



Mikrolevien käyttö teollisuuden hiilidi- oksidipäästöjen hallinnassa

Alexi Pylkäs

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2021

Teollisuusteknologia

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Pyлкäs Aleksi

Mikrolevien käyttö teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hallinnassa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2021, 61 sivua.

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

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Ilmaston lämpeneminen on uhka, johon ihmiskunnan on tulevaisuudessa varauduttava. Kasvihuonekaasupäästöjen ilmastoa lämmittävästä vaikutuksesta ei voida kiistellä ja suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä syntyy energian- ja sähköntuotannosta, sekä tuottavasta teollisuudesta. Kasvihuonekaasupäästöistä hiilidioksidin osuus on lähes 65 %:a. Työssä tutkittiin Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamaan Bioinnovaatioiden edistäminen (BIND) hankkeessa suoritetun ABF-projektin laitosprototyypin testaustuloksia. ABF, eli Algae BioFilter-projektissa rakennettiin teollisuuslaitosten hiilidioksidipäästöjen sitomiseen suunniteltu pienoiskoon ABF-mikroleväreaktori, jossa käytettiin *Nannochloropsis Oculata* mikrolevälajiketta hiilidioksidin sitomiseen savukaasuista. Tavoitteena oli tulosten analyysissä todentaa prototyypin teho sitoa hiilidioksidia laitoksen savukaasuista biomassaan, prototyypin skaalautuvuutta teollisuusmittakaavaan ja potentiaalisten tulevaisuuden reaktorien taloudellista kannattavuutta hiilidioksidiverotuksen ja tuotettavien hyödykkeiden osalta. Tutkimus oli triangulaation menetelmillä toteutettu case-tutkimus. Tietoperusta rakennettiin aiheeseen liittyvistä verkkolähteistä, kirjallisuudesta ja tilastoista ympäri maailmaa.

Tuloksina ABF-mikroleväreaktorin tehoksi saatiin ilman skaalausmenetelmiä 1,94 g CO₂/ h. ABF-reaktorin sisältämän mikrolevämediumin määrä jäi tavoiteltua pienemmäksi, joten tulosten tarkasteluun mikrolevän määrää skaalattiin suuremmaksi. Skaalausmenetelmän avulla voitiin reaktorin kokoa kasvattaa tavoitteelliseen mikrolevämäärään ja skaalauksen avulla polttoprosessista sidottiin 1,9 %:a tuotetusta hiilidioksidista. Skaalaamalla reaktorin kokoa suuremmaksi, voitiin tarkastella myös suurten teollisuuden tuotantolaitosten hiilidioksidipäästöjen sitomismahdollisuuksia.

ABF-reaktorin teho ei riittänyt skaalauksessa suurten teollisuuslaitosten kokonaishiilidioksidipäästöjen sitomiseen, eikä sen käyttö olisi kannattavaa pelkästään hiilidioksidiverotuksen kustannuksella. Hiilidioksidin sitomisella olisi kustannusnäkökulmasta enemmänkin eettinen merkitys hiilidioksidin tuottajille. Pienemässä päästömittakaavassa voitaisiin ABF-reaktorilla saada hyviä tuloksia hiilidioksidin sitomisesta ja kasvattaa suuria määriä biomassaa vuosittain. Biomassan hyödyntämisestä koostuisi myös reaktorin käytön taloudellinen kannattavuus. Tulevaisuuden tutkimuskohteiksi ehdotettiin tarkastelua tuotantolaitosten ja reaktorien välisistä synteeseistä ja paikallisten toimijoiden kyvystä käyttää mikroleväbiomassaa omissa tuotteissaan, kuten polttoaine-, elintarvike- ja lääketeollisuudessa.

Avainsanat (asiasanat)

Mikrolevät, hiilidioksidi, bioreaktorit, päästöjenhallinta, ilmastonmuutokset

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Pyлкäs Aleksi

Microalgae use in controlling industrial carbon dioxide emissions

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2021, 61 pages.

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

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Global warming is an upcoming threat to humanity in the near future. The undisputable effect of greenhouse gasses on global warming cannot be argued and the mainly source of these gases are energy production and other industrial processes. Greenhouse gasses consists of almost 65 % carbon dioxide (CO₂). Research contained analysis of microalgae reactor prototype testing results made in ABF-project. ABF, or Algae Biofilter project was a part of larger BIND-project that was funded by European Regional Development Fund. The goal in the project was to build a prototype which could absorb carbon dioxide emissions into microalgae biomass via photosynthesis straight from the CO₂ emitting plant. *Nannochloropsis Oculata* was the microalgae utilised for the photosynthetic process. The research objective was to analyse the prototypes efficiency to absorb CO₂ emissions, scalability up to the industrial scale and the economical standpoints referring to carbon taxes and end product worth. Research was a case-study with methods of triangulation.

As a result the efficiency of the ABF-reactor without scaling methods for absorbing flue gas CO₂ emissions was 1,94 g CO₂/ h. The used amount of microalgae media in the reactor was smaller than anticipated. For this reason, the final result was achieved by using scaling methods. The final result for the absorption of CO₂ with scaling methods was 1,9 % of the all CO₂ produced into the process. By scaling up the prototype, there was also a possibility to refer its functionality and use for bigger, industrial scale host plants.

ABF-reactor's CO₂ absorption efficiency was not good enough to cover larger industrial scale emitters and the use of this reactor would not be financially profitable by decreasing carbon tax-based emissions alone. CO₂ absorption would have a more ethical meaning for the carbon dioxide emitters than financial. There is a better potential in smaller industrial scale to have good CO₂ absorption rates and grow large amounts of algae biomass annually. The profitable side of using the ABF-reactor would come from the refining of algae biomass to more high value end products. For the future research, the synthesis between ABF-reactors and the hosting plants should be studied further and the possibilities of microalgae biomass use with local companies, such as petrochemical industry, pharmaceutical companies, and food supplement industries.

Keywords/tags (subjects)

Microalgae, carbon dioxide, bioreactors, emission control, climate changes

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Mikrolevistä apua ilmaston lämpenemiseen	4
1.2	Projektitoiminta tutkimuksen taustalla	5
2	Tutkimusasetelma	7
2.1	Tutkimuksen rajaus ja tavoitteet	7
2.2	Tutkimusmenetelmät	9
2.2.1	Tapaustutkimus.....	9
2.2.2	Triangulaatio	10
2.2.3	Tutkimusmenetelmien soveltaminen.....	11
3	Mikrolevät	11
3.1	Yleistä	11
3.2	Mikrolevien käytön merkitys.....	12
3.3	Mikrolevien viljely	14
3.4	Mikroleväreaktorit	15
3.5	Mikrolevien taloudellinen merkitys	18
4	Hiilidioksidipäästöt	20
4.1	Hiilidioksidi osana kasvihuonekaasupäästöjä	20
4.2	Esimerkkejä hiilidioksidipäästöjen lähteistä	21
4.2.1	Energiantuotanto.....	21
4.2.2	Teräs- ja sementtiteollisuus.....	23
5	Tutkimuksen aineistonkeruu ja vaiheet	24
5.1	Hypoteesi.....	26
5.1.1	Mikrolevälajin valinta.....	27
5.1.2	Hiilidioksidin liuotus reaktoriin	29
5.2	Toteutunut testausasetelma	30
6	Tulokset	32
6.1	Tutkimusaineiston analyysi	32
6.1.1	Käyttöaika ja polttoaine.....	33
6.1.2	Savukaasujen hiilidioksidi	34
6.1.3	ABF-reaktorin data.....	36
6.2	Testaustulokset	38

	2
6.3 Tulosten luotettavuus	40
6.4 Eettisyys.....	42
7 Soveltaminen	43
7.1 Skaalaus.....	43
7.2 Tuotantolaitoskohtaiset yksiköt.....	45
8 Pohdinta	47
8.1 Skaalautuvuus ja monipuolisuus	48
8.2 Taloudellinen näkökulma	50
Lähteet.....	52
Liitteet.....	56
Liite 1. Hiilidioksidin osuus savukaasuista.....	56
Liite 2. Näytteiden hehkutuskokeen tulokset	57
Liite 3. Savukaasujen hiilidioksidigraafi 23.10.2020.....	58

Kuviot

Kuvio 1. Pystyputkireaktoritestaus Jyväskylän ammattikorkeakoululla 12.2018, Spirulina A. plantesis	6
Kuvio 2. Mikroleväbiomassa on monipuolinen biopolttoaineiden ja muiden biotuotteiden raaka-aine	13
Kuvio 3. Mikroleväbiomassan kasvu ajan funktiona.....	15
Kuvio 4. Pystyputkireaktoreja laboratorio-olosuhteissa.....	16
Kuvio 5. Nousevan vaakaputkireaktorin havainnekuva.....	17
Kuvio 6. FCC AQualian ALLGAS projektissa käyttämä Raceway reaktori vasemmalla ja oikealla uudempi LEAR-järjestelmä	18
Kuvio 7. Kalsiumkarbonaatin kalsinointi reaktioyhtälö	24
Kuvio 8. Tiedonkeruuprosessin vaiheet	26
Kuvio 9. Voimakkaan sekoittamisen vaikutus, Spirulina vas. ja Nannochloropsis	28
Kuvio 10. Alkukasvatusmediumit, Nannochloropsis Oculata oik. ja Chlorella Vulgaris..	29
Kuvio 11. Reaktorin koekäyttö ilmalla ennen järjestelmään liittämistä.....	32
Kuvio 12. ABF-reaktorin mediumin lämpötilat	37
Kuvio 13. Reaktorin mikrolevänäytteet ennen testausta vas. ja testauksen jälkeen.	38

Taulukot

Taulukko 1. Polttoaineen päiväkohtainen ja kokonaiskulutus	34
Taulukko 2. Hiilidioksidin osuuden keskiarvo savukaasupäästöistä ennen reaktoria	35
Taulukko 3. Hiilidioksidin osuuden keskiarvo savukaasupäästöistä reaktorin jälkeen ..	35

1 Johdanto

1.1 Mikroleivistä apua ilmaston lämpenemiseen

Ilmaston lämpeneminen on yksi ajankohtaisista ongelmista, jonka ihmiskunta kohtaa mutta johon se voi osaltaan aktiivisella toiminnallaan vaikuttaa. Ihmisen vaikutuksesta ilmastonmuutokseen kiistellään, mutta osan toiminnastamme tiedetään vaikuttavan negatiivisesti ilmaston lämpenemiseen. Yhtenä suurimmista vaikuttavista tekijöistä ovat kasvihuonekaasupäästöt, jotka syntyvät erityisesti energian- ja sähköntuotannosta, muusta tuotantoteollisuudesta sekä maataloudesta. Kasvihuonekaasupäästöjen määrää mitataan hiilidioksidiekvivalenteina (CO₂-ekv.). (Hillintä: Maailman kasvihuonepäästöt kasvavat yhä 2020.)

Hiilidioksidiekvivalentti perustuu kasvihuonekaasujen lämmityspotentiaaliin (GWP), jolla ilmoitetaan eri kasvihuonekaasujen kumulatiivinen voimakkuus suhteutettuna hiilidioksidiin massayksikköä kohti tietyn ajan kuluessa. Esimerkiksi yksi tonni metaanikaasupäästöjä (CH₄) vastaa 21:tä tonnia hiilidioksidipäästöjä (CO₂) ilmakehässä sadan vuoden aikana (GWP₁₀₀). (Glossary: Carbon dioxide equivalent 2017; Lämmityspotentiaali 2014.) Maailmanlaajuisesti kasvihuonekaasupäästöjen määrä on noussut 2010-luvulta tasaisesti noin 1,5 % vuodessa. Suurimmat päästöjen tuottajat maailmassa ovat Kiina, Yhdysvallat, EU-alueet ja Iso-Britannia sekä Intia. Vuonna 2019 saavutettiin uusi ennätys kasvihuonekaasupäästöjen tuotannossa, joka oli 59,1 Gt CO₂-ekv. Maailmanmittakaavaan suhteutettuna Suomen kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2019 noin 0,0528 Gt CO₂-ekv. (Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020.) Hiilidioksidipäästöjen ja muiden kasvihuonekaasujen aiheuttama maapallon ilmaston lämpötilan nousu pyrittiin vuoden 2015 Pariisin ilmastositomuksessa rajaamaan 2 °C: seen, tavoitteena kuitenkin

1,5 °C. Nykyisellä kehityksellä tämän tavoitteen saavuttamisen todennäköisyys on kuitenkin vain 5 %. (Liu & Raftery 2021, 1.)

Jotta ilmaston lämpenemistä voitaisiin hidastaa, täytyy ihmiskunnan keksiä lisää keinoja joko hiilidioksidipäästöjen ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen tai päästöjen käsittelyyn haitallisen ilmastokuorman pienentämiseksi. Suurin osa planeettamme hiilidioksidista on varastoituneena valtameriin. Valtameriin sitoutuneen hiilidioksidin määrä on 50-kertainen verrattuna ilmakehään varastoituneeseen hiilidioksidiin ja kattaa noin 90 % kaikesta maapallolle varastoituneesta hiilidioksidista. Maapallolla on useita erilaisia hiilinieluja, jotka yhteyttämällä sitovat ilmakehän hiilidioksidia ja tuottavat fotosynteesin sivutuotteena happea takaisin ilmakehään. Yhtenä suurena hiilinieluna toimivat vesistöissä kasvavat mikrolevät, jotka kattavat vain 1 %:n planeettamme yhteyttävästä biomassasta, mutta tuottavat melkein 50 % yhteyttämällä tuotetusta hapesta. (Arenas & Vaz-Pinto 2014, 178–182). Levälajeja on useita ja osaa lajeista kutsutaan yleisellä termillä mikrolevät niiden mikroskooppisesta koosta johtuen. Suurempia levälajeja kutsutaan makroleviksi. (Khan, Shin & Kim 2018.) Opinnäytetyössä tutkittiin yhden testaukseen valitun mikroskooppisen levälajin hyödyntämistä teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hallinnassa ABF-reaktoriteknologian avulla.

1.2 Projektitoiminta tutkimuksen taustalla

Tutkimuksen aineisto koostuu Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamassa Bioinnovaatioiden edistäminen (BIND)-hankkeessa vuosien 2019 ja 2020 aikana suoritettujen ABF-projektin laitosprototyypin testaustuloksista. ABF, eli Algae BioFilter-projekti käynnistettiin keväällä 2019 tutkimustoiminnan jatkumona innovaatiosta kehittää teollisuuden ja kuluttajien käyttöön soveltuvia mikroleväsuodattimia. Ensimmäiset projektin

käynnistämiseen vaikuttaneet tutkimukset ja kokeet mikrolevien käyttömahdollisuuksista ja niiden kasvattamisesta oli aloitettu pienemmillä reaktoreilla jo vuoden 2018 toukokuussa (ks. kuvio 1). Nämä tutkimukset olivat aiheeseen liittyvää perustutkimusta, mutta eivät tässä opinnäytetyössä hyödynnettyä BIND-hanketta.



Kuvio 1. Pystyputkireaktoritestausta Jyväskylän ammattikorkeakoululla 12.2018, *Spirulina A. plantesis*

ABF-projektin prototyypireaktorilaitos rakennettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun Tarvaalan Biotalousinstituutin tiloihin Saarijärvelle. Prototyypilaitoksen haluttiin sitovan biomassaansa hiilidioksidia teholtaan 40 kW puupellettiä polttavan lämmityskattilan savukaasuista niin paljon kuin laskennallisesti olisi mahdollista. Reaktorin testaus alkoi 20.10.2020 ja päättyi 26.10.2020. Tavoitteena oli ajaa ABF-reaktoriprosessia neljän päivän ajan noin 8 tuntia päivässä. Opinnäytetyön tehtävänä oli vuosien 2019 ja 2020 aikana tehdyn BIND-hankkeen ABF-projektin mikroleväreaktorin teollisuussovelluksen testaustulosten analysointi. Näiden tulosten pohjalta arvioitiin ABF-reaktoriteknologian todellisia käyttömahdollisuuksia teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hallinnassa.

Energia- ja ympäristötekniikan opinnot antavat hyvää alustavaa tietoperustaa yhteyttämisen kemiaan ja hiilidioksidipäästöihin liittyviin ilmiöihin. Aiheeseen liittyvät aikaisemmat tutkimuksen saivat alkunsa korkeakouluopintojen alkuvaiheeseen kannustuksesta tehdä kehittämistyötä tutkinto-ohjelman aiheisiin liittyen. Energia- ja ympäristötekniikan opinnot antavat myös ymmärrystä teollisuuden päästöjen hallinnasta ja palamisreaktiosta, sekä prosessien suunnittelusta. Laitossuunnitteluun liittyvää työkokemusta oli opinnäytetyön tekijällä noin kaksi vuotta. Kiinnostus aiheesta kohtaan syntyi korkeakouluopintojen aikana. Hiilidioksidin määrän lisääntyminen ilmakehässä on ongelma ja mikrolevien kyky sitoa hiilidioksidia herättivät kiinnostuksen niiden potentiaalista tämän ongelman ratkaisuun. Mikrolevätutkimusta on tehty maailmalla erityisesti lämpimillä ilmastoalueilla, mutta kylmemmissä ilmastoissa mikrolevien ympärivuotisen kasvun saavuttamisen haasteet korostuvat. Toisaalta erityisesti lämpöenergian tuotanto kylmemmissä ilmastoissa on tärkeämpää, kuin lämpimillä alueilla, mikä johtaa mikroleväteknologian laajentamisen tarpeeseen myös kylmille ilmasto-alueille. ABF-reaktorin suunnittelussa otettiin huomioon tarve käyttää reaktoria kaikkialla maailmassa.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimuksen rajaus ja tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli BIND-hankkeen ABF-projektin mikroleväreaktorin tutkimustulosten analysoinnin avulla osoittaa prototyypin teho, eli kuinka tehokkaasti prototyyppi pystyi sitomaan savukaasujen hiilidioksidia mikrolevää hyödyntämällä. Työssä tutkittiin myös järjestelmän skaalautuvuutta ja tarkasteltiin laitoskohtaista

sovellettavuutta. Tavoitteena oli myös selvittää mikrolevien käytön taloudellinen kannattavuus teollisuusmittakaavan laitoksissa, sekä kehittää omaa osaamista tulevaisuudessa mahdollisesti hyvin merkittävän ja laaja-alaisen teknologian kehittämisessä. Kyseessä oli case-tutkimus, johon käytettiin myös triangulaation menetelmiä luotettavuuden parantamiseksi. Projektia edeltäneestä tutkimusaineistosta hyödynnettiin tehty hypoteesi, eli oletus prototyyppitestauksen lopputuloksesta. Hypoteesia varten kerätty aineisto toimi referenssimateriaalina tulosten analysoinnille. Analysoitava tutkimusaineisto koostui projektin aikana hankitusta laboratorio- ja prototyyppitutkimustuloksista, joita verrattiin aikaisempaan hypoteesiin laitteiston tehon todentamiseksi.

Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset luotiin vastaamaan tutkimuksen tavoitteita ja selkeyttämään tutkimuksen haasteellista rajaamista seuraavasti:

- Miten tehokkaasti ABF-reaktori sitoo savukaasujen hiilidioksidipäästöjä suhteessa käyttöaikaan?
- Miten prototyyppi skaalautuu teoriassa, kun se kapasiteettia kasvatetaan ja missä skaalauksen vaiheessa sen koko muuttuu liian suureksi?
- Missä laitostyypeissä prototyyppiä voidaan hyödyntää?
- Onko prototyyppilaitoksen käyttö taloudellisesti kannattavaa pelkästään hiilidioksidiveron säästöjen kautta?
- Onko AFB-reaktorin käyttö taloudellisesti kannattavaa käytöstä syntyvien teollisuuden raaka-aineiden perusteella?

Opinnäytetyössä esitettiin myös mahdollisia mikrolevien loppukäyttökohteita, mutta vain sivuten, sillä aihe ei kuulu varsinaiseen rajaukseen. Mikrolevämassan jatkokäyttöön jalostamiseen tarvittavien lisäprosessien määrittäminen laitoskohtaiseen symbioosiin on tulevaisuudessa iso osa taloudellisen kannattavuuden

arviointia, mutta näiden prosessien yksityiskohdat jätettiin rajauksen ulkopuolelle. Taloudellisen kannattavuuden arviointi rajattiin kattamaan hiilidioksidipäästöistä säästettävän päästöverotuksen määrä, sekä esittely nykyisten mikrolevien lopputuotteiden arvoon perustuvasta tarkastelusta. Opinnäytetyössä ei otettu kantaa onko mikrolevillä mahdollista suodattaa myös muita kaasuja, tai hiukkasia joita savukaasut sisälsivät, eikä laitoskohtaisten polttoaineiden suodatusprosessiin tarvittavia erityispiirteitä. Työssä ei otettu tarkasti kantaa myöskään prototyypin tekniseen toteutukseen, kuin suunnitteluvirheiden osalta, eikä prototyypin rakennuskustannuksiin.

2.2 Tutkimusmenetelmät

2.2.1 Tapaustutkimus

Case- eli tapaustutkimus on määritelty tutkimusmenetelmäksi, jonka tunnusmerkkejä ovat tutkimusongelman moniulotteisuus, sekä tutkimuksen monimenetelmäisyys. Tapaustutkimus pitää sisällään kvalitatiivisen, eli laatuun perustuvan tutkimuksen piirteitä ja siinä voi esiintyä myös joitain kvantitatiivisen, eli määrällisen tutkimuksen piirteitä. Tapaustutkimus tarjoaa holistisen, eli kokonaisvaltaisen kuvan tutkittavasta ilmiöstä, eikä tutkimuksen tuloksia voida yleistää, sillä ne käsittelevät vain kyseistä tapausta. Laadullisen tutkimuksen osalta ei tapaustutkimuksessa voida noudattaa laadullisen tutkimuksen analyysimenetelmiä, koska analyysille ei ole sääntöjä. (Kananen 2013, 36–58.)

Tapaustutkimus on tutkimustyylinä haasteellinen, sillä aineiston moniulotteinen käsittely tekee aiheen rajauksesta haastavaa. Aiheen rajausta tulee toteuttaa tarkasti ja ai-

neiston analyysi on tärkeää, jotta kirjoitusprosessi pysyy kontekstissaan. Tapaustutkimus voi pitää sisällään yhden, tai useamman tapauksen. Tapaustutkimusta ei ajatella yhtenä tutkimuksena, vaan lähestymistapana. (Kananen 2013, 36–58.) Kun tutkimuksessa etsitään ja kartoitetaan jotain uutta, on kyseessä eksploratiivinen tutkimus, joka on yksi tutkimuskysymysten pohjalta luotu tapaustutkimuksen muoto. Tutkimuksessa on tavoitteena ymmärtää mistä tekijöistä tutkittava ilmiö koostuu. (Kananen 2013, 65.)

2.2.2 Triangulaatio

Kolmiomittauksena aikaisemmin tunnetun triangulaation avulla voidaan ratkaista monimutkaisia ongelmia, joita ei voida yksittäisillä tutkimusotteilla, tai yhdellä lähestymistavalla ratkaista. Triangulaatiota käyttämällä voidaan lisätä tutkimuksen luotettavuutta. Luotettavassa tutkimuksessa eri lähestymistavat antavat samanlaisia tuloksia. Triangulaation käytön haasteena on mahdollisuus hukkoa aineistotulvaan ja sortua metodiseen kikkailuun, joka johtaa tutkijaa ja lukijoita harhaan, sekä haittaa tutkimuksen luotettavuutta. Jos tutkimustulokset ovat ristiriidassa keskenään, joutuu tutkija päättämään mitä tuloksia hän uskoo ja miettimään onko kyse virheellisistä mittauksista, tai mahdollisesti virheellisestä tulosten tulkinnasta. Eettiset kysymykset vaikuttavat ristiriitaisten tulosten ratkaisuun. Triangulaation, eli menetelmällisen tutkimuksen tulosten tulkinnassa on tärkeää ymmärtää, mitkä kysymykset ovat tutkimuskysymysten kannalta tärkeitä. (Kananen 2010, 72–73.)

Tiedonkeruun menetelmät

Tapaustutkimuksen ongelmiin etsitään vastausta useista lähteistä ja kirjoittajan tehtävä on koota lähteistä kerätyt niin sanotut palapelin palaset ja luoda niistä ehjä kokonaisuus. Tiedonkeruu ja lähdeaineisto on hajanaista, joka on yksi tapaustutkimuksen tunnusmerkeistä. Tiedonkeruuprosessiin kuuluu myös havainnointia. Tärkeää on useista lähteistä hankitun tiedon samankaltaisuus, joka on yksi tapaustutkimuksen luotettavuuden periaatteista. Tiedonkeruun menetelmät ovat niin moninaisia, että tutkijan kyky hankitun datan hallintaan on koetuksella. Tapaustutkimuksessa on tärkeää käyttää aikaa tiedonkeruun suunnitteluun, sillä jos todetaan että tarvittavaa tietoa ei

ole mahdollista hankkia on tutkimuksen tekeminen turhaa. Hankittua lähdeaineistoa on sopiva määrä, kun aineisto saturoituu, eli toistaa itseään. (Kananen 2013, 115–117.) Triangulaation tiedonkeruu on yhdistelmä erilaisia menetelmiä aineistokeruussa, analyysissä ja datan tulkinnassa. (Kananen 2010, 72.)

2.2.3 Tutkimusmenetelmien soveltaminen

Tutkimusmenetelmien määrittely voi rajata toisistaan eroavien tutkimusmenetelmien käyttöä, mutta se on tärkeää luotettavan tutkimuksen aikaansaamiseksi. Osa menetelmistä sulkee pois toimenpiteitä, joita tässä tutkimuksessa tarvittiin, eikä niitä voitu luotettavuuden nimissä jättää tutkimuksen ulkopuolelle. Tästä syystä opinnäytetyöhön valittiin tapaustutkimuksen ja triangulaation menetelmät, jotka eivät rajaa tutkimusaineiston käyttöä, tai sen tulkintaa yhtä tarkasti, kuin muun tutkimusmenetelmät. Valittujen tutkimusmenetelmien antama tulosten tulkinnan vapaus on se, mikä tekee niistä tutkijalle haastavat. Tämän tutkimuksen datan analyysiin tarvittavia työkaluja olivat matematiikka, tilastot, looginen päättely ja vertaaminen aikaisempaan hypoteesiin. Näiden aineistojen analyysi oli haastavaa, sillä tulosten välinen yhteys ei käynyt aina selväksi ilman loogista päättelyä ja tulosten tulkinnan joustavuutta.

3 Mikrolevät

3.1 Yleistä

Mikrolevät ovat mikroskooppisen pieniä yhteyttäviä, usein yksisoluisia leviä, esitumallisia tai alkueliöitä. Mikrolevät tuottavat jopa 50 %:a yhteyttämällä tuotetusta hapestasta, joten niillä on tärkeä merkitys maapallon ilmastolle. Mikrolevät sisältävät lajikkeesta

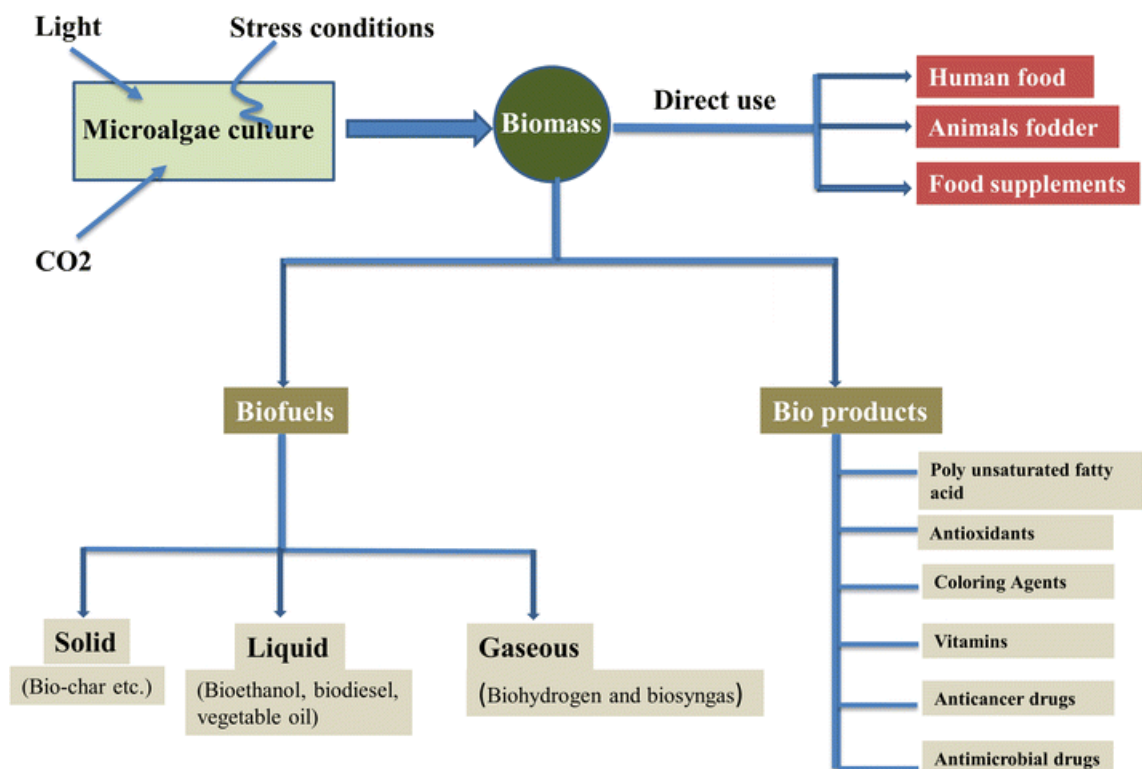
riippuen paljon erilaisia hyödyllisiä lipidejä, proteiineja ja hiilihydraatteja eri pitoisuuksina ja juuri mikrolevien monimuotoisuus tukee niiden hyötykäytön mahdollisuuksia. (Mourelle, Gómez & Legido 2017, 2; Gonzáles- Gonzáles & de-Bashan 2021, 1.) Mikroleviä esiintyy sekä suolaisissa että makeissa vesistöissä ympäri maailmaa aavikoilta arktisille alueille. Tämä kertoo mikrolevien kyvystä sopeutua monenlaisiin kasvuympäristöihin. (Fernández, Gómez-Serrano & Fernández-Sevilla 2018.)

Eri mikrolevälajit viihtyvät eri olosuhteissa, ja osaa näistä olosuhteista on haasteellista luoda suuressa mittakaavassa taloudellisesti kannattavasti laboratorio-olosuhteissa. Osa levistä sietää suurempia PH-tason vaihteluita, toiset korkeampia lämpötiloja. Osa levälajeista viihtyy valoisassa, toisen vähävaloisissa ympäristöissä. (Khan ym. 2018.) Levien kasvuun ja yhteyttämiseen tarvittavan valon määrä vaihtelee lajeittain ja valon määrä on avainasemassa levän hyötykäytön mahdollistamiseksi (Fernández ym. 2018). Keinotekoisissa kasvatusympäristöissä levämassat tarvitsevat myös ympäröivän nesteen liikkeen, jotta leväsolut saavat valoa tasaisesti ja solujen paakkuuntuminen voidaan estää. Mekaaninen sekoittaminen mahdollistaa myös kaasujen ja ravinteiden tehokkaamman liukenemisen ympäröivään nesteeseen ja siitä pois. (Khan ym. 2018.)

3.2 Mikrolevien käytön merkitys

Mielenkiinto mikrolevien käyttöä kohtaan on viimeisten vuosikymmenien aikana kasvanut maailmalla merkittävästi. Mikrolevillä on potentiaali ratkaista monia ihmiskunnan ongelmia energiantuotannon raaka-ainesaatavuudesta biotuote- ja elintarviketeollisuuden haasteisiin (ks. kuvio 2), sekä kasvattaa lääketeollisuuden raaka-aineiden monimuotoisuutta. (Khan ym. 2018.) Mikrolevien käyttöä pidetään modernina teknologiana, mutta niitä on käytetty ihmisravintona jo tuhansia vuosia (Mourelle ym. 2017, 1).

Mikrolevät ja levät yleisesti kasvavat huomattavasti nopeammin kuin maalla kasvavat kasvit, ja niiden lipidi- eli rasvapitoisuus on usein korkeampi, kuin monilla maalla viljellyillä öljykasveilla. Mikrolevien viljelyyn ei tarvita puhdasta vettä, eikä se varaa muuhun käyttöön sopivaa maa-alaa. Levien ravinteiksi voidaan myös hyödyntää jätevesien sisältämiä ravinteita, joiden päästämällä ympäristöön olisi muuten rehevöittävä vaikutus. (Fernández ym. 2018; Khan ym. 2018.) Hiilineutraalin ja nopeakasvuisen mikrolevän teollisen mittakaavan käyttöä ei ole vielä todettu suuressa mittakaavassa taloudellisesti kannattavaksi kaikilla sen potentiaalisilla hyödyntämisalueilla, mutta mikroleväbiomassaa tuottavia laitoksia ja yrityksiä on maailmalla jo useita, esimerkiksi Algenol, joka tuottaa biopolttoaineita mikroleväbiomassan avulla. Algenolin pääkonttori sijaitsee Floridassa, Yhdysvalloissa. (Khan ym. 2018.)

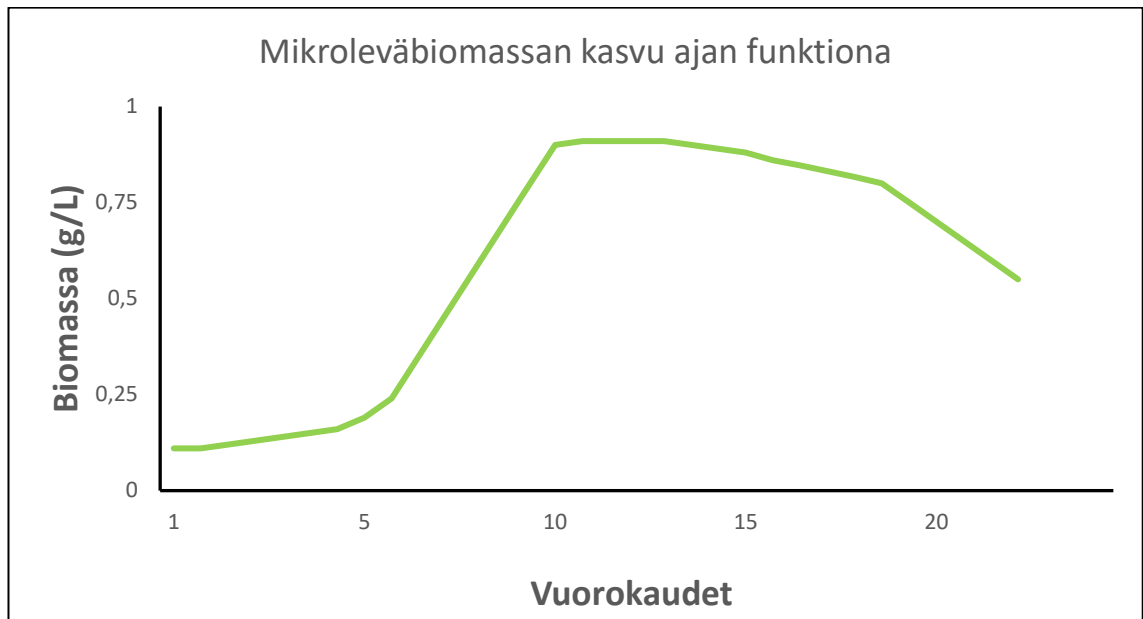


Kuvio 2. Mikroleväbiomassa on monipuolinen biopolttoaineiden ja muiden biotuotteiden raaka-aine (Khan, Shin & Kim 2018)

3.3 Mikrolevien viljely

Mikrolevien viljelyn haasteena on usein niiden elinkaari. Levien niin sanottu hyödyllinen elinkaari on melko lyhyt ja käsittää vain nopean kasvun vaiheen, jonka jälkeen solu alkaa kuolla. Nopean kasvun vaihe kestää mikrolevälajista riippuen noin viikon ajan, jonka jälkeen kasvu hidastuu. Kasvun hidastuminen johtuu yleensä yhden, tai useamman levän kasvuun tarvittavan ravintoaineen loppumisesta, valon määrän vähäisyydestä, tai muista ympäristötekijöistä, kuten lämpötilasta. Korkean konsentraation saattaminen viljellyissä levämassoissa on vaikeaa ilman kuolleen levämangan olemassaoloa. Tämä kuollut levämassa on hyödytöntä hiilidioksidin sitomisen kannalta, sillä vain kasvava leväsolukko yhteyttää. Kasvustoa harventamalla ja ravinteita lisäämällä voidaan kasvusykli aloittaa alusta. (Mikropopulaation kasvuvaiheet 2006; Khan ym. 2018.)

Mikroleväbiomassan kasvukäyrä on hyvin samanlainen, kuin muillakin viljellyillä mikroorganismeilla (ks. kuvio 3). Se jakautuu neljään vaiheeseen, joista ensimmäinen on lag-vaihe, jolloin kasvua ei vielä juuri tapahdu ja organismi totuttelee uuteen kasvualustaan, tai ympäristön muutokseen. Toinen vaihe on eksponentiaalisen kasvun vaihe, jolloin kasvusto kasvaa olosuhteiden ja saatavan ravinnon rajoittamana niin nopeasti kuin se pystyy. Kolmas vaihe on stationäärivaihe, jonka lopussa kasvaminen loppuu kokonaan usein ravinnonlähteiden ehtymisen takia. Viimeisenä on kuolemisvaihe, tämä vaihe on myös eksponentiaalinen, mutta hitaampi kuin eksponentiaalisen kasvun vaihe. (Mikropopulaation kasvuvaiheet 2006; Khan ym. 2018.)



Kuvio 3. Mikroleväbiomassan kasvu ajan funktiona (Mikropopulaation kasvuvaiheet 2006, muokattu)

3.4 Mikroleväreaktorit

Mikroleväreaktori on mikrolevien kasvatusprosessin ydin. Erilaisia reaktortyyppisiä on useita ja niiden rakentamiseen, sekä operointiin tarvittavaa kirjallisuutta on runsaasti saatavilla. (Fernández ym. 2018.) Yhtä ja parasta reaktortyyppiä kaikkiin käyttötarkoituksiin ei ole olemassa, sillä reaktorin toteutukseen vaikuttavat valittu levälaji, olosuhteet ja käyttötarkoitus. Reaktorit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, avoimiin järjestelmiin ja suljettuihin järjestelmiin. Kasvuolosuhteiden hallinnan tarve ajaa reaktorien tutkimusta enemmän suljettujen järjestelmien suuntaan. (Carvalho, Meireles & Malcata 2006, 1490.) Suljetut järjestelmät ovat kuitenkin huomattavasti, jopa kymmeniä kertoja kalliimpia hankkia ja käyttää, kuin avoimet järjestelmät (Carlsson, Beilen, Möller & Clayton 2007, 15).

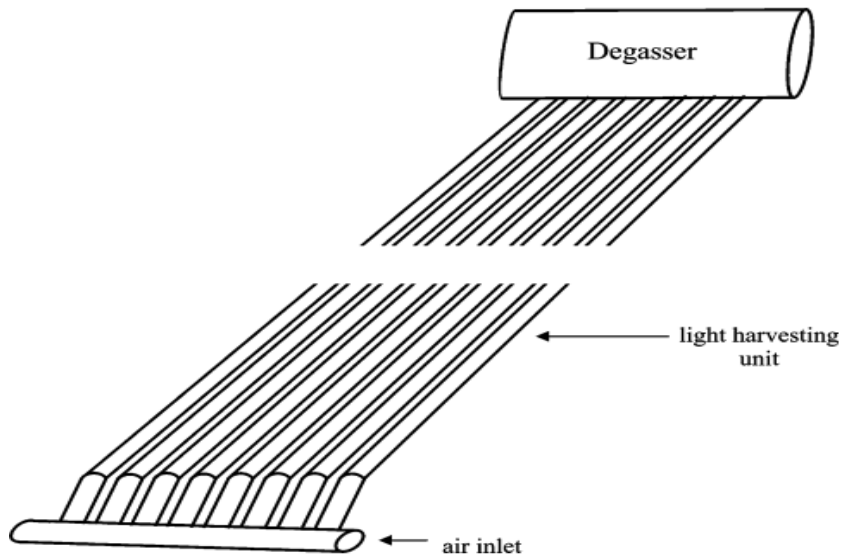
Suljettuja reaktortyyppijä on useita ja kaikissa tavoitellaan mahdollisimman hyvää pinta-alan ja tilavuuden suhdetta. Hyvä pinta-alan ja tilavuuden suhde mahdollistaa hyvän valon läpäisyn reaktorissa kasvavaan biomassaan. Useat suljetun järjestelmän reaktorit ovat putkireaktoreita ja niistä yleisimmät ovat vaakaputkireaktorit ja pystyputkireaktorit. Pystyputkireaktoreissa alhaaltapäin syötetty kaasu liukenee hyvin veteen ja mahdollistaa kasvuston tehokkaan sekoittumisen kaasukuplien avulla (ks. kuvio 4). Pystyyn asetetun reaktorin toimintapinta-ala on pieni verrattuna vaakaputkireaktoreihin. (Carvalho ym. 2006, 1493–1494.)



Kuvio 4. Pystyputkireaktoreja laboratorio-olosuhteissa

Vaakaputkireaktoreiden suosio mikroleväbiomassan viljelyssä on ollut kasvussa, sillä niissä kaasu nousee loivassa kulmassa ja vaakatasoinen rakenne mahdollistaa suuremman reaktoripinta-alan altistumisen auringonvalolle (ks. kuvio 5). Vaakaputkireaktoreiden ongelmana pystyputkireaktoreihin verrattuna on mediumin lämpötilan säätö, sillä

tehokkaan auringonvalon läpäisy nostaa reaktorin sisäistä lämpötilaa. Vaakaputkireaktorit tarvitsevat myös enemmän muuhun rakentamiseen soveltuvaa pinta-alaa. (Carvalho ym. 2006, 1494–1495.)



Kuvio 5. Nousevan vaakaputkireaktorin havainnekuva (Carvalho, Meireles & Malcata 2006, 1495)

Suljettuja reaktorityyppejä ovat myös kierreputkireaktorit ja levyreaktorit. Suljettujen reaktorimallien etuna avoimiin reaktoreihin nähden on myös niiden kyky estää mikrolevämediumin kontaminoituminen. (Carvalho ym. 2006, 1490–1496).

Avoimet mikroleväreaktorit ovat usein suuria ja matalia allasmaisia rakennelmia, joita sekoitetaan mekaanisesti (Fernández ym. 2018; Carvalho ym. 2006, 1491). Suurten nestemäärien ja ison pinta-alan seurauksena levien harventaminen on usein kallista ja haasteellista verrattuna suljettuihin reaktoreihin. Avoimissa ympäristöissä kasvustojen kontaminoitumisriski on suuri, sillä monet mikrolevälajit viihtyvät samanlaisissa olosuhteissa, eikä ilmassa kulkevien epäpuhtauksien päätyminen reaktoriin ole mahdotonta. (Carvalho ym. 2006, 1491.) Avoimia reaktoreita käytetään erityisesti laitoksissa,

joissa jätevesien ravinteita käytetään mikrolevien kasvattamiseen. Raceway-reaktori-tyyppiä käytetään yli 90 %:ssa kaikissa jätevesiä käsittelevissä mikroleväntuotantolaitoksissa maailmalla (ks. kuvio 6). Avoimena reaktorina Raceway-reaktori on matala, nimensä mukaisesti kilparadan muotoinen reaktori, jota sekoitetaan mekaanisesti lapojen avulla. (Fernández ym. 2018.)



Kuvio 6. FCC AQualian ALLGAS projektissa käyttämä Raceway-reaktori vasemmalla ja oikealla uudempi LEAR-järjestelmä (Fernández, Gómez-Serrano & Fernández-Sevilla 2018)

3.5 Mikrolevien taloudellinen merkitys

Maailmalla vuonna 2020 mikroleväteollisuuden markkina-arvoksi arvioitiin noin 3,4 miljardia USD, joka vastaisi noin 2,795 miljardia euroa. Vuoteen 2027 mennessä mikrolevämarkkinoiden arvioidaan nousevan noin 3,781 miljardiin euroon. (\$4.6 Billion Worldwide Microalgae Industry to 2027 – Impact of Covid-19 on the Market 2020.) Eri

mikrolevälajit tuottavat erilaisia hyödykkeitä, joiden arvo riippuu niiden jatkojalostusasteesta. Esimerkkeinä *Spirulina A. plantesis*, jonka tuotannosta saadaan pigmenttejä ja biomassaa kosmetiikkaan ja terveyselintarvikkeisiin, *Chlorella Vulgaris*, jonka biomassaa hyödynnetään lisäravinteisiin ja rehunkorvikkeisiin, sekä terveyselintarvikkeisiin. *Phaedactylum tricornutum* - mikrolevää käytetään puolestaan biopolttoaineiden raaka-aineena ja ravinteiden lähteenä. (Carlsson, Beilen, Möller & Clayton 2007, 10.) *Nannochloropsis*-suvun mikrolevät sisältävät melko tasavahvoina pitoisuuksina lajikkeesta riippuen erilaisia rasvoja, hiilihydraatteja ja proteiineja. *Nannochloropsis Oculata* lajike sisältää myös peptidejä, joilla on todettu eläinkokeissa olevan hyvät verenpainetta laskevat ominaisuudet. (Barkia, Saari & Manning, 2019, 4–13.)

Monista mikrolevälajeista voidaan eristää erilaisia karotenoideja kuten β -karoteenia, joka on antioksidantti, sekä erilaisia omega-3 rasvahappoja. Karotenoidien maailmanlaajuisen markkina-arvon ennustettiin nousevan 1,259 miljardiin euroon vuonna 2021 ja omega-3 rasvahappojen maailmanlaajuisen tukkukaupan arvo vuosittain on noin 7,399 miljardia euroa. Loogisesti mitä korkeammalle mikrolevätuotteita jalostetaan, sitä korkeamman jälleenmyyntihinnan niistä saa. Korkeampi jalostusaste taas lisää tuotannon kustannuksia. (Barkia ym. 2019, 2–6.) Kaupallisessa käytössä *Spirulina* ja *Chlorella* ovat hallinneet markkinoita jo pitkään. Kysyntä terveelliseksi ravinnoksi ihmisille on johtanut siihen, että mikrolevätuotteista noin 75 %:a jalostetaan elintarviketeollisuuteen. Mikrolevät ovat kuitenkin myös tärkeä biopolttoaineiden raaka-aine ja niiden merkityksen uskotaan kasvavan tulevaisuudessa. (Gujar, Cui, Ji, Kubar & Li 2019, 3–6.)

4 Hiilidioksidipäästöt

4.1 Hiilidioksidi osana kasvihuonekaasupäästöjä

Kaikki ihmiskunnan kasvihuonekaasupäästöt ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂-ekv), mutta varsinaisen hiilidioksidin määrä osuutena on suurempi, kuin muiden kasvihuonekaasujen. Vuoden 2019 kasvihuonekaasupäästöistä 59,1 Gt CO₂-ekv, hiilidioksidin osuus oli 38 Gt. Hiilidioksidin osuus vastaa siis melkein 65 %:a kaikista kasvihuonekaasupäästöistä, kun mukaan on laskettu maankäytöstä aiheutuvat päästöt. Energiantuotannon osuus kasvihuonekaasupäästöistä on yli puolet, mutta tämä osuus on tasaantunut noin 33 Gt CO₂-ekv osittain uusiutuvien energianlähteiden ja ydinvoiman käytön lisääntymisen ansiosta. (Global CO₂ emissions in 2019 2020; Emissions Gap Report 2020.) Fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa on suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde. Muita suuria päästöjentuottajia ovat teollisuus, rahtiliikenne maalla, vedessä ja ilmassa, sekä ihmisasutuksesta aiheutuvat päästöt. (Hillintä: Maailman kasvihuonepäästöt kasvavat yhä 2020.)

Teollisesta vallankumouksesta lähtien ihmisen toiminnasta aiheutuvat päästöt ovat kasvattaneet ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta 48 %:a (Carbon Dioxide 2021). Hiilidioksidipitoisuuden nousu vahvistaa kasvihuoneilmiötä maapallolla ja aiheuttaa ilmaston lämpenemistä. Lämpenemisen seurauksena nykypäivän kosteat ilmastoalueet voivat muuttua kuiviksi alueiksi ja päinvastoin. (The Causes of Climate Change n.d.) Hiilidioksidin vapauttaminen teollisuuden prosesseista maksaa hiilidioksidin tuottajille. Hiilidioksidipäästöjen verottaminen on monimutkainen prosessi, sillä hiilidioksidiverotuksen määrä vaihtelee maittain ja verotuksen perusteet ovat laitos- ja polttoainekohtaisia. Yleisesti teollisuudessa vuonna 2019 laskentaperusteena Suomessa käytetty

hiilidioksidiveron määrä oli 53 €/tCO₂. (Laukkanen 2020.) Ihmiskunnan hiilidioksidipäästöjen vaikutus ilmastoon lämpenemiseen on ollut huomattavaa jo 1960-luvulta alkaen. Tutkittaessa myös luonnollisten hiilidioksidipäästölähteiden, kuten tulivuorten purkausten, aiheuttamaa hiilidioksidipäästökuormaa huomataan niiden olevan vain marginaaliosa kokonaishiilidioksidipäästöistä. (Stips, Macias, Coughlan, Garcia-Gorriz, & Liang 2016, 4.)

Hiilidioksidipitoisuuden ja muiden kasvihuonekaasujen määrän nousun tiedetään lämmittävän ilmastoa, mikä aiheuttaa esimerkiksi jäätiköiden sulamisesta johtuvaa merien pinnannousua. Hiilidioksidipäästöjen haitalliset vaikutukset yltyvät kuitenkin ilmastoon lämmittävää vaikutusta pidemmälle. Valtameriin ja vesistöihin liukeneva liika hiilidioksidi vaikuttaa haitallisesti moniin yhteyttäviin eliöihin ja kasveihin happamoittamalla vesistöjä ja näin vaikeuttamalla niiden kasvua. (Karnauskas, Miller & Schapiro 2020, 1.) Hiilidioksidipitoisuuden nousu vaikuttaa myös ihmisille tärkeisiin viljeltäviin kasveihin, jotka joidenkin tutkimusten mukaan kasvavat nopeammin korkeammassa hiilidioksidipitoisuuksissa, mutta pitoisuuden nousun välilliset vaikutukset laskisivat niiden ravintoarvoja ja mineraalipitoisuuksia. Hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilojen nousu parantaisi myös monien tuholaisten, rikkakasvien ja haitallisten sienten kasvumahdollisuuksia haitaten hyödyllisten viljelyskasvien tuotantoa. (Climate Impacts on Agriculture and Food Supply 2016.)

4.2 Esimerkkejä hiilidioksidipäästöjen lähteistä

4.2.1 Energiantuotanto

Energiasektori tuottaa noin 72 %:a kaikista kasvihuonekaasupäästöistä maailmassa (Hillintä: Maailman kasvihuonepäästöt kasvavat yhä 2020). Kehittyneiden maiden ulkopuolella kasvihuonekaasupäästöjen määrä kasvoi vuonna 2019 lähes 400 Mt ja suurin

osa tästä kasvusta, noin 80 %:a oli peräisin Aasian valtioista. Erityisesti Kiinassa hiilen kysyntä energiantuotannon polttoaineena on kasvanut ja sen osuus energiantuotantoon käytettävistä polttoaineista on yli 50 %:a. (Global CO₂ emissions in 2019 2020.)

Suurimpana yksittäisenä hiilidioksidintuottajana energiasektorilla maailmassa on Kiinan Taiwanin saarella Longjinissä sijaitseva Taichungin voimalaitos, joka tuottaa vuosittain noin 41 300 000 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Hiiltä polttoaineena käyttävän Taichungin laitoksen teho on kokonaisuudessaan 4 130 MW. (CGD ranks CO₂ emissions from power plants worldwide 2007; Taichung Coal-Fired Power Plant n.d.) Vastaavasti Jyväskylän Voima Oy:n Keljonlahden voimalaitoksen hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2020 yhteensä 204 805 tonnia hiilidioksidia. Keljonlahden voimalaitoksen nimellisteho on lämmön- ja sähköntuotannossa 451 MW ja se käyttää polttoaineena pääosin puuta ja turvetta. (Laitoskohtaisen todennetut päästöt [t CO₂] vuosilta 2013–2020 2020.)

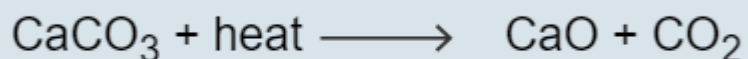
Teoriassa yhdistettyjä biopolttoaineita käyttävän Keljonlahden hiilidioksidipäästöt yhtä megawattia kohti ovat vain 4,54 %:a Taichungin laitokseen verrattuna. Taichungin voimalaitos tuottaa hiilidioksidipäästöjä megawattia kohti 10 000 t CO₂/MW ja Keljonlahti 454,1 t CO₂/MW. Tämä tarkastelu ei kuitenkaan ole täysin luotettava, sillä tarkkaa käytettyä tehoa ei vuosittain tarkastelussa tiedetä, mutta se antaa kuvaa eri puolilla maailmaa käytettävien eri polttoaineilla toimivien laitosten ekologisuuden tasosta. Hajautetummassa energiantuotannossa laituskoot ovat pienempiä, kuten KSS Energia Oy:n Hinkismäen voimalaitos Kouvolassa, joka tuotti 6 369 tonnia hiilidioksidipäästöjä vuonna 2020 ja Savon Voima Oyj:n Naarajärven lämpölaite, jonka tuotannosta vuonna 2020 aiheutuneet hiilidioksidipäästöt olivat 6 tonnia. (Laitoskohtaisen todennetut päästöt [t CO₂] vuosilta 2013–2020 2020; Entisen Itä-Suomen ympäristölupaviraston ympäristölupapäätökset 2009 2013.)

4.2.2 Teräs- ja sementtiteollisuus

Terästeollisuudesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen osuus maailman kokonaishiilidioksidipäästöistä on materiaalien louhinta mukaan luettuna noin 10 %. Yksipuolisten terästeollisuuden ilmastosäätelytoimenpiteiden soveltamisen takia todellisten teräksen tuotannosta syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä voi olla paljon korkeampi, kuin on arvioitu. (Mathiesen & Maestad 2004, 1–4) Euroopan unionin raudan ja teräksen tuotannon päästöt ovat unionin kokonaishiilidioksidipäästöistä 4 % -7 %:n välillä. Määrällisesti tämä vastaa jo 252 500 000 tonnia hiilidioksidipäästöjä aikavälillä 2005 ja 2008. (Padro, Moya & Vatopoulos 2012, 7.)

Teräksen kysyntä on kasvanut 2000-luvun aikana. Kehittyvien maiden vaurastuminen kasvattaa teräksen kysyntää ja tämä lisää teräksen tuotannon energiantarvetta sekä hiilidioksidipäästöjä. Noin puolet maailman teräksestä tuotetaan Kiinassa, mutta sen osuus teräksen kuluttajana on laskusuuntainen. Yhtenä teräksentuotannon päästöjä pienentävänä toimenpiteenä on jo käytössä oleva ja tulevaisuudessa lisääntyvä kierrätysmateriaalien käyttö teräksen valmistuksessa. (Iron and Steel 2020.) SSAB Europe Oy:n terästehdas Raahessa tuotti vuoden 2020 aikana yhteensä 3 349 868 tonnia hiilidioksidipäästöjä ja Ovako Imatra Oy Ab:n Imatran terästehdas tuotti vastaavasti 43 886 tonnia hiilidioksidia vuonna 2020. (Laitoskohtaisen todennetut päästöt [t CO₂] vuosilta 2013–2020 2020).

Sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöt kattavat maailmanlaajuisista päästöistä noin 8 %:a. Yksittäiseksi rakennusaineen valmistukseen perustuvan tuotannon osuudeksi luku on kuitenkin merkittävän suuri. 50 %:a sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöistä syntyy, kun kalsiumkarbonaatti CaCO₃ muuttuu korkeissa lämpötiloissa kemiallisten reaktioiden seurauksena kalsiumoksidiksi CaO ja hiilidioksidiksi, (ks. kuvio 7). (Gibbs, Soyka & Conneely 2000, 176.)



Kuvio 7. Kalsiumkarbonaatin kalsinointi reaktioyhtälö (Timperley 2018)

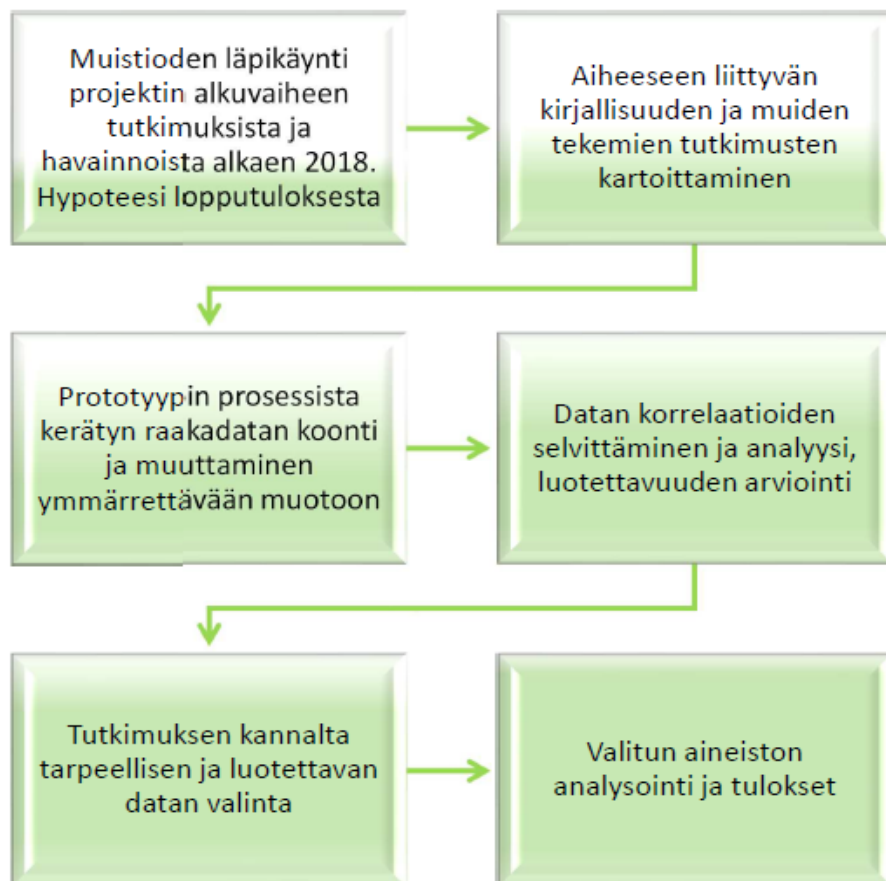
Loput 40 %:a hiilidioksidipäästöistä sementinvalmistuksessa syntyvät uunien lämmittämiseen tarvittavan polttoaineen käytöstä ja viimeinen 10 %:a valmistukseen tarvittavien materiaalien louhimisesta ja kuljettamisesta. Maailmalla käytetään vuosittain yli 10 biljoonaa tonnia betonia, joka valmistetaan sekoittamalla yhteen sementti, vesi, sora ja vesi. Seuraavan kymmenen vuoden aikana sementin tuotannon ennustetaan nousevan jopa 25 %:a. (Timperley 2018.) Finnsementti Oy:n Paraisten sementtitehdas tuotti 531 300 tonnia ja saman yhtiön Lappeenrannan sementtitehdas 319 621 tonnia hiilidioksidia vuonna 2020 (Laitoskohtaisen todennetut päästöt [t CO₂] vuosilta 2013–2020 2020).

5 Tutkimuksen aineistonkeruu ja vaiheet

Opinnäytetyössä hyödynnettiin vuonna 2018 alkaneista aikaisemmista projekteista tehtyä tutkimusta. Ulkopuolisen aineiston lisäksi projektissa tehty tutkimus antoi tietoperustaa prototyypin ja prosessin datankeruun suunnittelussa. Tutkimus antoi myös mahdollisuuden luoda hypoteesin prototyyppiprosessin lopputuloksesta paremmin, kuin pelkkä aikaisempaan ulkopuoliseen tutkimusaineistoon nojaaminen. Maailmalla tehtyyn tutkimustietoon perehtyminen oli ehdottoman tärkeää, mutta järkeväksi todettiin käyttää prosessin ja mittauksen suunnitteluun aikaisemmin projektiin tehtyä tutkimusta, sillä alueellisten erojen huomioiminen, kuten valon määrän ja lämpötilojen

muutokset vaikuttivat kriittisesti projektin toteutukseen. Suomen talviset olosuhteet eivät tue avointen mikroleväreaktoreiden käyttöä ympärivuotisesti, joten tästä syystä reaktorityypiksi valittiin suljettu kuplitustoiminen eristetty reaktori.

Tietoperusta koostui pääasiassa vieraskielisestä aineistosta, sillä aihe on Suomessa melko uusi ja siitä on tehty vasta vähän perustutkimusta. Tutkimusperusta rakennettiin myös omista tutkimus- ja kehittämishankkeista aiheeseen liittyen. Aineistoa kerättiin levätutkimuslaitosten materiaaleista erityisesti Etelä- ja Pohjois-Amerikasta, sekä Aasiasta, joissa mikrolevätutkimus on laajasti sovellusten tasolla. Aineistoa kerättiin myös jätevesilaitosten mikrobipuhdistusmenetelmiin liittyvästä teknologiakirjallisuudesta. Aineistoista hyödynnettiin olennainen tieto mikrolevien fotosynteesistä, sekä elinolosuhteista. Perustavanlaatuisen matemaattisten yhtälöiden avulla voitiin laskea laitosten tehoja ja tuotettujen päästöjen määrää. Tie-
donkeruuprosessi (ks. kuvio 8), ABF-projekti ja opinnäytetyö olivat synteetinen prosessi, jossa aikaisemmat projektit ja opinnäytetyö täydensivät toistensa aineistoa.



Kuvio 8. Tiedonkeruuprosessin vaiheet

5.1 Hypoteesi

Ennen tutkimuksen aloittamista tehtiin prototyypin tehosta ja testauksen tuloksista hypoteesi, jossa aikaisemman lähde- ja tutkimusaineiston perusteella arvioitiin mahdollista lopputulosta. Lähtötilanteessa käytettiin oletusta, että mikrolevät pystyvät sitomaan noin 1,8 kertaisen määrän hiilidioksidia omaa painoaan kohti. Yksi kilogramma mikrolevämassaa pystyisi täten sitomaan 1,8 kg hiilidioksidia. (Khan, Shin & Kim 2018;

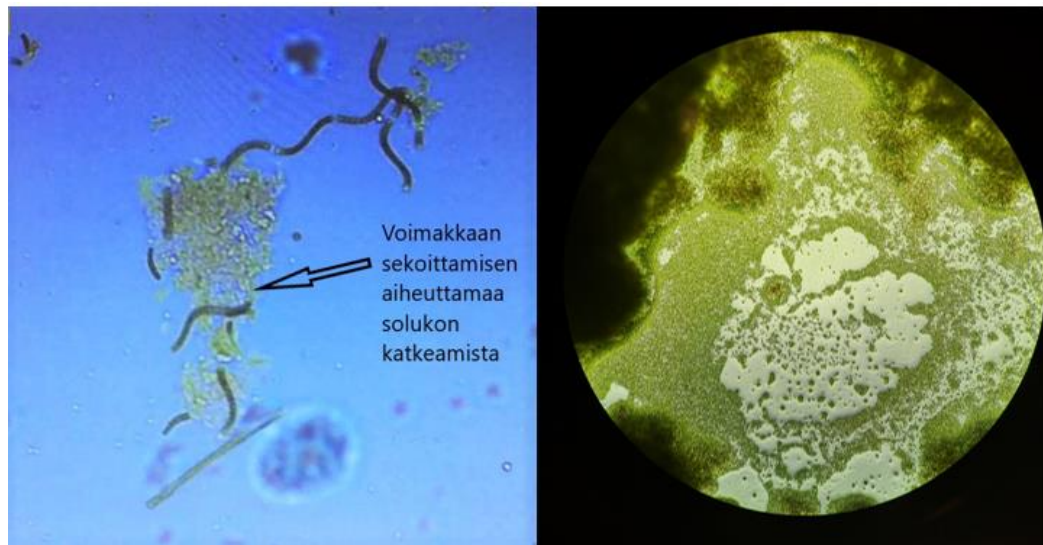
Gendy, Seham & El-Temtamy 2013). Mikrolevää sisältävän nesteen optimaalista ja samalla mahdollisimman suurta leväkonsentraatiota oli tutkittu 11.04.2018 laboratorio-kokeissa ja todettu kasvustonäytteistä hehkutusmenetelmän avulla, että kuivan levän pitoisuus nesteessä voi olla yli 5 prosenttiyksikköä. Tutkimuksessa tutkittiin kolmea koe-erää samasta kasvustosta, joita kuumennettiin uunissa 105 °C noin 5 tuntia. Mittaus ei ollut suoraan standardikelpoinen, mutta siinä sovellettiin joitain kohtia standardista SFS-EN ISO 18134-2:2017, joka on tarkoitettu leväpolttoaineiden tutkimusmittauksiin. Tulokseksi saatiin 5,02 %:n keskiarvo levän kuivapainon osuudeksi nesteen kokonaismäärästä. Tämä tiedon perusteella yhden kuutiometrin tilavuisen reaktorin pitäisi pystyä sitomaan hiilidioksidia biomassaan 90,36 Kg hiilidioksidia, kun levän osuus reaktorin mediumista olisi 50,2 Kg ja kerroin sitomiskyvylle 1,8 kertainen.

5.1.1 Mikrolevälajin valinta

Monet mikrolevät kasvavat parhaiten noin 20–35 °C lämpötilassa. Prototyypissä käytetyn *Nannochloropsis Oculata*-levän optimaaliset kasvuolosuhteet vaativat noin 30–33 °C lämpötilan. Aikaisemmissa laboratoriokokeissa todettiin muidenkin, kuin prototyypissä käytetyn mikrolevälajikkeen osalta, *Spirulina A. plantesis* ja *Chlorella Vulgaris*, että oli helpompaa ja leväkasvuston kannalta turvallisempaa pitää kasvumediumin lämpötila alle 30 °C, sillä ylitysten jälkeen leväkasvusto usein tuhoutui käyttökelvottomaksi. Matalampi lämpötila ei olisi haitallinen leville, mutta kasvu tapahtuisi hitaammin. Prototyypireaktorin tavoitelämpötilaksi asetettiin n. 30 °C. Reaktorin lämpötilaa voitiin oletettavasti säätää polttokattilan savukaasujen lämpötilan mukaan ja kaasuja voitaisiin tarvittaessa jäähdyttää konvektiopohjaisen jäähdytysputken avulla, tai nostaa lisäämällä kattilan tehoa ja lyhentämällä konvektioputken pituutta.

Käytettäväksi valitulla *Nannochloropsis Oculata*lla oli paremmat ominaisuudet solurakenteensa ja kasvunopeutensa puolesta, kuin aikaisemmaksi vaihtoehdoksi ajatellulla

Spirulinalla. Nannochloropsiksen pyöreä solurakenne kestää paremmin sekoittamisesta aiheutuvan rasituksen kuin Spirulina, jonka spiraalin muotoinen rakenne katkeaa voimakkaassa sekoituksessa helpommin, mitä pidemmäksi se kasvaa (ks. kuvio 9). Spirulinalla tämä ominaisuus havaittiin, kun kuolleita näytteitä tutkittiin valomikroskopilla ja verrattiin elävään kasvustoon.



Kuvio 9. Voimakkaan sekoittamisen vaikutus, Spirulina vas. ja Nannochloropsis

Chlorella Vulgaris suljettiin pois sen hitaamman kasvunopeuden takia, mutta sitä pidettiin muuten testaukseen sopivana kandidaattina. Levän kasvatus prototyyppiä varten aloitettiin alkukasvatusmedieista, jotka sisälsivät 50 ml Nannochloropsis ja Chlorella levää (ks. kuvio 10). Kasvuston harventamisen yhteydessä lisättiin oikean lämpöistä vettä ja ravinneliuosta.



Kuvio 10. Alkukasvatusmediumit, Nannochloropsis Oculata oik. ja Chlorella Vulgaris

5.1.2 Hiilidioksidin liuotus reaktoriin

Suunnitteluvaiheessa tehtiin oletus, että reaktoriin olisi mahdollista varastoida noin yksi kuutiometri mikrolevää sisältävää mediumia, joka yhteyttämällä sitoisi laskennallisen määrän testissä poltetun puupelletin tuottamasta hiilidioksidista. Jos reaktorissa olisi yksi kuutiometri levämediumia, josta suurin osa on noin 30 °C vettä, pitäisi hiilidioksidia liueta reaktoriin noin 0,7 m³. Hiilidioksidin tiheys normaalipaineessa ja 30 °C lämpötilassa on 1,7777 kg/m³ (Evans 2015). Hiilidioksidi liukenee normaalipaineessa tilavuusprosenttiltaan 30 °C veteen noin 0,70 kertaistesti, eli 0,70 l/1 l. Tämä laskettiin hiilidioksidin tiheydestä ja liukenemisesta veteen 30 °C lämpötilassa, jossa liukenemismäärä on 1,24 Kg hiilidioksidikaasua/kg H₂O (Solubility of Gases in Water 2008). Mitä viileämpää vesi, sen parempaa on hiilidioksidin liukoisuus, mutta tämä tuo haasteita monille mikrolevälajeille. Hiilidioksidin liuutessa veteen voi syntyä myös hiilihappoa, mutta sen osuus liuenneen hiilidioksidin kokonaismäärästä olisi hyvin pieni. Kun hiilidioksidia on liennut reaktoriin 1,24 Kg, reaktori saturoituisi, jolloin levän pitäisi yhteyt-

tämällä laskea hiilidioksidin konsentraatiota reaktorissa, jotta liukeneminen voisi jatkaa. Saturoitumisen jälkeen reaktoriin lisättävä hiilidioksidi karkaisi reaktorista poistettavan kaasun mukana.

Puupelletin määrän lisäämistä, kuten muitakin prosessiarvoja tarkkailtaisiin, jotta lopuksi voitaisiin laskea tuotetun hiilidioksidin määrä. Oletukseen liittyi myös huomio mahdollisista häviöistä, joka testin tapauksessa tarkoittivat mahdollisia savukaasuvuotoja prosessikomponenteista. Hypoteesissa oletettiin, että poltetun puupelletin hiilidioksidipäästöistä pitäisi pystyä sitomaan aloituslevämässän painosuhteeseen verrattuna 1,8-kertainen määrä hiilidioksidia. Kun kaikki vaikuttavat tekijät testin luotettavuuden suhteen otettiin huomioon ja tarkasteltiin potentiaalisten isompien laitteiden mittakaavaa, todettiin että jo yhden tuotetun hiilidioksidiprosenttiyksikön sitominen kokonaistuotantomäärästä tarkoittaisi testauksen onnistumista.

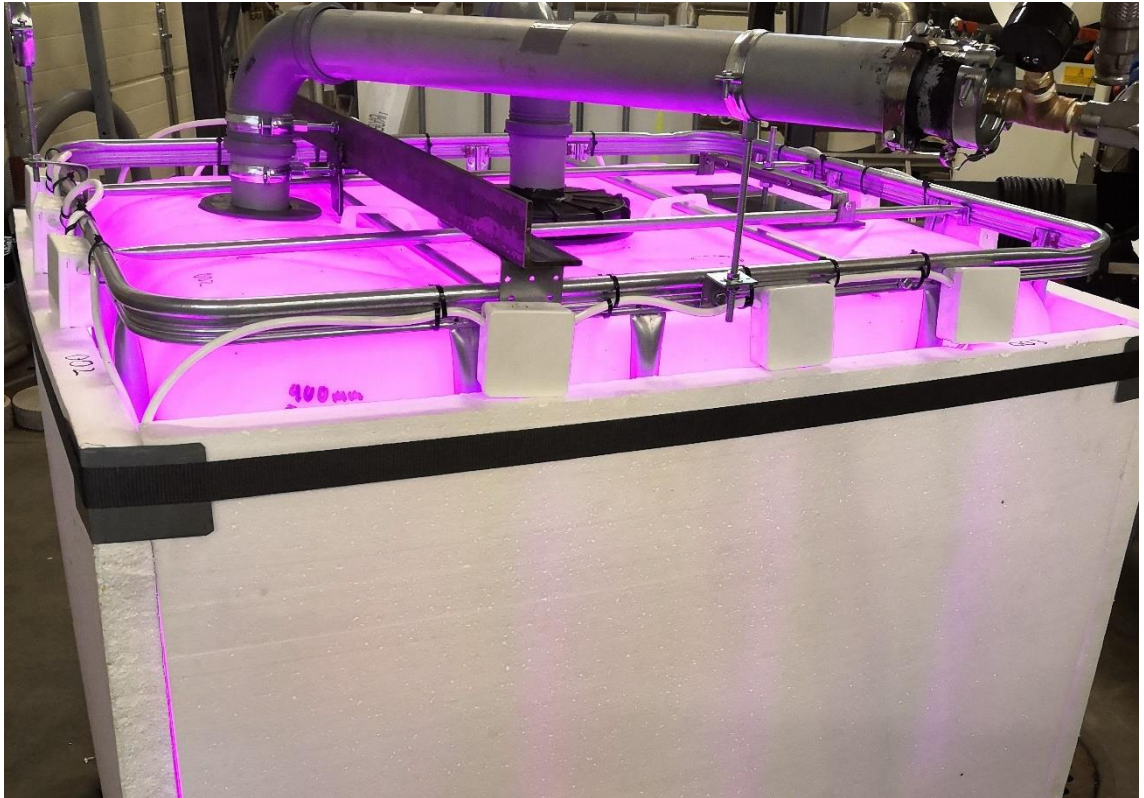
Tärkeimpinä onnistumisen mittareina pidettiin mikrolevämediumin painonmuutosta lopputilanteessa ja hehkutusjäännöksen määrää orgaanisen aineen kuivapainon määrittelyssä, jotka suoritettaisiin testausten päätyttyä. Tutkimukseen käytetyn reaktorin käyttöajan lyhyden seurauksena ei liuenneiden kaasujen vaikutusta reaktorin PH-tasoon voitu arvioida. Oletuksena savukaasut kuitenkin happamoittaisivat reaktorimediumia ja PH-tason neutralointiin jouduttaisiin tulevaisuudessa varautumaan.

5.2 Toteutunut testausasetelma

Mikrolevät tuotiin reaktoriin 15.10.2020. Tämän tarkoituksena oli mahdollistaa mikroleväkasvuston sopeutuminen uuteen kasvuympäristöön noin viikko ennen reaktorin käynnistystä, jotta hidaskasvuinen lag-vaihe voitaisiin ohittaa. Testausprosessi käynnistyi 20.10.2020 klo. 13:20 kattilan sytytyksellä ja päättyi 26.10.2020 klo. 13:03 kattilan

alasaioon. Lähtötilanteessa *Nannochloropsis Oculata* mikrolevää sisältävän mediumin määrä reaktorissa oli noin 300 litraa. Tämä ero alkuperäiseen suunnitelmaan yhdestä kuutiolitrasta johtui testausajankohdan osumisesta levän kasvukierron kuolemisvaiheeseen, eikä tiheää kasvustoa ollut harvennettavaksi niin paljon kuin oli oletettu. Reaktorin ja levämediumin yhteispaino oli testauksen alussa 374,28 kg sisältäen 20 kg lisäpunnuksen, jota käytettiin puntarin nollaamiseen. Samaa 20 kg punnusta käytettiin myös testauksen lopussa.

Reaktoriin oli tehty pinnankorkeusmerkintä, jotta haihtuneen nesteen määrä voitiin korvata vedellä testauksen päätyttyä, jotta punnitus olisi luotettava. Reaktori myös koekäytettiin ennen testausten aloitusta, jotta reaktorin tiiveys ja toiminta voitiin varmistaa (ks. kuvio 11). Reaktori oli varustettu myös näkölasilla, jotta prosessiajon aikaista toimivuutta voitiin tarkkailla. Puupellettiä polttavan arinakattilan tehosäädöksi valittiin 20 kW, jonka arvioitiin soveltuvan paremmin pienentyneen levämäärän hiilidioksidin sitomiskykyä vastaavaksi. Polttoaineena testauksissa käytettiin VAPO Oy:n havupuupellettiä.



Kuvio 11. Reaktorin koekäyttö ilmalla ennen järjestelmään liittämistä

6 Tulokset

6.1 Tutkimusaineiston analyysi

Tutkimusaineiston analyysiin valittiin prosessista saadut tärkeimmät arvot hiilidioksidin sitomiskyvyn kannalta, sekä vertailuarvoiksi laskennalliset tulokset hiilidioksidin liukenemisestä toteutuneissa prosessiolosuhteissa. Polttoaineen massa ja kulutus, sekä sa-

vukaasujen määrät prosessin alussa ja lopussa haettiin prosessidatasta. Prosessidatasta kerättiin myös reaktorin ja partikkelipuhdistimen, sekä prosessiputkiston lämpötilat. Lämpötiloista reaktorin mediumin sisäinen lämpötila vaikutti levän kasvuun ja muiden lämpötila-arvojen avulla voitiin ennustaa reaktorissa tapahtuvaa lämpötilan muutosta.

Reaktorin sisältävästä mediumista otettiin näyte ennen testausta ja sen jälkeen loppuvertailun hehkutuskoetta varten ja reaktori punnittiin ennen ja jälkeen testauksen. Analysoitavan datan pohjalta laskettiin reaktorin teho aikayksikköä kohti, sekä skaalaukseen soveltuva oletusarvo.

6.1.1 Käyttöaika ja polttoaine

Ensimmäinen testauspäivä 20.10.2020 jätettiin pois datan ja tulosten arvioinnista, sillä reaktori ehti olla käynnissä vain 40 minuuttia laitteistovian takia. Prosessi ajettiin alas vahinkojen estämiseksi. Aikavälillä 21.10.2020 ja 23.10.2020 prosessi oli käynnissä yhteensä 19 tuntia ja 50 minuuttia. Prosessiajota jatkettiin vielä 26.10.2020 5 tuntia ja 30 minuuttia, joten prosessin ajoaika oli yhteensä 25 tuntia ja 20 minuuttia. Mikrolevien leposyklin varmistamiseksi prosessiajot suoritettiin päiväsaikaan, eikä yhtäjaksoisesti. Yöaikaan prosessi oli suljettu sulkuventtiilien avulla, ja näin eristetty prosessin ulkopuoliselta vaikuttamiselta ja kaasujen vuodoilta.

Polttoaineena käytettyä havupuupellettiä kului prosessin ajon aikana yhteensä 115,05 kg. Pelletin kosteusprosentti oli testauksen aikana valmistajan ilmoittama 10 %:a. Pelletin kulutuksen, sen kosteuden, tuhkan ja raskasmetallien perusteella voidaan laskea palamisprosessissa kaasuuntuvien yhdisteiden määrä. Muutokset päiväkohtaisessa polttoaineen kulutuksessa johtuvat prosessinajon pituuden päiväkohtaisesta vaihtelusta. Polttokattilan hetkellistehon keskiarvo koko prosessin ajon aikana oli 18,95 kW.

Taulukko 1. Polttoaineen päiväkohtainen ja kokonaiskulutus

Polttoaineen kokonaismäärä ja kulutus kg

Päivämäärä	Lähtötila	Lopputila	Lisäys	Kulutus
21.loka	104,1 kg	80,04 kg	-	kg 24,06 kg
22.loka	147,58 kg	113,26 kg	-	kg 34,32 kg
23.loka	113,18 kg	113 kg	33,85 kg	34,03 kg
26.loka	112,82 kg	107,44 kg	17,26 kg	22,64 kg
				yht. kulutettu 115,05 kg

6.1.2 Savukaasujen hiilidioksidi

Hiilidioksidin osuus savukaasuista mitattiin Testo 350-savukaasuanalysaattorilla kattilan savukaasukanavan alkupäästä noin metrin etäisyydellä kattilan savukaasupuhaltimelta. Testo 350 oli asetettu mittaamaan arvo savukaasukanavasta viiden sekunnin välein. Savukaasujen mitattu hiilidioksidiosuuden keskiarvo prosessiajon ensimmäisenä päivänä jäi paljon pienemmäksi kuin muiden, johtuen palamisprosessin säädön haasteista. Hapen osuus oli savukaasuissa ensimmäisen päivän mittauksissa korkeampi kuin muilla mittauskerroilla. Tämä johtui ylipaineesta ja tulipesän primääri- ja sekundääripuhaltimien tehonnoston tarpeesta, jonka reaktori aiheutti polttokattilan tulipesään. Tulipesän paine saatiin vakiinnutettua ylipaineen puolelle ja palamisprosessi jatkui hyvänä siitä huolimatta, eikä prosessista toimintaperiaatteen takia savukaasuja ei päässyt ulos kattilasta.

Taulukko 2. Hiilidioksidin osuuden keskiarvo savukaasupäästöistä ennen reaktoria

Testo 350Hiilidioksidin (CO₂) osuus savukaasuista ennen reaktoria

PVM	% keskiarvo savukaasuista
21.10.2020	5,08 %
22.10.2020	10,74 %
23.10.2020	11,40 %
26.10.2020	13,38 %

Lopputilanteessa reaktorin jälkeen mitattu savukaasujen hiilidioksidipitoisuus kertoo mahdollisen reaktoriin jääneen hiilidioksidin määrän. Tarkastelussa tulee arvioida myös mahdollisten vuotojen vaikutusta tulokseen, sekä partikkelisuodattimeen jäänyttä hiilidioksidia, minkä osuus on kokonaisuudesta kuitenkin oletuksena hyvin pieni. Reaktorin jälkeinen savukaasu analysoitiin kattilapiirin savupiippuun kiinteästi asennetulla Servomex 4900 savukaasuanalysointilaitteella.

Taulukko 3. Hiilidioksidin osuuden keskiarvo savukaasupäästöistä reaktorin jälkeen

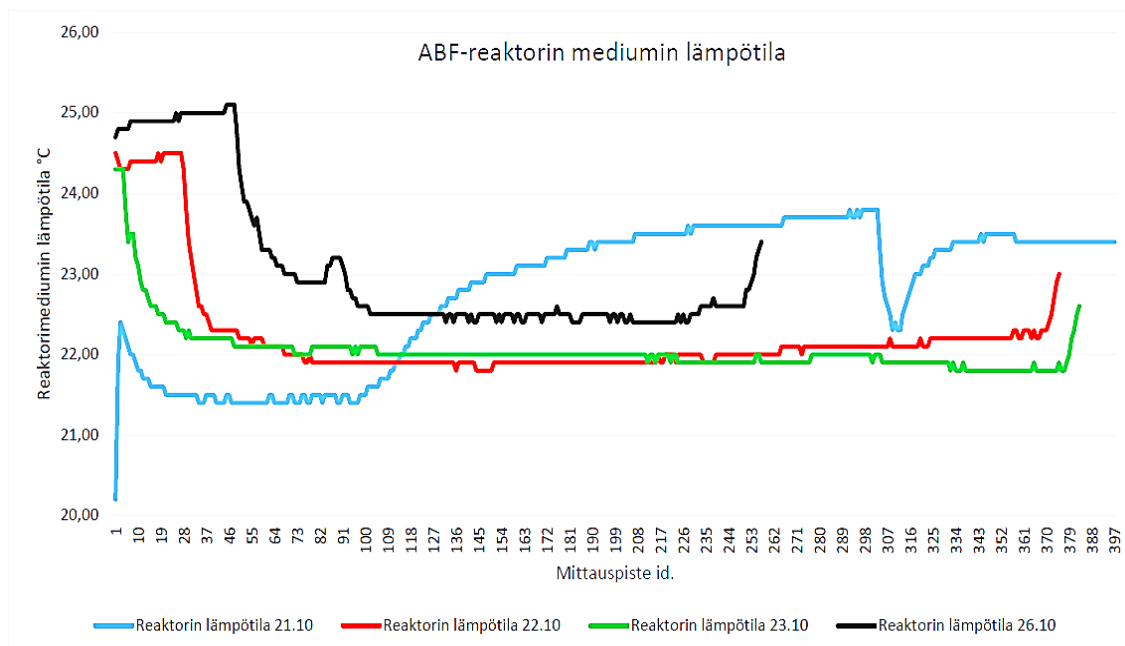
Kattilapiirin piipun analysointilaitteella Servomex 4900Hiilidioksidin (CO₂) osuus savukaasuista reaktorin jälkeen

PVM	% keskiarvo savukaasuista
21.10.2020	4,68 %
22.10.2020	10,09 %
23.10.2020	10,48 %
26.10.2020	12,65 %

6.1.3 ABF-reaktorin data

Algae BioFilter-reaktorin levämediumin lämpötilaa seurattiin testien aikana, jotta reaktorin sisäinen lämpötila ei kasvaisi liian suureksi. Mittauspisteitä oli prosessissa yhteensä neljä prosessin alkupäästä kohti reaktoria. Prosessin alkupään lämpötilamuutoksilla voitiin ennustaa reaktorin sisällä tapahtuvaa lämpötilanmuutosta, jotta reaktorin lämpötila ei kasvaisi liian suureksi. Reaktoriin asetettiin yksi Testo T176-data-loggerin neljästä lämpötila-anturista mittaamaan mediumin lämpötilaa. Lämpötila ei saanut ylittää 30 °C, eikä alittaa 20 °C. Reaktorin lämpötilaa pyrittiin säätämään konvektiojäähdytysputkistolla, jonka säätökyky oli rajoitetumpi kuin oli suunniteltu, joten lämpötilaa säädettiin kattilan tehoa säätämällä.

Lämpötilat reaktorissa tasoittuivat testien aikana noin 22,5 °C, mikä ei ollut levien kasvun kannalta optimaalinen, mutta mahdollisti prosessin tasapainon (ks. kuvio 12). Aikaisemmissa kasvatuskokeissa havaittiin, että levät kasvavat melko hyvin vielä 20 °C lämpötiloissa. Muutos oletettuun 30 °C tarkoittaa, että laskennallisen liukenevan hiilidioksidin määrä oli korjattava. Lämpötilassa 22,5 °C ja normaalipaineessa hiilidioksidin tiheys on 1,815 kg/m³ (Evans 2015). Liukoisuus normaalipaineessa 22,5 °C veteen on noin 0,88 kertainen, eli 0,88 l/l. Tämä laskettiin hiilidioksidin tiheydestä ja liukenemisesta veteen 22,5 °C lämpötilassa, kun liukenemismäärä on 1,6 g hiilidioksidikaasua/kg H₂O (Solubility of Gases in Water 2008).



Kuvio 12. ABF-reaktorin mediumin lämpötilat

Reaktorin massa oli testien alussa ilman 20 kg kalibrointipunnusta 354,28 kg ja testauksen jälkeen ilman kalibrointipunnusta 357,00 kg ja reaktorin lämpötila 21,6 °C. Reaktorin nestepinta oli haihtumisen seurauksena prosessissa vajonnut 6 mm ja reaktoria täytettiin takaisin merkittävään pinnankorkoon asti ennen loppupunnitusta. Kun reaktorin omamassa 79,9 kg vähennetään koko aloitusmassasta ilman kalibrointipunnusta, saadaan reaktorin sisällön massaksi 274,38 kg.

Aistien varainen havainnointi oli prototyypin prosessiajossa tärkeää, jotta laitteiston toimintakykyä voitiin valvoa ja arvioida. Erityisesti vuotokohtien selvittäminen onnistui parhaiten hajua- ja visuaalisen havainnoinnin avulla. Visuaalinen havainnointi antoi tärkeää tietoa myös mikroleväkasvuston värin muutoksesta (ks. kuvio 13). Muutos vihreämpään sävyyn alku- ja loppunäytteiden välillä antoi nopeasti tietoa prosessin onnistumisesta ennen hehkutuskoetta. Näytteet otettiin molemmissa tapauksissa reaktorin tyhjennysyhteen kautta, joka sijaitsee samalla korkotasolla, kuin reaktorin pohja.



Kuvio 13. Reaktorin mikrolevänäytteet ennen testausta vas. ja testauksen jälkeen.

6.2 Testaustulokset

Polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidin prosenttiosuuden avulla voitiin arvioida järjestelmän läpi kulkeneen ja prosessiin jääneen hiilidioksidin määrää. Teoreettisen ja mitatun jäännöshiilidioksidin, eli reaktoriin ja prosessiin jääneen hiilidioksidin määrän välillä oli ero. Järjestelmästä mitattu keskiarvon avulla määritelty jäännöshiilidioksidi oli 612,4 g ja laskennallinen maksimimäärä liuennutta hiilidioksidia lähtötilanteessa oli 438,2 g. (Liite 1.) Erotus on 174,2 g, joten tämä oli järjestelmään liuenneen hiilidioksidin todelli-

nen määrä ensimmäisen saturaation jälkeen testauksen edetessä. Järjestelmä satureituu, kun nesteeseen on liennut maksimimäärä hiilidioksidikaasua ja tämän jälkeen levien on yhteyttämällä sidottava hiilidioksidia biomassaan, jotta liukenemien voi jatkaa. Satureoitumisen jälkeinen ylijäämähiilidioksidi, jota ei ehditä sitoa biomassaan poistuu muiden kaasujen mukana reaktorista mediuminestepatsaan läpi. Teoreettisen hiilidioksidin määrä laskettiin kertomalla nestetilavuus $0,27438 \text{ m}^3$, kun veden tiheys on 1000 Kg/m^3 hiilidioksidin mahdollisella liukenemismääräkertoimella $0,88$ ja tämän jälkeen kertomalla hiilidioksidin tiheydellä $1,815 \text{ kg/m}^3$ lämpötilassa $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hehkutuskoee oli tulosindikaattoreista tärkein. Kokeen avulla voitiin vertailla reaktorista otettujen näytteiden hehkutusjäännösten muutosta. Hehkutuskoee suoritettiin standardin SFS-EN 3008:1990 mukaan $550 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa ja se antoi tulokseksi $0,1 \text{ g/l}$. (Liite 2.) Tämä tarkoitti, että levän määrä kasvoi reaktorissa yhteensä $27,438 \text{ g}$. Jos testissä käytetyillä levillä olisi kyky sitoa omaa massaansa kohti $1,8$ kertainen määrä hiilidioksidia tarkoittaisi, että levät sitoisivat yhteensä $49,38 \text{ g}$ hiilidioksidia koko testausprosessin aikana. Hiilidioksidia reaktoriin liukeni mittausten perusteella $612,4 \text{ g}$. Reaktori siis sitoisi biomassaan 8% :a siihen liuotetusta hiilidioksidista. Tämä tulos oli kuitenkin levien sitomiskyvyn teoreettiseen arvoon perustuva.

Reaktorista mitatun jäännöshiilidioksidin ja laskennallisen kerralla liunneen hiilidioksidin määrän erotus antoi testauksesta laskentakertoimen levien hiilidioksidinsitomiskyvylle. Laskennan ja mittausten erotus oli $174,2 \text{ grammaa}$, joten uusi kerroin tähän testaukseen levän kyvylle sitoa hiilidioksidia biomassaan olisi $6,35$. Järjestelmän läpi kulkeneen hiilidioksidimäärän perusteella voitiin olettaa, että mediumi satureitui ensimmäisen kerran jo ensimmäisen testauspäivän puolivälissä ja levä on suurella todennäköisyydellä sitonut hiilidioksidia jo ennen tuota satureoitumispistettä. Tämä määrä olisi kuitenkin niin vähäinen, että sitä ei oteta huomioon. Ensimmäisen testauspäivän aikana hiilidioksidia syötettiin reaktoriin savukaasujen mukana 940 g . (Liite 1.) Kerrointa $6,35$ voidaan pitää liian korkeana ollakseen luotettava tulos, joten käytettäväksi levän sidontakyvyn kertoimeksi valittiin teoreettinen $1,8$. Tämä tarkoittaisi, että liunneen hiilidioksidin kokonaismäärästä sidottiin biomassaan 8% :a. Tilavuudeltaan tämä

vastaisi $0,0894 \text{ m}^3$ hiilidioksidikaasua. Reaktorin savukaasupesuriin liuennutta hiilidioksidia ei voitu prosessissa hyödyntää ja voitiin olettaa, että jäljelle jäänyt osuus biomassaan sitoutumattomasta hiilidioksidista on liuennut pesuriin ja osittain myös karannut järjestelmän vuotokohdista. Käyttämättömän ja prosessista karanneen hiilidioksidin määrä oli laskennallisesti yhteensä $124,8 \text{ g}$. Reaktoria ajettiin yhteensä 25 tuntia ja 20 minuuttia, joten reaktorin tehoksi saatiin $1,8$ kertoimella $1,94 \text{ g CO}_2/\text{h}$ kun levämediumia oli yhteensä $274,38$ litraa. Prosessiin tuotettujen savukaasujen mukana tulleen hiilidioksidikaasun kokonaismäärä oli 9060 g . (Liite 1.) Kokonaismäärästä sidottu hiilidioksidi kapasiteetilla $274,38$ litralla levämediumia oli tässä kokeessa $49,38 \text{ g} / 9060 \text{ g} = 0,5 \%$. Tavoitekapasiteetti reaktorimediumia tähän laitokseen oli 1000 litraa.

6.3 Tulosten luotettavuus

Tuloksiin valittiin tarpeelliset arvot mittauksista ja laskelmista liittyen levän kykyyn sitoa hiilidioksidia, sekä teoreettinen hiilidioksidin sitomiskyvyn kerroin, jotta tulosten luotettavuus olisi mahdollisimman korkea. Vaikka mikrolevät sitoisivat vain oman kasvupainonsa verran hiilidioksidia, olisi sidotun liuennun hiilidioksidin määrä silti melkein $4,5 \%$:a. Mahdollisten savukaasuvuotojen ja järjestelmän muihin osiin sitoutuneen hiilidioksidin määrä ei testauksessa voitu ottaa laskennallisesti huomioon, sillä vuodoista ei jäänyt merkkejä hiilidioksidin liuottamisen seurauksena. Järjestelmässä oli havaittavissa aistien varaisella tarkastelulla kaksi pientä vuotokohtaa, jotka havaittiin myös prosessin painemuutosta tarkastelemalla. Vuodot tukittiin heti niiden löytymisen jälkeen ja näitä kohtia tarkkailtiin vuodonilmaisuliukuksia apuna käyttäen tukkimisprosessin jälkeen.

Reaktorin painonmuutos oli testien jälkeen 2,72 kg. Inhimillisen virheen mahdollisuus pinnankorkeuden mittauksessa oli liian korkea, jotta tätä tulosta voitiin pitää luotettavana. Yhden millimetrin virhe mittatarkkuudessa pinnankorkeutta lisätessä tarkoittaa yhden kilogramman muutosta painossa täytön jälkeen. Tätä arvoa ei hyväksytty mukaan tulosten vertailuun. PH-tason vaihteluiden tarkastelun puute voi vaikuttaa tulevaisuudessa pitkäkestoisten reaktoriajojen tuloksiin, mikäli neutralointimenetelmillä olisi suoria vaikutuksia levien kasvukykyyn. Prosessin toteutunut lyhyt ajoaika ei antaisi luotettavia tuloksia PH-tasapainon muutoksesta, mutta oletuksena voidaan pitää reaktorinesteen happamoitumista pitkissä prosessiajoissa ilman neutralointimenetelmiä.

Savukaasuanalysaattorien datan analysoinnin luotettavuus perustuu valittuihin arvoihin, kun tilastoissa havaitaan ensimmäinen ja viimeinen riittävän iso muutos. Mittapisteiden arvoihin ei valittu alle prosentin tuhannesosan muutoksia testin alku- tai loppuvaiheessa, eikä negatiivisia arvoja alussa ja lopussa. Kaikki arvopisteet alku ja loppupisteiden välillä otettiin mukaan laskelmaan, eikä niitä yritetty sulkea pois. Tämä aiheuttaa mittauslaittehäiriöistä johtuvan arvojen satunnaisen heilahtelun, mutta poistaa mahdollisuuden valita testiin parhaiten sopivia arvoja ja vääristellä arvoja suuntaan tai toiseen. (Liite 3.) Savukaasuanalysaattorit oli kalibroitu ennen ja jälkeen mittausta-pahtuman. Teorian, laskennan ja mittaustulosten välisellä suhteella voidaan testauksen luotettavuutta pitää hyvällä tasolla. Puutteet vuotokohtien savukaasumenetyksistä ja savukaasupesuriin liunneen hiilidioksidin laskennasta ja mittauksista heikensivät tulosten luotettavuutta ja tarkasteluissa jouduttiin turvautumaan teoreettiseen arvoon laskennallisen sidontakertoimen noustessa liian suureksi.

6.4 Eettisyys

Eettisyyden tarkastelu tutkimuksessa kohdistui tulosten ja tulosten luotettavuuden arviointiin. Hyvien tutkimusperiaatteiden noudattaminen on erityisen tärkeää projekteissa, joissa hypoteettisten tulosten ja tutkimustulosten välillä on eroavaisuuksia, eivätkä tulokset ole välttämättä toivotunlaisia. Vaikean projektin toteuttaneen tutkijan voi myös olla vaikeaa nähdä realistista kokonaiskuvaa, kun tuloksia arvioidaan kriittisesti. Jos tutkimusten analyysi aiheuttaa hypoteesiin nähden liian hyviä tuloksia, tulee tuloksia arvioida erityisen kriittisesti. Jos jokin tutkimusarvo on hypoteesiin ja muihin maailmalla tehtyihin tutkimuksiin, sekä tutkimuksen muihin osiin suhteutettuna liian hyvä ollakseen totta, tulee tutkimustulosten arvioinnin apuna käyttää esimerkiksi teoriaan perustuvia ja useissa tutkimuksissa todettuja arvoja, mikäli kokeen toistaminen ei ole enää mahdollista ilman lisäresursseja.

Absoluuttisen totuuden selvittäminen ei tutkimuksissa aina ole mahdollista. Joskus tutkimuksen tulosten analyysiä varten joudutaan tekemään oletuksia eri asioiden välisistä suhteista. Oletusten tulee kuitenkin perustua analyyttiseen jatkumoon testausten tuloksista, eikä todettuja tuloksia saa tarkoituksella vääristellä. Tutkimustulosten asettama kehys täytyy oletuksissa säilyä. Tässä tutkimuksessa haastavana voitiin pitää valintaa luopua joistakin prosessista kerätyistä arvoista ja korvata ne teorialla, jotta tutkimustulokset eivät vääristyisi.

7 Soveltaminen

7.1 Skaalaus

Prosessin skaalaustarkastelu isompaan kokoluokkaan voitiin aloittaa AFB-reaktorin tulosten pohjalta jo reaktorin omaan prosessiin. Oletuksena, että prosessi skaalautuu suoraan levämediumin määrää lisäämällä, voidaan pitää kohtuullisena tiettyyn rajaan asti. Raja tulee vastaan nestemediumin sisältävän säiliön koon ja levämediumin neste- korkeuden läpäisyyn tarvittavan paineentuoton järkevässä toteutuksessa. Skaalaus on järkevämpää toteuttaa käyttämällä hiilidioksidinsitomiskyvyn tehoa suhteessa kuutioti- lavuuteen ja sidottavan hiilidioksidin määrään, kuin kuutiotilavuuden ja suodatustehon suhdetta käytetyn hiilidioksidia tuottavan järjestelmän tehoon. Kun tarkastelua suori- tetaan useisiin erilaisiin päästölähteisiin ja polttoaineisiin, ei tuottavan järjestelmän te- holla ole niin suurta merkitystä, kuin tuotetun hiilidioksidin määrällä.

ABF-reaktorin tavoitteellinen mikrolevämediumin määrä oli 1 m^3 . Toteutunut me- diumin määrä oli 274,38 litraa. Reaktorissa oli 3,64 kertaa vähemmän mediumia kuin oli tavoiteltu. Skaalauksessa teho nousee suhteessa mediumin määrään, joka tarkoit- taa hiilidioksidin sitomiskyvyn suhteen nousua, kun mediumin määrä kasvaa. ABF- reaktori satoi syötetyn hiilidioksidin kokonaismäärästä 0,5 %:a toteutuneella medium määrällä. Kertoimen avulla tavoiteltu teho tähän prosessiin yhdelle kuutiolitralla olisi täten $(49,38 \text{ g} * 3,64) / 9060 \text{ g} = 1,9 \%$. Tehollisesti tämä tarkoittaisi $7,09 \text{ g CO}_2/\text{h}$. Tätä arvoa käytettiin skaalauslaskennassa yhdelle kuutiometrille levämediumia.

Teollisuusympäristöissä säiliökoko voi olla yksittäisistä kuutioista tuhansiin kuutioihin. Varastosäiliöt ovat yksi suurimpiin säiliöihin kuuluva luokka, joiden tilavuudet ovat tu-

hansia kuutioita. Laitostyyppistä ja koosta riippuen varastosäiliön tilavuus voi olla esimerkiksi 4000 m³. Pienemmät halkaisijaltaan noin 3 m ja korkeudeltaan alle 10 m säiliöt luokitellaan usein pieniksi. Pienten säiliöiden tilavuus on yleensä sadoista litroista muutamiin satoihin kuutiolitroihin. Skaalausmenetelmällä teollisuusmittakaavassa pienen 140 m³ ABF-reaktorin hiilidioksidikaasun sitomisteho olisi 992,6 g CO₂ / h. Puolestaan suuren mittakaavan reaktorin, eli 4 000 m³ reaktorin teho olisi 28 360 g CO₂ / h.

Reaktorissa oleva levä tarvitsisi vuorokaudessa lepoaikaa, jotta kasvustolle aiheutuva stressi ei kasvaisi liian suureksi. Tehokkaimmaksi lepoajan ja reaktorin käyttöajan suhteeksi oli todettu tutkimuksissa 16 h/8 h (Khan ym. 2018). Käyttöaikana reaktorin altistetaan valolle 16 tuntia ja lepoaikana reaktori on ilman valoa 8 tuntia. Laskennallisesti tämä tarkoittaisi reaktorin mahdolliseksi käyntiajaksi 5 840 tuntia vuodessa, kun mukaan ei lasketa huoltoaikoja, tai muita seisokkeja. Pienempi reaktori, eli 140 m³ suodatettaisiin vuodessa tällöin 5 796 kg hiilidioksidia ja suurempi 4000 m³ reaktori 165 622 kg hiilidioksidia. Pienemmästä reaktorista saataisiin teoriassa vuodessa parhaillaan 3 220 kg kuivaa biomassaa ja suuremmasta reaktorista 92 012 kg kuivaa biomassaa 1,8 levänkasvun kertoimella. Kuivalla biomassalla tarkoitetaan biomassaa, joka on suodatettu mediuminesteestä ja kuivattu jatkokäsittelyprosesseja varten.

Suuremman reaktorin koon ollessa 4000 m³ alkaa sen viemä pinta-ala vaatimaan suuremman ympäröivän laitosintegraation olemassaoloa. Reaktori tarvitsisi lopullisessa käyttökohteessaan myös osaprosesseja, joten sen koko kasvaisi itse reaktoria suuremmaksi. Pienten lämpölaitosten käytössä suurikokoisen reaktorin käyttö ei olisi järkevää jo pelkkien rakennuskustannuksien perusteella. Pienemmissä laitoksissa pienempien reaktorien käyttö olisi tilanvarauksen ja rakennuskustannusten kannalta järkevämpää. Pienten laitosten yhteyteen voitaisiin rakentaa kohtuullisen helposti useampien pienten reaktorien sarjoja, jotka toisiinsa kytkettyinä voisivat vastata jatkuvaan hiilidioksidintuotantoon reaktorien keskinäisiä leposyklejä muuttamalla. Samaa periaatetta voitaisiin soveltaa myös isoissa reaktoreissa.

7.2 Tuotantolaitoskohtaiset yksiköt

Tuotantolaitosten käyttämän polttoaineen tyyppillä ei ole suurta merkitystä AFB-reaktorin käyttömahdollisuuksiin muuten, kuin savukaasujen puhtauden osalta. Puh- taasti palavat polttoaineet vaativat vähemmän pudistusta ennen mikroleväreaktoria. Esimerkiksi sementin valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat melko puhtaita verrattuna jätteenpoltoon, riippuen myös laitoskohtaisista pudistusprosesseista. Lai- toskohtaisessa yksikkövertailussa käytettiin esimerkkeinä hiilidioksidipäästöjen esi- merkkiosiossa käsiteltyjä laitoksia.

Suurimman vertailulaitoksen, eli Taichungin voimalaitoksen päästöt olivat vuosittain noin 41 300 000 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Suuren laitoksen yhteyteen sovellettiin skaalauksesta saadun suuren AFB-reaktorin suodatustehoa. Suodatusteholtaan 4000 m³ kokoinen AFB-reaktori suodattaisi vuodessa 165 622 kg hiilidioksidia, joten vuoti- nen sidotun hiilidioksidin laskennallinen prosenttiosuus olisi Taichungin laitokselle 0,0004 %:a. Taichungin kokoisen laitoksen yhteyteen voitaisiin asentaa useita suuria AFB-reaktoreita, mutta siitä huolimatta niiden teho suhteessa laitoksen päästöihin olisi hyvin pieni.

Teollisen kokoluokan AFB-reaktorien mahdollinen käyttöönotto aloitettaisiin todelli- suudessa pieniin laitoksiin liittämällä, tai hyödyntämällä suurten laitosten savukaasu- kanavien ohitusvirtauksesta kerättyä savukaasua. Keljonlahden voimalaitoksen vuosit- taisten 204 805 tonnin hiilidioksidipäästöistä voitaisiin yhdellä suurella 4000 m³ reaktorilla sitoa 0,08 %:a. Vertailumittakaavassa keskikokoinen Hinkismäen voimalaitos tuotti 6 369 tonnia hiilidioksidipäästöjä, joten suuren reaktorin käytöllä kyseisestä voi- malasta voitaisiin sitoa 2,6 %:a tuotetusta hiilidioksidista. Pienten lämpölaitosten, ku- ten Naarajärven lämpölaitoksen yhteyteen voitaisiin asentaa pienempi 140 m³ reaktori- malli, jonka avulla vuosittaisista 6 000 kg CO₂ päästöistä voitaisiin 5 796 kg/a suodatusteholla sitoa 96,6 %:a laitoksen vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä. Kahdella

sarjaan kytketyllä pienellä reaktorilla voitaisiin sitoa kaikki vuoden aikana tuotettu hiilidioksidi biomassaan, kun suodatusta voitaisiin suorittaa kellon ympäri.

Suurissa teollisuuden tuotantolaitoksissa pyritään suunnittelusta lähtien tehokkaaseen maankäytön hyödyntämiseen, joten suurten reaktorikompleksien rakentaminen voisi olla haastavaa jälkikäteen. Toisaalta savukaasujen siirtämiseen tarvittavien putkistojen rakentaminen savukaasujen ohivirtaukselle, tai savupiipun putkiston kiertäminen on suurella todennäköisyydellä mahdollista kohtuullisin kustannuksin. Terästeollisuuden esimerkkilaitosten hiilidioksidipäästöjen hallintaan vaadittaisiin suurten reaktorikokojen käyttöä ja silti olisi kannattavaa käyttää vain savukaasulinjojen ohitusvirtauksia. Raahen terästehdas tuotti vuodessa yhteensä 3 349 868 tonnia hiilidioksidipäästöjä, joten yhden suuren kokoluokan reaktorin kyky suodattaa hiilidioksidia olisi vuodessa 0,0049 %:a ja Imatran terästehtaan 43 886 tonnin vuotuisista hiilidioksidipäästöistä 0,37 %:a. Sementtiteollisuuden hiilidioksidi päästöjen osalta Paraisten sementtitehtaan 531 300 tonnin ja saman Lappeenrannan sementtitehtaan 319 621 tonnin hiilidioksidipäästöistä voitaisiin suurella reaktorilla sitoa 0,031 %:a ja 0,05 %:a.

Energiantuotannon ja muun suuren teollisuuden yksittäisten tuotantolaitosten päästöt ovat hyvin suuria ABF-reaktorin järkevään kokoon ja sen tuomaan tehoon suhteutettuna. Laitoskohtaisissa yksiköissä AFB-reaktorin koko pitäisi myös suhteuttaa käytettävissä olevan maapinta-alan, halutun suodatustehon ja prosessin muun toiminnan mukaan. Savukaasujen paineen nostoon tarvitaan kompressori- tai puhallinteknologiaa, joka pitää toteuttaa olemassa olevan prosessin toimintaa myötäillen. Savukaasujen hiilidioksidin sitominen ei saa häiritä olemassa olevan prosessin toimivuutta. Savukaasujen paineenosto- ja suodatusjärjestelmät ja mikrolevämediumin jatkokäsittelyyn tarvittava laitteistot tarvitsevat myös energiaa, joka pitää joko tuottaa itse, tai ottaa nykyisen laitoksen energiaresursseista. Kylmissä ilmastoissa reaktorit tulisi pitää sisätiloissa, mutta suurikokoisten reaktorien sijainti rakennuksissa ei usein ole mahdollista. Toinen ja kannattavampi vaihtoehto olisi eristää reaktorit huolellisesti ja antaa savukaasujen lämpötilan pitää yllä sopivaa mediumin lämpötilaa. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan esiintyisi maissa, joissa keskilämpötilat ovat reilusti nollan asteen yläpuolella.

8 Pohdinta

ABF-reaktorin hiilidioksidin sitomistehoksi testausprosessissa todettiin 1,94 g CO₂/ h ja kun tämä skaalattiin vastaamaan 1 m³ tavoitereaktorikokoa, saatiin tuloksena hiilidioksidin sitomistehon arvoksi 7,09 g CO₂/ h. Prototyypin testausta voitiin pitää onnistuneena, jos järjestelmään syötetystä hiilidioksidista pystyttäisiin sitomaan biomassaan 1 %. Tämä tavoite asetettiin ennen projektilaitteiston rakentamista, sillä kokonaisuuden haastavuus laitteiston toteuttamisesta halutun datan mittaustarkkuuden saavuttamiseen ja prosessiajon hallintaan todettiin vaativaksi. Skaalaamaton tulos, 0,5 %:a kaiken tuotetun hiilidioksidikaasun sitomisesta jäi onnistumisrajan alapuolelle, mutta tavoitetaustasetelmaan verrattuna mikrolevämediumin osuus reaktorissa oli myös 3,64 kertaa pienempi. Skaalattu laskenta yhteen kuutiometriin mediumia antoi sidotun hiilidioksidin osuudeksi 1,9 %:a, joten testausta voitiin pitää onnistuneena skaalatun tuloksen osalta. Laskelmissa käytettyä levän sitomiskyvyn kerrointa 1,8 voidaan pitää korkeana, mutta skaalattu laskenta antaa onnistuneen tuloksen, vaikka kerroin levän kyvyille sitoa hiilidioksidia painokiloa kohti olisi vain 1. *Nannochloropsis Oculata* mikroleväkasvuston kunto oli testausilanteessa huono ja on todennäköistä, että terveemmällä ja paremmassa kasvun vaiheessa olevalla kasvustolla olisi ollut mahdollista toteuttaa myös 1 m³ mediumimäärä reaktorissa. Jos terveen kasvuston määrä olisi testausten aikana ollut 5,02 %:a kokonaismediumin määrästä, olisi myös testaustulos voinut potentiaalisesti parantua.

Reaktorin suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tehtiin virheitä ja näiden virheiden seurauksena jouduttiin tekemään kompromisseja prosessilaitteissa, mutta lopulta reaktori saatiin toimimaan päivää ennen testausten aloittamista. Projektin aikataulu venyi, joten testaukset aloitettiin oletettua myöhemmin siirretyllä aloituspäivämäärällä. Lisäaika ennen projektin testausvaiheen aloittamista olisi mahdollistanut ainoastaan mikroleväkasvuston paremman kunnon, mutta teknistä toteutusta ei olisi voitu käyttää

olleilla resursseilla enää parantaa. Reaktoriprosessiin liitetyn pesurin ja prosessin savukaasuvuotojen osuus todettiin merkittäväksi reaktorin käyttämättä jääneen hiilidioksidin osalta tulosten analyysivaiheessa. Pesuriin liunneen hiilidioksidin määrä olisi voitu selvittää laskemalla pesurin teoreettinen saturoitumispiste. Tätä ei kuitenkaan suunnitteluvaiheessa otettu huomioon. Suurin osa prosessivuodoista tapahtui konvektiojäätysalueen putkistoissa. Paremmilla materiaalivalinnoilla vuotavien savukaasujen määrää olisi voitu merkittävästi pienentää.

Reaktorin ajoaika oli tämän mittakaavan tutkimukseen lyhyt. Reaktorin käyttöaika ei kattanut kokonaisen mikroleväkasvuston elinkaarta lag-vaiheesta kuolemisvaiheeseen. Tulevaisuuden mahdollisissa koelaitoksissa reaktorien käyttöaika tulisi olla vähintään yhden mikroleväkasvuston elinkaaren mittainen, jotta reaktorin tehon muutosta voitaisiin seurata vertaamalla sitä suodatustehon muutoksiin koeprosessin aikana. Lag-vaiheesta aloitettu testaus antoi kuitenkin tietoa mikrolevien kasvunopeudesta. Vaikka mikroleväkasvusto oli laitettu reaktoriin ennen testausprosessin alkamista, ei lag-vaiheen päättymisestä kuitenkaan ollut varmuutta.

8.1 Skaalautuvuus ja monipuolisuus

ABF-reaktorin skaalautuvuus pysähtyy suurimpien teollisuudessa käytettävien säiliöiden kokoluokkiin. Linearisena tarkasteltu tehon nousu kannustaisi suuriin reaktorikokoihin, mutta tilankäyttö ja rakennuskustannusten nousu muuttuu suurissa kokoluokissa ongelmalliseksi. Rakennus- ja kunnossapidon kustannusten nousu ei todennäköisesti nouse yhtä lineaarisesti, kuin reaktorin teho. Avoimilla järjestelmillä mediumin määriä voitaisiin kasvattaa huomattavasti, mutta tällöin menetettäisiin suljettujen järjestelmien edut ja kyky käyttää reaktoria kylmissä ilmastoissa. ABF-reaktori oli suunniteltu suljettuna reaktoryyppinä toimimaan kaikissa toimintaympäristössä,

eikä suuria muutoksia reaktoriin tarvittaisi, vaikka toimintaympäristö muuttuisi. Teollisuudessa tuotetut hiilidioksidimäärät ovat valtavia ja kaiken hiilidioksidin sitominen suurista yksittäisistä laitoksista olisi skaalauksen kannalta ABF-reaktoriteknologialla mahdollista. Tuotantolaitosten savukaasukanavien ohitusvirtausten käyttö olisi suurissa teollisuuskohteissa järkevämpää, kuin yritys skaalata reaktorikokoa tuotettua hiilidioksidimäärää vastaavaksi. Hiilidioksidin lähteenä toimivan laitoksen tyyppillä ei olisi suurta merkitystä, jos oletetaan että savukaasuja puhdistetaan jo tuotantolaitosten omissa prosesseissa ainakin kehittyneimmissä yhteiskunnissa. Sementtiteollisuuden päästöt ovat melko puhtaita ja sopisivat hyvin ABF-reaktorille hiilidioksidinlähteeksi. Tarvittaessa reaktoriin voidaan liittää oma savukaasupesuri, jonka tehtävä on puhdistaa savukaasujen irtopartikkelit. Tätä menetelmää käytettiin myös tässä projektissa.

Reaktorin toiminta ja käytön kannattavuus nojaisivat vahvasti tuotantolaitoksen ja reaktorin välisiin synteeseihin. Lähes kaikissa tuotantolaitosprosesseissa syntyy jonkin verran hukkalämpöä ja tämän lämmön käyttö esimerkiksi mikrolevämassojen kuivauksessa parantaisi myös tuotantolaitoksen hyötysuhdetta. Joidenkin tuotantolaitostyyppien yhteydessä on myös jätevesien käsittelyyn suunniteltuja laitoksia, joita voitaisiin hyödyntää mikrolevien ravinteiden lähteinä, tai tehostaa jätevesien puhdistusta hyödyntämällä laitoksen hiilidioksidipäästöjä käyttämällä mikrolevämassaa jätevesien ympäristöä rehevöittävien yhdisteiden sitomiseen. Synteisien hyödyntäminen tulisi selvittää reaktorin suunnitteluvaiheessa. Mikroleväbiomassan jalostusprosesseja eri laitosympäristössä tulisi tulevaisuudessa tutkia osana reaktorin taloudellista kannattavuutta. Sarjaan kytkettyjen reaktorien käyttö ympärivuorokautisessa hiilidioksidin puhdistuksessa olisi järkevää, sillä reaktorien eriaikaisten leposykliden aikana voitaisiin ottaa talteen mikroleväbiomassaa sekä huoltaa lepäviä reaktoreita, kun käytössä olevat jatkavat suodatusprosessia ilman erillisiä seisokkeja. Mikrolevät, kuten muutkin orgaaniset eliöt ja kasvit ovat alttiita sairauksille ja ympäristön rasituksesta johtuvalle stressille. ABF-reaktorilaitosten prosessit ja erityisesti logistiikkaketjut tulisi suunnitella siten, että kasvustoja ei rasitettaisi liikaa, eikä massojen siirtelystä aiheudu kontaminaatioita kasvustoihin.

8.2 Taloudellinen näkökulma

ABF-reaktorin käytön taloudellisen kannattavuuden tarkastelu maailmanmittakaavassa oli haastavaa. Hiilidioksiditonin hinta vaihtelee valtioittain ja eri polttoaineiden käytön mukaan. Suomessa hiilidioksiditonin hinnaksi oli vuonna 2020 laskennallisesti määritelty 53 €/tCO₂. Tilavuudeltaan 4 000 kuutiometrin ABF-reaktoriin sidotun hiilidioksidin hinnaksi Suomessa tulisi vuosittain 8 777,97 €, kun reaktorin hiilidioksidinsitomiskyky on 165 622 kg CO₂/a. Pienemmän 140 kuutiolitrin reaktorin sitoman hiilidioksidin vuosihinnaksi tulisi 307,19 €. Summat ovat kannattavan liiketoiminnan kannalta merkityksettömiä, eivätkä ne riittäisi kattamaan suunnittelun, rakentamisen, kunnossapidon tai käytön kustannuksia. ABF-reaktorin kehittämisen tarkoituksena oli vähentää tuotantolaitosten hiilidioksidipäästöjen määrää, mutta liiketoiminnallista potentiaalia ei pelkän hiilidioksidin poistamisella tällä hetkellä ole.

Suomessa päästö- ja hiilidioksidivero kattaa tulevaisuudessa enemmän erilaisia polttoaineita ja myös verotetun hiilidioksidin hinta nousee. Valtioiden yhteiset pyrkimykset ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi johtavat todennäköisesti samanlaiseen trendiin myös muualla maailmassa, mutta tämä kehitys on hidasta. Hiilidioksiditonin hinnan pitäisi nousta tuottajien kannalta tähtitieteelliseksi, jotta liiketoiminta pelkästään hiilidioksidin sitomisesta biomassaan olisi ABF-reaktorilla kannattavaa. Hiilidioksidin sitomisella teollisuuden päästöistä olisi tällä hetkellä enemmänkin eettinen merkitys ja reaktoriteknologian käyttäminen tuotantolaitoksissa parantaisi hiilidioksidia tuottavien yritysten imagoa. Jos ABF-reaktoriteknologia olisi maailmanlaajuisessa käytössä, alkaisi sidotun hiilidioksidin määrällä olla vaikutusta myös globaaliin ilmastomuutokseen.

Liiketoiminnan kannattavuus löytyisi todennäköisesti reaktorin tuottaman hyödykkeen, eli mikroleväbiomassan hyötykäytöstä. Vuoden 2027 ennuste mikroleväteollisuuden arvosta on 3,781 miljardia euroa ja mitä pidemmälle mikroleväbiomassaa jalostetaan, sen korkeammalle yhden kuivamassakilogramman arvo nousee. Pitkälle

jalostettujen mikrolevätuotteiden kaupallinen arvo on yhteensä useita kymmeniä miljardeja euroja maailmanlaajuisesti. Jalostusprosessien laajuutta kasvattamalla nousevat myös reaktorin kustannukset. Mikäli jalostamistoiminta suoritettaisiin reaktorin yhteydessä, olisivat sen kustannukset pienemmät kuin jalostuksen suorittaminen pelkästään omana liiketoimintana. Reaktorin yhteydessä suoritettava jalostustoiminta olisi kannattavaa tehdä liitetyn tuotantolaitoksen ja reaktorin välisellä synteessillä, jolloin molempien laitosten energiatehokkuus paranisi. Lääketeollisuuden tarpeisiin jalostettavien lopputuotteiden jalostusprosessia reaktorin yhteyteen tuskin olisi kannattavaa rakentaa, mutta kuivausprosessien ja mahdollisten öljynerotusprosessien liittäminen reaktorin yhteyteen olisi mahdollista laitossynteesin avulla.

Laitosten ja reaktorien välistä synteesiä tulisi tulevaisuudessa tarkastella laitoskohtaisesti, aloittamalla potentiaalisista isäntälaitoksista, kuten biotuotetehtaista, joissa on valmiina useita erilaisia osaprosesseja ja myös useita eri toimijoita ja liiketoimintalaitosintegraatin yhteydessä. Tulevaisuudessa olisi myös selvitettävä paikallisten jalostustoimijoiden, kuten polttoaine- elintarvike- ja lääketeollisuuden toimintaa ja kiinnostusta hyödyntää ABF-reaktorin tuottamaa biomassaa niiden omassa liiketoiminnassa. ABF-reaktorit tuottaisivat vuosittain useita tonneja mikroleväbiomassaa ja jalostus-, sekä puhdistusprosesseista riippuen niiden soveltuvuus jatkokäytöstä eri teollisuuden aloille tulisi selvittää mahdollisen suuremman kokoluokan pilottihankkeella, joka rakennettaisiin käytössä olevan isäntälaitoksen yhteyteen. Tutkittavana asiana tulevaisuudessa on myös isäntälaitosorganisaatioiden halu sitoutua reaktorin käyttöön omistamallaan laitosalueella niiden omia resursseja hyödyntäen. Tämä parantaisi mahdollisuuksia luoda laitoksen ja reaktorin prosessien toiminnan synteesiä.

ABF-reaktorin toimintaa tutkittiin tässä projektissa *Nannochloropsis Oculata* mikrolevää käyttämällä, mutta teknologia soveltuisi myös muiden taloudellisesti merkittävien mikrolevien kasvatukseen. Spirulinan kasvatukseen ABF-reaktori ei sovellu mediumin sekoitustavasta johtuen, mutta se sopii hyvin solurakenteeltaan yksinkertaisempien mikrolevien, kuten *Chlorella*-lajikkeiden ja muiden lähes ympyrän muotoisten lajikkeiden ympärivuotiseen kasvatukseen.

Lähteet

\$4.6 Billion Worldwide Microalgae Industry to 2027 – Impact of Covid-19 on the Market. 2020. Research and Markets. Intarado GlobeNewsWire. Viitattu 09.05.2021.

<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/09/18/2095854/28124/en/4-6-Billion-Worldwide-Microalgae-Industry-to-2027-Impact-of-COVID-19-on-the-Market.html>.

Arenas, F. & Vaz-Pinto, F. 2014. Marine Algae as Carbon Sinks and Allies to Combat Global Warming, 178-182. ResearchGate. Viitattu 07.05.2021. [https://www.researchgate.net/publication/268331728 Marine Algae as Carbon Sinks and Allies to Combat Global Warming](https://www.researchgate.net/publication/268331728_Marine_Algae_as_Carbon_Sinks_and_Allies_to_Combat_Global_Warming).

Barkia, I., Saari, N. & Manning, S.R. 2019. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. marine drugs 17, 304, 2-13. MDPI. Viitattu 09.05.2021. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6562505/pdf/marinedrugs-17-00304.pdf>.

Carbon Dioxide. 2021. Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. NASA. Viitattu 30.04.2021. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>.

Carlsson, A.S., Beilen, J.B., Möller, R. & Clayton D. 2007. MICRO- AND MACRO-ALGAE: UTILITY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS, EPOBIO Aquatic Report 10-15. European Technology and Innovation Platform. Viitattu 09.05.2021. https://www.etipbioenergy.eu/images/epobio_aquatic_report.pdf.

Carvalho, A.P., Meireles, L.A. & Malcata, F.X. 2006. Microalgal reactors: a review of enclosed system design and performance. Biotechnology Progress 22, 6, 1490-1497. Europe PMC. Viitattu. 04.05.2021. <https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/6717/5/Microalgal%20Reactors%20Review%20of%20Enclosed%20System%20Designs%20and%20Performances.PDF>.

CGD ranks CO2 emissions from power plants worldwide. 2007. Center for Global Development. EurekAlert!. Viitattu 04.05.2021. https://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-11/cfgd-crc111207.php.

Climate Impacts on Agriculture and Food Supply. 2016. Climate Change Impacts. EPA, United States Environmental Protection Agency. Viitattu 30.04.2021. <https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-impacts/climate-impacts-agriculture-and-food-supply.html>.

Emissions Gap Report 2020. United Nations environment programme. Viitattu 30.03.2021. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>.

- Entisen Itä-Suomen ympäristölupaviraston ympäristölupapäätökset 2009. 2013. Aluehallintovirasto. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Viitattu 04.05.2021. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_ItaSuomen_ymparistolupaviraston_\(26420\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_ItaSuomen_ymparistolupaviraston_(26420)).
- Evans P. 2015. Properties of carbon dioxide at atmospheric pressure. The engineering mindset 30.03.2015. Viitattu 15.04.2021. <https://theengineeringmindset.com/properties-of-carbon-dioxide-at-atmospheric-pressure/>.
- Fernández, F.G.A., Gómez-Serrano, C. & Fernández-Sevilla, J.M. 2018. Recovery of Nutrients From Wastewaters Using Microalgae. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2, 59. Viitattu 25.04.2021. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2018.00059/full>.
- Gendy, T. S., Seham, A. & El-Temtamy. 2013. Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: An overview. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22, 44. Viitattu 09.04.2021. <https://www.sciencedirect.com/journal/egyptian-journal-of-petroleum>.
- Gibbs, M.J., Soyka, P. & Conneely, D. 2000. CO₂ EMISSIONS FROM CEMENT PRODUCTION. Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 176. Viitattu 05.05.2021. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_1_Cement_Production.pdf.
- Global CO₂ emissions in 2019. 2020. IEA. Kansainvälinen Energiajärjestö. Viitattu 10.03.2021. <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>.
- Glossary: Carbon dioxide equivalent. 2017. Eurostat, Euroopan komissio. Viitattu 23.02.2021. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Carbon_dioxide_equivalent.
- González- González, L.M. & de-Bashan, L. 2021. Toward the Enhancement of Microalgal Metabolite Production through Microalgae-Bacteria Consortia. *MDPI, Biology* 2021 10, 282, 1-3. Viitattu 25.04.2021. <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/4/282>.
- Gujar, A., Cui, H., Ji, C., Kubar, S. & Li, R. 2019. Development, Production and Market Value of Microalgae Products. *Appli Microbiol Open Access* 5, 2, 3-6. Longdom Publishing SL. Viitattu 09.05.2021. <https://www.longdom.org/open-access/development-production-and-market-value-of-microalgae-products.pdf>.

Hillintä: Maailman kasvihuonepäästöt kasvavat yhä. 2020. Ilmasto-opas. Viitattu 23.02.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/42433dde-827f-485e-9fa9-45b49fbfa317/maailman-kasvihuonekaasupaastot-kasvavat-yha.html>.

Iron and Steel. 2020. IEA. Kansainvälinen Energiajärjestö. Viitattu 05.05.2021. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>.

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu 111. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2013. Case-tutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu 143. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Karnauskas, K.B., Miller, S.L. & Schapiro, A.C. 2020. Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO₂ Toward Levels Harmful to Human Cognition. *GeoHealth* 4, 5, 1. AGU, Advancing Earth and Space Science. Viitattu. 02.05.2021. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019GH000237>.

Khan, M.I., Shin, J. H. & Kim, J.D. 2018. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry of biofuels, feed, and other products. *Microbial cell factories* 17, 36. Viitattu 09.03.2021. <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-018-0879-x#rightslink>.

Laitoskohtaisen todennetut päästöt [t CO₂] vuosilta 2013–2020. 2020. Päästökaupan julkaisut. Energiavirasto. Viitattu 04.05.2021. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/68290104/Laitoskohtaiset+tiedot+vuosien+2013-2020+p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf/2d5e042c-7504-4f34-1905-3f9458abbf65/Laitoskohtaiset+tiedot+vuosien+2013-2020+p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf?t=1617281703985>.

Laukkanen, M. 2020. Energian tuotantoon ja energian käyttöön liittyvät yritystuet. Yritystutkimusjaosto. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 08.05.2021. <https://tem.fi/documents/1410877/21733658/Energian+tuotantoon+ja+energian+k%C3%A4ytt%C3%B6n+liittyv%C3%A4t+yritystuet/53d9a4bf-faa5-e06b-c9f9-2e3100cab1f7/Energian+tuotantoon+ja+energian+k%C3%A4ytt%C3%B6n+liittyv%C3%A4t+yritystuet.pdf>.

Liu, P.R. & Raftery, A.E. 2021. Country-based rate of emissions reduction should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet 2°C target. *Communications Earth & Environment* 2, 29, 1. Viitattu. 30.04.2021. <https://www.nature.com/articles/s43247-021-00097-8.pdf>.

Lämmityspotentiaali. 2014. Tieteen termipankki. Viitattu 23.02.2021. <https://tieteen-termipankki.fi/wiki/Geofysiikka:l%C3%A4mmityspotentiaali>.

- Mathiesen, L. & Maestad, O. 2004. Climate Policy and the Steel Industry: Achieving Global Emissions Reduction by an Incomplete Climate Agreement. *The Energy Journal* 25, 4, 1-4. Viitattu 05.05.2021. https://www.researchgate.net/publication/227363574_Climate_Policy_and_the_Steel_Industry_Achieving_Global_Emission_Reductions_by_an_Incomplete_Climate_Agreement.
- Mikropopulaation kasvuvaiheet. 2006. Solunetti. Viitattu 08.04.2021. https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/mikrobipopulation_kasvuvaiheet/3/.
- Mourelle, M.L., Gómez, C.P. & Legido, J.L. 2017. Cosmetics from Marine Sources. The Potential Use of Marine Microalgae and Cyanobacteria in Cosmetics and Thalassotherapy 46, 1-2. Viitattu 25.04.2021. <https://www.mdpi.com/2079-9284/4/4/46>.
- Padro, N., Moya, J.A. & Vatopoulos, K. 2012. Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry: Re-edition. Publications Office of the European Union, 7. Viitattu 05.05.2021. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC74811>.
- Solubility of Gases in Water. 2008. Engineering ToolBox. Viitattu 16.04.2021. https://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html.
- Stips, A., Macias, D., Coughlan, C., Garcia-Gorritz, E. & Liang, X.S. 2016. On the causal structure between CO₂ and global temperature. *Scientific Reports* 6, 21691, 4-5. Viitattu. 30.04.2021. <https://www.nature.com/articles/srep21691.pdf>.
- Suomen kasvihuonekaasupäästöt. 2020. Tilastokeskus. Viitattu 24.02.2021. https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki_2019_2020-05-28_kat_001_fi.html.
- Taichung Coal-Fired Power Plant. N.d. Power Technology. Viitattu 04.05.2021. <https://www.power-technology.com/projects/taichung/>.
- The Causes of Climate Change. N.d. Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. NASA. Viitattu 30.04.2021. <https://climate.nasa.gov/causes/>.
- Timperley, J. 2018. Q&A: Why cement emissions matter for climate change. Carbon-Brief. Viitattu 05.05.2021. <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change>.

Liitteet

Liite 1. Hiilidioksidin osuus savukaasuista

Hiilidioksidin osuus savukaasuista ja kaasuuntuvasta polttoaineesta laskentataulukko. Hiilidioksidin osuuden laskennassa käytetty savukaasuanalysointilaitteiden antamia arvoja ja käytettyjen Vapon puupellettien laatukriteeritaulukkoa

Päivämäärä	Polttoaineen kosteusprosentti	Polttoaineen kulutus kg	Kuivan polttoaineen osuus kg	Tuhka	Raskasmetallit	Kaasuuntuva polttoaine kg
21.loka	10 %	24,06	21,65	0,7 %	14,1 %	18,45
22.loka	10 %	34,32	30,89	0,7 %	14,1 %	26,32
23.loka	10 %	34,03	30,63	0,7 %	14,1 %	26,09
26.loka	10 %	22,64	20,38	0,7 %	14,1 %	17,36

Päivämäärä	Testo 350, CO2 osuus savukaasuista %	Kaasuuntuva polttoaine kg	Hiilidioksidin osuus savukaasuista kg
21.loka	5,08 %	18,45	0,94
22.loka	10,74 %	26,32	2,83
23.loka	11,40 %	26,09	2,98
26.loka	13,38 %	17,36	2,32
yht.			9,06 kg

Päivämäärä	Servomex 4900 CO2 osuus savukaasuista %	Kaasuuntuva polttoaine kg	Hiilidioksidin osuus savukaasuista kg
21.loka	4,68 %	18,45	0,86
22.loka	10,09 %	26,32	2,66
23.loka	10,48 %	26,09	2,73
26.loka	12,65 %	17,36	2,20
yht.			8,45 kg

Päivämäärä	Järjestelmään jäänyt hiilidioksidi kg
21.loka	0,0738
22.loka	0,1711
23.loka	0,2409
26.loka	0,1267
yht.	0,6124 kg

Liite 2. Näytteiden hehkutuskokeen tulokset

Standardi SFS-EN 3006:1990
 Kuivausämpötila
 Hehkutusämpötila 550 °C

Näyteotto pvm	Näyte	analyysipvm	Astia	Kuiva-ainepitoisuus			Hehkutusjäännös		
				m ₁ g	m ₂ g	V ml	m ₃ g	Y ₁ g/l	
21.10.2020	Levä emmen testinä	16.-17.12.2020	C	74,1638	75,1339	79,0	75,1081	11,95316	
			E	81,3758	82,7749	94,0	82,4962	11,91915	
21.11.2020	Levä testin jälkeen	16.-17.12.2020	F	88,2913	89,2756	80,5	89,2449	11,84596	
			G	89,2856	90,2656	79,0	90,2204	11,83291	
			D	72,4534	73,4586	82,5	73,4349	11,89697	

hyväty, mahdollinen epäpuhtaus näytteessä

Tulokset:	emmen testinä	testin jälkeen	Muutos
Kuiva-aine (g/l)	12,280	12,272	0,0
Hehkutusjäännös (g/l)	11,936	11,859	0,1
VS, hehkutusjäätö (g/l)	0,344	0,414	-0,1

Ei kasvaa oli tapahtunut

Liite 3. Savukaasujen hiilidioksidigraafi 23.10.2020.