jätevesiverkoille sekä veden puhdistusprosessille. Pitkämäen ja Raivion (2021) mukaan vesi voi helpommin jäätyä putkistoon kylminä kuukausina, jos poistuvasta vedestä otetaan liikaa lämpöenergiaa talteen. Toinen mahdollinen haittatekijä on lämmöstä riippuvaisen vedenpuhdistuksen tehon heikkeneminen. Tämä tarkoittaisi sitä, että puhdistusprosessin energiatarvetta tulisi kasvattaa mistä taas johtuisi prosessin energiakulutuksen nouseminen. Suomessa ei kuitenkaan ole lainsäädäntöjä, jotka rajoittaisivat poistoveden lämmön talteenottoa kiinteistöissä. Pitkämäen ja Raivion (2021) mukaan veden lämmön talteenotto olisi järkevintä toteuttaa keskitetysti puhdistamon jälkeen. Tämä tarkoittaisi sitä, että lämpöenergian talteenotosta ei olisi suoraa taloudellista hyötyä kuluttajalle, mutta välttyttäisiin vesijärjestelmän mahdolliselta vahingoittumiselta. (Pitkämäki & Raivio, 2021.)

Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokonseptissa veden lähteenä toimii läheinen järvi, sekä veden puhdistus suoritetaan järjestelmän yhteydessä. Tämä tarkoittaa, että putkistojen jäätyminen sekä puhdistusprosessin tehon heikkeneminen eivät uskottavasti ole suuri huolenaihe järjestelmälle, jos jäteveden lämmöntalteenotto aiotaan asentaa järjestelmään. Veden poistoputkiston jäätymistä on kuitenkin hyvä pitää silmällä, jos osittaiskiertojärjestelmää aletaan pitämään myös talvella käynnissä, veden lämmityksen ansiosta. Jäteveden lämpöenergia voidaan ottaa talteen lämmönsiirtimillä tai varaajilla. Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertojärjestelmässä jäteveden lämmöntalteenotto olisi kätevinä suorittaa lämmönsiirtimen avulla. Haaleammilla jätevedenlämpötiloilla (25–10°C) lämmöntalteenoton avuksi usein tarvitaan myös lämpöpumppu, jonka avulla lämpötila voidaan nostaa halutulle tasolle. Lämpöpumpun avulla lämmöntalteenottoa voidaan myös tehostaa entisestään. (Jäteveden lämmöntalteenotto)

Ennen kuin investoidaan lämmöntalteenottolaitteistoon, tulee arvioida sen kannattavuutta. Järjestelmän taloudellista kannattavuutta voidaan arvioida veden käytön, sähkön käytön sekä huollon kannalta. Pienen käyttövesimäärän myötä jätevesivirta on vähäistä ja täten lämmön talteenoton takaisinmaksuaika pitenee. Kalan osittaiskiertoviljelyssä käyttövesimäärät ovat kuitenkin suuret, joten veden kulutuksen kannalta lämmön talteenoton voidaan olettaa olevan kannattavaa. Lämmöntalteenotto-laite voi olla sähköä kuluttava laite tai sähköä kuluttamaton laite, eli passiivinen. Sähköä kuluttavan

lämmöntalteenottolaitteen kannattavuudessa täytyy taas katsoa vedenkulutusmääriä. Pienillä vesimäärillä sähköä kuluttava laite on turha. Kolmanneksi kannattavuudessa tarkastellaan huoltotarvetta. Laitteistoa tulee puhdistaa säännöllisin aikavälein tai putkisto voi tukkeutua. Puhdistus on erityisen tärkeää, jos veden lähteenä toimii luonnonvarainen vesilähde. Epäpuhdas vesi voi myös sisältää suuria partikkeleita, jotka voivat hajottaa laitteiston. Laitteiston hajoaminen lisää korjauskustannuksia, joka johtaa investointikustannusten kasvuun.

Jäteveden lämmöntalteenotolla voidaan siis parantaa osittaiskiertoprosessin energiatehokkuutta sekä täten tehdä säästöjä energiakustannuksissa. Takaisinmaksuaikaa laskiessa tulee ottaa huomioon laitteiston investointi- ja huoltokustannukset.

6.2.2 Ilmastointi

Toinen kehittämisidea oli ilmanvaihto. Ilmanvaihdon tehtävänä on poistaa sisäilman epäpuhtauksia ja kosteutta. Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokasvatusjärjestelmä sijaitsee ulkona, mutta tulevaisuudessa rakennettavat järjestelmät voidaan asettaa halliin kierto-vesijärjestelmien tavoin. Tällöin rakennuksen sisäilman ilmanvaihdolla on myös merkitys osittaiskiertojärjestelmään. Laskentamalliin tehtiin ilmanvaihdon energiantarpeen laskentamalli, joka sisältää lämmön talteenoton. Laskentamallin avulla voidaan selvittää ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve sekä ilmanvaihdon tehontarve. Kalanviljelymenetelmät myös tuottavat suuren määrän hiilidioksidia, mikä tulee ottaa huomioon ilmanvaihdossa ja laskentamallissa onkin selvitetty epäpuhtausvirrasta riippuva ilmapirrantarve.

Ilmanvaihdon energiatehokkuudella on suuri vaikutus rakennuksen lämmityskustannuksiin. Rakennuksessa, joissa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, lämmitykseen kuluva energia 20–40 % voi johtua ilmanvaihdosta. Ilmanvaihdon energiatehokkuutta pidetään yllä säännöllisillä huolloilla sekä järkevillä käyttöaikojen säädöillä. Ilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan taas parantaa lämmön talteenotolla. Lämmön talteenottoa ei voida hyödyntää painovoimaisissa ilmanvaihdossa tai sellaisissa ilmanvaihdossa, joissa on vain koneellinen poistoilmanvaihto. Lämmön talteenoton hyödyntämiseksi siis tarvitaan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Koneellisen poistoilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan myös parantaa asentamalla poistoilmalämpöpumppu, jonka avulla voidaan ottaa

lisää lämpöä talteen, joka voidaan siirtää esimerkiksi käyttöveteen. (Energiatehokas ilmanvaihto 2021.)

Ilmanvaihdossa tulee myös ottaa huomioon laitteiston huollontarve. Ilmanvaihdon huoltoon kuuluu suodattimien vaihto, venttiilien ja lämmöntalteenottokennon puhdistus sekä ilmanvaihtokanavien kunnossapito. Likaantuneet suodattimet pienentävät tuloilmavirran määrää ja täten heikentävät ilmanvaihtoprosessia. Venttiilien puhdistukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota kosteissa tiloissa, joissa venttiilien ilmarakoihin voi helposti kertyä likaa. Lämmöntalteenottokennoa ei tarvitse useasti puhdistaa, kunhan suodattimien puhtaudesta pidetään huolta. Ilmanvaihtokanavia täytyy myös säännöllisesti tarkkailla kosteusvaurioiden ehkäisyksi. (Energiatehokas ilmanvaihto n.d.)

7 Investointi

Lämpötilan hallintaa varten on tarkoituksena tehdä osittaiskiertokonseptiin investointisuunnitelma. Veden lämmittämistä varten järjestelmään on mietitty lämmönsiirtimen sekä lämpöpumpun hankintaa. Lämmönsiirtimen avulla tarkoituksena on passiivinen lämmöntalteenotto poistovedestä ja puuttuva lisälämpö tuotetaan lämpöpumpulla. Opinnäytetyössä investointien hankinta jää vain pohdittavaksi ja tässä osiossa selitetään lämmönsiirtimen ja -pumpun teknologian perusidea.

7.1 Lämmönsiirrin

Lämmönsiirrin on energiatekninen komponentti, jonka avulla lämmitysenergiaa voidaan siirtää eri lämpötiloissa olevien nesteiden tai kaasujen välillä. Lämmönsiirtymistä voi tapahtua johtumalla, säteilyllä tai konvektion avulla. Johtumisessa lämpö pyrkii aina siirtymään lämpimästä kylmään, tasoittaen lämpötilat. Säteilyssä lämmitys johtuu lämpösäteilyn tuottamasta energiasta. Konvektiossa lämmön siirtyminen tapahtuu lämmössä johtuvien virtausten myötä, eli lämmin, harva aine nousee ylöspäin ja kylmä ja tiheämpi aine valuu alaspäin. Tehokkain tapa lämmönsiirrolle on johtuminen. Lämmönsiirrintä voidaan hyödyntää passiivisessa lämmöntalteenotossa.

Yleisimpiä lämmönsiirrintyyppisiä ovat levylämmönvaihtimet, lämpöputket, lämpöpatterit, rekuperattorit, kaavintalämmönvaihtimet ja höyryvoimalaitoslämmönsiirtimet esimerkiksi lauhduttimet.

Yleisimmät lämmönvaihdintyypit nesteille ovat levy-, putki- ja kaavintalämmönsiirtimet. Lämmönsiirintyypeistä parhaiten toimeksiantajan järjestelmään sopisi levylämmönvaihdin tai putkilämmönsiirtimet eli lämpöputket. Levylämmönvaihdin on hyvin yleinen tapa lämmönsiirrolle. Rakenteeltaan levylämmönvaihtimet muodostuvat useasta levystä, joiden sopivan asettelun ja muotoilun ansiosta niiden väliin muodostuu virtauskanavia. Kylmä- ja kuumapuolen nesteet virtaavat vastakkaisiin suuntiin ja niitä erottaa yleensä hyvin ohut seinämä, jonka lävitse lämpö pystyy siirtymään. Levylämmönsiirtimet ovat kompakteja, niissä on hyvät hyötysuhteet sekä voimakkaat leikkausjännitykset estävät lika-kerrosten muodostumisen. Levylämmönsiirtimen ahtaat kanavat voivat kuitenkin johtaa tukkeutumiseen, jos vedessä on liian suuria partikkeleja. (Energiatehokas lämmönsiirto, n.d.)

Putkilämmönsiirtimet koostuvat sylinterin muotoisesta vaipasta ja sen sisällä olevista putkista. Kaikkessa yksinkertaisuudessaan putket kuljettavat nestettä putken sisääntulosta ulostuloon, kun taas vaippa ohjaa erillistä nestettä putkien yli, jolloin lämpö pystyy siirtymään aineesta toiseen. (Cavallo n.d.) Putkilämmönsiirtimet ovat yleisiä prosessiteollisuudessa niiden kustannustehokkuuden, yksinkertaisuuden sekä vankkuuden takia (Putkilämmönvaihtimet ja -siirtimet, n.d.).

7.2 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu on laite, jolla voidaan siirtää kylmäaineen avulla lämpöä maaperästä, ulkoilmasta tai vedestä huonetiloihin, käyttöveteen tai lämmitysverkostoon. Perusidealtaan eri lämpöpumpputyypit ovat samat, mutta eroavat toisistaan sen osalta, mitä väliainetta niissä käytetään, mihin tuotettu lämpö ohjataan ja mistä lämpö kerätään. Lämpöpumppu voi toimia myös viilentämisessä, jos sen kierrot vaihtavat suuntaa.

Lämpöpumpun kompressori paineistaa kylmäaineen lämpimän puolen lämmönvaihtimeen eli lauhduttimeen, joka sijaitsee prosessin lämpimällä puolella. Paineen noustessa kylmäaine lauhtuu nestemäiseksi ja luovuttaa energiaa, jota voidaan käyttää lämmityksessä hyödyksi. Paineen noustessa nousee myös kylmäaineen kiehumispiste. Lauhduttimesta kylmäaine virtaa paisuntaventtiilin läpi, jonka tarkoituksena on rajoittaa nesteen virtausta kylmän puolen lämmönvaihtimeen eli höyrytimeen. Paisuntaventtiilin ansiosta höyrytimeessä on pienempi paine kuin lauhduttimessa, jolloin kylmäaineen

kiehumispiste laskee ja aine höyrystyy. Höyrystyessään kylmäaine taas sitoo itseensä lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää taas lauhduttimessa. (Mistä lämpöpumpun lämpö tulee, n.d.)

Lämpöpumpputyypit ovat maalämpö-, ilmalämpö-, poistoilmalämpö- ja ilma-vesilämpöpumppu. Kotitalouksissa lämmityksessä käytetään usein maalämpöpumppuja, jotka ottavat lämpöä talteen maan pinnasta, kallioista tai vesistöistä. Maalämpöpumppujen avulla voidaan lämmittää huonetilat ja käyttövesi. Lämpöä voidaan ottaa talteen myös suoraan ilmasta ilmalämpöpumpun avulla. Kovilla pakka- silla pumpun antoteho on heikko ja sulatusajat ovat tiheät, joten se tarvitsee rinnalleen toisen lämmityskeinon. Ilmalämpöpumpun avulla voidaan lämmittää huonetiloja, käyttövettä tai lämpö voidaan myös siirtää lämmitysverkostoon. Poistoilmalämpöpumpun avulla taas voidaan ottaa lämmitysener- giaa talteen poistoilman ilmanvaihtoputkiston kautta. Tarpeen mukaan talteenotettu lämpö siirretään tuloilmaan, lämpimään käyttöveteen tai vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Poistoilmalämpö- pumppu vaatii toimiakseen ilmavaihdon kannalta tuloilma- ja poistoilmakanavan. Poistoilmalämpö- pumppujen avulla voidaan mallista riippuen myös viilentää sisäilmaa. Ilma-vesilämpöpumppu hyödyn- tää lämmitysenergiaa ulkoilmasta ja siirtää sen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Ilma-vesiläm- pöpumppu toimii ratkaisuna esimerkiksi silloin, kun ei voida rakentaa maalämpöpumpun vaatimaa vakaaputkistoa tai lämpökaivoa. (Lämpöpumpputeknologiat n.d.)

Lämpöpumpuille tärkein vaatimus lämmityskäytössä on se, että laite tuottaa enemmän lämpöener- giaa kilowatteina kuin mitä sen kompressori kuluttaa sähköä kilowatteina. Kannattavuus voidaan sel- vittää lämpökertoimen, eli COP-arvon avulla. Tällä tarkoitetaan siirretyn lämpömäärän suhdetta teh- tyyn työhön. Esimerkiksi kun kompressori käyttää 2 kWh sähköä ja lämpöpumppu tuottaa 6 kWh läm- pöä, saadaan COP-arvoksi 3.

8 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda laskentamalli, jonka avulla voidaan selvittää veden lämpötilan hallinnan energiakustannukset eri vesimäärillä. Veden lämmityksen vaatiman energiamäärän selvitys on yksinkertainen laskutoimitus, joten laskentamallin laajuus tulee suuresti riippumaan hukkaläm-

mön, lämmön talteenoton ja laitteiston tuomista laskuista. Laskentamallin tarkoituksena ei ollut yhden tietyn lukuarvon selvittäminen, vaan itse laskentamallin luonti, jossa voidaan muuttaa lähtöarvoja halutulla tavalla. Opinnäytetyön lopputuloksena toimeksiantajalle saatiin tuotettua haluttuja kriteerejä vastaava laskentamalli. Työn rajauksen myötä oli tarkoituksena keskittyä lähinnä vain veden lämpötilan hallintaan, mutta lopputuloksena saatiin myös ilmanvaihdon energiakustannusten laskuri. Toimeksiantajalle tehtiin laskentamalli, jonka avulla rakennusten ilmanvaihdon energiantarpeita selvitetään. Ilmanvaihto jäi opinnäytetyössä kuitenkin vain kehittämiseksi. Tämän laskurin avulla voidaan kuitenkin kehittää prosessin energiatehokkuutta eteenpäin.

Oli tärkeää analysoida laskentamallin pätevyyttä ja luotettavuutta. Laskut ja kaavat oli sinänsä helppo todeta oikeiksi, sillä ne olivat tavallisia energialaskuja. Analysoinnin vaikeus tuli siinä, että olivatko käytetyt kaavat ja niiden sovellukset juuri oikeat toimeksiantajan prosessille. Veden lämpötilan hallinnassa veden lämmitykseen kuluvan energian laskeminen itsessään oli yksinkertainen laskutoimitus. Hankaluutta toi lisälämmön tuottajien selvittäminen ja niiden tuottaman lämmön oikeaoppinen käyttö laskennassa. Helppointa oli kun laskentamalliin vain sisällytettiin kaikki tekijät, joiden oletetaan tuottavan lämpöä veteen ja jos kyseinen tekijä ei tuota lämpöä laskettavassa kohteessa, se vain voidaan laittaa nolaksi laskentamallissa. Ilmanvaihdon energiantarpeen selvittäminen oli pääosin olemassa olevien kaavojen systemaattista noudattamista. Huomioitavana tekijänä oli suuri ilman kosteus kalantilviljelylaitoksessa sekä kalojen tuottama suuri määrä hiilidioksidia. Toimeksiantajan tarkkojen vaatimusten avulla laskentamallista voitiin tehdä tarkka ja toimiva.

Opinnäytetyön saatujen tulosten arviointi oli hieman erikoista. Tuloksena ei saatu mitään tiettyä lukuarvoa, vaan laskentamalli, joten tulosten arvioinnissa ei voitu kuin arvioida laskentamallin pätevyyttä. Opinnäytetyön tuloksena ei myöskään saatu yhtä tiettyä investointikohdetta, vaan yleisesti vain tiedettiin, että tarkoituksena on hankkia lämpöpumppu sekä lämmönsiirrin. Työn pääaiheena oli kuitenkin laskentamallin luominen ja kaikki muut kohdat jäivät vain mietinnän varaan. Laskentamallin avulla voidaan myös miettiä tulevaisuudessa tehtäviä investointeja. Opinnäytetyön tutkimuskysymyksissä haluttiin tietää lämpötilan hallinnan mahdollisuudet ja kustannukset osittaiskiertokonseptissa sekä haluttiin tietää miten se parantaisi järjestelmää. Mahdollisuudet ja kustannukset tulevat hyvin

laskentamallin kanssa selville. Opinnäytetyössä olisi kuitenkin voinut enemmän miettiä miten lämpötilan hallinta tulisi parantamaan järjestelmää energiatekniikan näkökulmasta. Perusidea tuli kuitenkin selville.

Haasteina opinnäytetyössä oli teoriaosuudessa usein esiintyvät kalanviljelyn biologinen ja kemiallinen puoli sekä yleinen aiheen rajaus. Kalanviljely aiheena on laaja, joten aihetta täytyi rajata runsaasti. Teoriaosiosta tuli loppujen lopuksi melko laaja, mutta itse koin laajuuden hyväksi, sillä kalanviljely oli aikaisemmin minulle tuntematon aihe. Mahdollisesti kiertovesikasvatuksen teoriaosuutta olisi voitu lyhentää. Myös osittaiskiertokonseptin yleinen tuntemattomuus myös tarkoitti jossain määrin sitä, että tietoa ei ollut asiasta paljon saatavilla varsinkaan Suomeksi. Kuitenkin selkeän aineiston sekä toimeksiantajan avulla kalanviljelyn teoriapuoli selkeytyi. Laskennassa haasteena oli henkilökohtainen osittaiskiertojärjestelmän tuntemattomuus sekä vähäinen lähtöarvojen määrä. Laskentamallin tekeminen oli kuitenkin vain energialaskujen tekemistä, joten laskentamalli saatiin tuotettua ilman suuria ongelmia.

Kalanviljely on kasvava toimiala, jonka avulla voidaan helpottaa kasvavan väestön ruuantarvetta. Suomessa kalanviljelyn avulla voidaan kotimaistaa ruuantuotanto ja täten pienentää riippuvuutta ulkomaalaisesta tuotannosta. Kasvamisen myötä kalanviljely myös kehittyy koko ajan eteenpäin. Kehitymisestä on esimerkkinä Luonnonvarakeskuksen osittaiskiertokonsepti, jonka avulla pyritään viljelemään kalaa yksinkertaisemman laitteiston avulla, kuten esimerkiksi kiertovesikasvatuksessa. Opinnäytetyössä pääsin tutustumaan täysin uuteen ja teknisesti monimutkaiseen alaan. Kalanviljely on kiinnostava niin teoreettisesti kuin myös teknisesti, sekä kalanviljelyllä on paljon suurempi vaikutus maailman ruokamarkkinoihin kuin alun perin luulin. Tekniikaltaan osa kasvatustavoista on hyvin monimutkaisia ja niiden toiminnan opettelu vei aikaa.

Lähteet

Bebak-Williams, J., Davidson, J., Summerfelt, T., Tsukoda, S. & Waldrop, T. 2004. A partial-reuse system for coldwater aquaculture. Aquacultural engineering.

Better temperature control in fish farms. 2011. Tutkimus. European comission.

Boyd, C. 2018. Water temperature in aquaculture. Nettisivu. Global seafood alliance. Viitattu 5.4.2022. <https://www.globalseafood.org/advocate/water-temperature-in-aquaculture/>

Bregnballe, J. A Guide to Recirculation Aquaculture, 2015. FAO.

Cai, J. Zhou, X, Yan, X, Lucente, D & Lagana, C. 2017. Top 10 species groups in global aquaculture. FAO

Cavallo, C. n.d. All about shell and tube heat exchangers. Nettisivu. Thomas. Viitattu 03.05.2022. <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/shell-and-tube-heat-exchangers/>

Creaser, D., Gillette, K., Summerfelt, S. & Vinci, D. 2004. Design of partial warer reuse systems at White River NFH for the production of Atlantic salmon smolt for restoration stocking. Aquacultural engineering.

Energiatehokas ilmanvaihto. 2021. Nettisivu. Omakiinteistö. Viitattu 01.05.2022. <https://www.omakiinteisto.com/energiatehokas-ilmanvaihto/>

Energiatehokas ilmanvaihto. n.d. Opas. Motiva.

Energiatehokas lämmönsiirto. n.d. Opas. Motiva.

Eskelinen, U. Vielma, J. Kankainen, M & Setälä, J. 2014. Suomen vesiviljelyn ympäristösäätely ja sen kehittämistarpeet. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.

Espinal, C & Matulic, D. 2019. Recirculating aquaculture technologies. Kokoelma. COST. SpringerOpen.

Forsman, A. N.d. Kalan kiertovesikasvatus. Pedanet

Opinnäytetyön raportointi. n.d. Ohje. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Gearheart, M., Gillette, K., Sharrer, M., Summerfelt, S. & Vinci, B. 2009. Evaluation of partial water re-use systems used for Atlantic salmon smolt production at the White River National Fish Hatchery. Aquacultural engineering.

Goddek, S. Joyce, A. Kotzen, B. Burnell, G. 2019. Aquaponics Food Production Systems. Cost. SpringerOpen.

Guide to Recirculation Aquaculture: Chapter 2. n.d. Nettisivu. Eurofish magazine. Viitattu 05.03.2022. <https://www.eurofishmagazine.com/sections/aquaculture/item/274-guide-to-recirculation-aquaculture-chapter-2-continued-2>

MacLeod, M. Hasan, M. Robb & D. Mamum-Ur-Rashid, M. 2017. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. Artikkel. Scientific Reports. Naturesearch.

Mistä lämpöpumpun lämpö tulee. n.d. Nettisivu. Energytech. Viitattu 02.05.2022. <https://www.energytech.fi/mista-lampopumpun-lampo-tulee>

Jäteveden lämmöntalteenotto, n.d. Nettisivu. FINES. Viitattu 01.05.2022 <https://finess.fi/jarjestelmat/jateveden-lammontalteenotto/>

Kalankasvatuksen ympäristösuojeluohje. 2020. Kokoelma. Ympäristöministeriön julkaisuja 2020:22. Ympäristöministeriö.

Kalanviljely. n.d. Nettisivu. Suomen kalastajaliitto ry. Viitattu 04.03.2022. <https://www.kalankasvatus.fi/kalanviljely/>

Kalan kiertovesikasvatus. 2020. nettisivu. Luonnonvarakeskus. Viitattu 01.02.2022. <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/kalat-ja-kalatalous/kalanviljely/kalan-kiertovesikasvatus/>

Kiuru, T. 2022. Osittaiskiertokonseptin toiminta. Suullinen lähde.

Kiertovesiviljelyn perusteet. nd. Nettisivu. Pedanet. Viitattu 03.05.2022. <https://peda.net/hankkeet/vesiviljely/koulutus/kp/kalan-kasvattaminen/johdanto>

Latokartano, M. 2018. Kiertovesikasvatus läpimurron kynnyksellä. Artikkel. Luonnonvarakeskus. viitattu 01.02.2022. <https://www.luke.fi/mt-kiertovesikasvatus-lapimurron-kynnyksella/>

Luken organisaatio. n.d, a. nettisivu. Luonnonvarakeskus. viitattu 31.01.2022. <https://www.luke.fi/luke/organisaatio/>

Lämpöpumpputeknologiat. n.d. Nettisivu. Motiva. Viitattu 02.05.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat

Pitkämäki, A & Raivio, T. 2021. Missä jäteveden lämpö kannattaa ottaa talteen?. Gaia. Blogi.

Putkilämmönvaihtimet ja -siirtimet. n.d. Nettisivu. Vahasilta. Viitattu 03.04.2022. <https://vahasilta.fi/putkilammonvaihtimet/>

Raceways. 2019. Nettisivu. Freshwater-Aquaculture. Viitattu 01.05.2022. <https://freshwater-aquaculture.extension.org/raceways/>

Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta. 2012. Ohje. Ympäristöministeriö

Recirculating Aquaculture Systems. 2020. Kokoelma. EUMOFA.

Rumpu- ja kiekkosuodattimet. n.d. Nettisivu. Filterit. Viitattu 02.03.2022. <https://filterit.fi/c/tuoteryhmat/suodatus/rumpu-ja-kiekkosuodattimet>

Sharpe, S. 2022. Basic types of aquarium filtration systems. Nettisivu. The spruce pets. Viitattu 14.2.2022. <https://www.thesprucepets.com/before-you-buy-an-aquarium-filter-1378506>

Summerfelt, S & Sharrer, M. 2004. Design implication of carbon dioxide production within biofilters contained in recirculating salmonid culture systems. Science direct.

Summerfelt, S. Davidson, J. Waldrop, T. Tsukuda, S & Bebak-Williams. 2004. A partial-reuse system for coldwater aquaculture. Tutkimus. Aquacultural engineering.

Suomen kalastajaliitto ry. 2022. Nettisivu. Kalanviljely elinkeinona. viitattu 01.02.2022. <https://www.kalankasvatus.fi/kalanviljely/kalanviljely-elinkeinona/>

The state of world fisheries and aquaculture. 2020. Kokoelma. FOA.

Towers, L. 2013. An overview of heating and cooling process water in land-based aquaculture. Nettisivu. The fish site. Viitattu 05.05.2022. <https://thefishsite.com/articles/an-overview-of-heating-and-cooling-process-water-in-landbased-aquaculture>

Turcious, A & Papenbrock, J. 2014. Sustainable treatment of aquaculture effluents. Kokoelma. Sustainability of wastewater treatment processes and management.

Vesiviljely 2020. Nettisivu. Luonnonvarakeskus. Viitattu 05.02.2022. https://stat.luke.fi/vesiviljely-2020_fi

Liitteet

Salassa pidettävät liitteet poistettu tästä versiosta.