

## **Biokaasulaitokset biotuotetehtäiksi**

Case-tutkimuksena mikrolevän rejektivesikasvatusmahdollisuudet  
Suomen aluekohtaisen bio- ja kiertotalouden edistämiseksi

Anne Palmio

Opinnäytetyö

Joulukuu 2018

Luonnonvara- ja ympäristöala

Agrologi (YAMK), Biototalouden kehittämisen tutkinto-ohjelma

Tekijä Palmio, Anne	Julkaisun laji Opinnäytetyö, ylempi AMK	Päivämäärä Joulukuu 2018
		Julkaisun kieli Suomi
	Sivumäärä 69	Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Biokaasulaitokset biotuotetehtäiksi</b> Case-tutkimuksena mikrolevän rejektivesikasvatusmahdollisuudet Suomen aluekohtaisen bio- ja kiertotalouden edistämiseksi		
Tutkinto-ohjelma Agrologi (JAMK), Biotalouskehittämisen tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaajat Vertainen, Laura (JAMK) & Honkanen, Hannariina (JAMK)		
Toimeksiantajat Stenman Tarja (JAMK)		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena oli tutkia teoreettisesti mikrolevän kasvatusmahdollisuuksia opinnäytetyön kohteena olleen tehtaan biokaasuprosessista johdetussa rejektivedessä sekä kasvatuksen tuottamia vaatimuksia ja mahdollisuuksia suomalaiselle biokaasulaitosympristölle. Tilaajana oli Jyväskylän ammattikorkeakoulu, sekä konsultoivana tahona Baltic Blue Bio Alliancen Interreg -hankkeessa mukana ollut SYKE Merikeskus. Hanke pyrkii parantamaan Itämeren hyvinvointia muun muassa ravinnekiertoa kehittämällä.</p> <p>Esimerkkinä käytettiin <i>Euglena gracilis</i> -mikrolevälajia, Keski-Suomen vuotuista auringonvalodataa sekä yhden biokaasulaitoksen rejektivesianalyysijä. Kasvuolosuhdevaatimuksia tutkittiin Suomen ympäristökeskuksen mallinnuskaavojen avulla hyödyntäen muun muassa auringonvalo- ja ravinnedataa. Lisäksi tutkittiin kirjallisuutta sekä asiantuntijaesityksiä.</p> <p>Tutkimusaiheina mikrolevän potentiaalinn kartoittamiseksi olivat mikrolevän yleiset kasvatusvaatimukset, lietteitä käsittelevän biokaasulaitoksen rejektiveden soveltuvuus leväkasvatukseen, kasvatusprosessin vaatimukset tehtaalle, <i>Euglena gracilis</i> -lajin soveltuvuus rejektivesikasvatukseen, sekä kasvatuksessa tarvittavat valolähteet ja -määrät.</p> <p>Tulokset viittaavat siihen, että mahdollisuuksia rejektivesikasvatukseen voi olla, jos lopputuotteen arvo on riittävän korkea, löydetään tai muokataan sopiva mikrolevälaji, tai luodaan systeemisen muutoksen kautta suurempia infrastruktuureja ja biotuotetehtaita tukemaan mikroleväkasvatusta. Monitieteinen tutkimus, yritysten, tutkimuslaitosten ja maiden välinen yhteistyö määrittänevät sen, miten lopulta onnistutaan.</p>		
<p>Avainsanat (<a href="#">asiasanat</a>) Mikrolevä, jätevesi, rejektivesi, typpi, fosfori, ravinnekierto, kiertotalous, biotalous, <i>Euglena gracilis</i>, biomassa, biokaasulaitos, biotuotetehtas, Itämeri, rehevöityminen, vihreä talous, leväkasvatus, systeeminen muutos</p>		

Author Palmio, Anne	Type of publication Master's thesis	Date December 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 69	Permission for web publication: X
Title of publication <b>Biogas Plants to Bioproduct Plants</b> Case study of the microalgal reject water cultivation possibilities in Finland in order to promote regional bioeconomy and circular economy		
Degree programme Master of Natural Resources, Degree Programme in Bioeconomy Development		
Supervisor(s) Vertainen, Laura (JAMK) & Honkanen, Hannariina (JAMK)		
Assigned by Stenman, Tarja (JAMK)		
Abstract <p>The goal was to conduct a theoretical case study concerning the cultivation possibilities of microalgae in the reject water derived from a biogas process of a specific biogas plant as well as the demands and the potential of algal cultivation for the Finnish biogas plant environment. The client was JAMK University of Applied Sciences, and the consulting organization was SYKE Marine Research Center taking part in the Baltic Blue Bio Alliance Interreg project. The project aims to improve the well-being of the Baltic Sea by developing the nutrient cycle.</p> <p><i>Euglena gracilis</i> microalgae, yearly solar irradiance data of Central Finland as well as the reject water analyses of a specific biogas plant were used as case examples. The cultivation demands were studied by using modeling algorithms of the Finnish Environment Institute and utilizing solar irradiance and nutrient data. In addition, literature and expert presentations were studied.</p> <p>The themes of research investigating the potential of microalgae, questions used were related to general microalgal cultivation requirements, cultivation compatibility of the reject water from a biogas plant digesting sludge, requirements of the cultivation process for the biogas plant, suitability of <i>Euglena gracilis</i> to reject water cultivation, and required light sources and quantities.</p> <p>The results indicate that reject water-based cultivation has potential, if the end-product is valuable enough, a suitable microalgal species is found or modified, or larger infrastructures and bioproduct plants are created through systemic change to support microalgal cultivation. In the end, it is most likely multi-disciplinary research and co-operation between companies, research organizations and countries that will define the level of success.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) Microalgae, waste water, reject water, nitrogen, phosphorus, nutrient cycle, circular economy, bioeconomy, <i>Euglena gracilis</i> , biomass, biogas plant, bioproduct plant, Baltic Sea, eutrophication, green economy, algal cultivation, systemic change		

## Sisältö

<b>Käsitteet .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Bio- ja kiertotalouden innovaatiopotentiali testiin .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Teoreettinen tausta: Energia- ja ympäristöhaasteista kohti ratkaisuja .....</b>	<b>9</b>
2.1 Haasteista hallittuun kestävään kehitykseen.....	9
2.1.1 Globaaleja toimintasuunnitelmia .....	9
2.1.2 EU:n koheesio politiikan vaikutus.....	12
2.1.3 Energiantuotanto fossiilisesta biogeeniseen hiilenkiertoon .....	14
2.1.4 Biotaloudella luonnonvarojen viisaampaa käyttöä.....	16
2.1.5 Kiertotaloudella materiaalit virtaamaan .....	20
2.2 Case-sovellukset tarkastelussa.....	24
2.2.1 Biokaasutuotannolla kohti hajautettua hyvinvointia .....	24
2.2.2 Mikroleväkasvatuksella kohti biotuotetehdasta .....	34
<b>3 Tutkimusmenetelmät .....</b>	<b>44</b>
3.1 Tutkimuksen tausta ja tarve .....	44
3.2 Tutkimuskysymykset .....	44
3.3 Tutkimusalue ja poisrajaukset.....	45
3.4 Tutkimusajanjakso.....	46
3.5 Tutkimusaineisto .....	46
3.5.1 Aineiston kerääminen.....	46
3.5.2 Aineiston käsittely .....	47
<b>4 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu .....</b>	<b>51</b>
4.1 Analysoidun rejektiveden soveltuvuus mikroleväkasvatukseen.....	51
4.1.1 Rejektiveden stabilisuus .....	51
4.1.2 Vuosittaisen levä tuotannon arviointi .....	54

4.2	<i>Euglena gracilis</i> -mikrolevän soveltuvuus reaktivesikasvatukseen.....	57
4.3	Mikrolevän reaktivesikasvatuksen vaatimukset .....	58
4.3.1	Kannattavuusvaatimukset .....	58
4.3.2	Teknologiavaatimukset.....	59
4.3.3	Ekologisen kehityksen vaatimukset.....	60
4.3.4	Yhteiskunnan kehittymisen vaatimukset .....	60
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>67</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>70</b>

## Kuviot

Kuvio 1. Neljä päästöjenvähennyspolkua hiilineutraalisuuteen (IPCC 2018, 16.) .....	10
Kuvio 2. Yleiskatsaus OECD:n kestävän tuotannon indikaattoreista (OECD 2012, 8)..	11
Kuvio 3. Valtion aluehallinnon virastojen toiminnan viitekehys 2016-2019 (VM & TEM 2015, 3).....	14
Kuvio 4. Muutos fossiilisesta hiilenkierrosta biogeeniseen (Harlin, Grönqvist, Järnefelt, Jääskeläinen, Kiiskinen, Kangas, Orelma, Paunonen, Ropponen, Sandquist & Tammelin 2018, 10).....	15
Kuvio 5. Biotalouspolitiikan tilanne maailmassa (Bioökonomierat 2018, 9.) .....	16
Kuvio 6. Biotalouspolitiikan määrittely visualisoituna (Bioökonomierat 2018, 9.) .....	17
Kuvio 7. Viisi kiertotalousmallia poistamaan lineaarista tehottomuutta sekä tuomaan yrityksille taloudellista kehitystä (Accenture Strategy lähteessä Reponen 2018, 7.)..	20
Kuvio 8. Työvoiman jakaantuminen alkutuotantoon, teollisuuteen ja palveluihin Suomessa 1860–2012 ja ennuste vuoteen 2030. (Tiainen lähteessä Hoffrén 2014, 162.).....	21
Kuvio 9. Näkökulmia ravinnekiertoa edistävään muutokseen (Gaia Consulting 2015 lähteessä Sitra 2015, 42). .....	22
Kuvio 10. Osoitus kuvasta ”Ravinnekierron ideoita tiekarttatyöhön osallistuneilta” (Gaia Consulting 2015 lähteessä Sitra 2015, 41.) .....	23
Kuvio 11. Pääasialliset ympäristöhaitat erityyppisten ympäristöjätteiden käsittelyvaihtoehdoista (DEFRA 2011 lähteessä Saveyn & Eder 2014, 74) .....	24
Kuvio 12. Biokaasusta saatu energiatuotanto Euroopan Unionin alueella vuoden 2016 lopulla yksikössä 1 ktoe = 11630000 kWh (EurObserv’ER 2017, 7). .....	27
Kuvio 13. Biokaasuprosessi (Kinnunen & Rintala 2015, 10.).....	28
Kuvio 14. Biokaasulaitoksilla tuotettu ja hyödynnetty biokaasu vuosina 1994-2016 (Huttunen & Kuittinen 2017, 19). .....	29
Kuvio 15. Biokaasutuotanto laitostyypeittäin Suomessa (Huttunen & Kuittinen 2017, 19.).....	30
Kuvio 16. Esimerkki reaktiivisuustyypien typpi- ja fosforipitoisuuksista sekä massaan perustuva N:P-suhde (Paavola & Kapuinen 2015, 100). .....	32
Kuvio 17. Reaktiiviveden 15 tunnin ammoniakkipitoisuus lämpötilassa 60 °C (Merin 2016, 81).....	33

Kuvio 18. Mikrolevätuotanto kaksivaiheisella prosessilla (Han ym. 2018, 2).....	37
Kuvio 19. Biojalostamokonsepti (U.S. DOE 2010, 61) .....	38
Kuvio 20. Mikroleväkasvatuksen hyödyntämismahdollisuudet biojalostamossa (Giraldo-Calderón, Romo-Buchelly, Arbeláez-Pérez, Echeverri-Hincapié & Atehortúa- Garcés 2018, 220.).....	39
Kuvio 21. <i>Euglena gracilis</i> suhteessa sekvensoituihin leviin ja malliorganismeihin. Organismit vihreällä värillä ovat fotosynteettisiä. (O’Neill, Trick, Hill, Rejzek, Dusi, Hamilton, Zimba, Henrissat & Field 2015, 2809.) .....	40
Kuvio 22. <i>Euglena gracilis</i> -mikrolevä (O’Neill ym. 2015, 2) .....	41
Kuvio 23. <i>E. gracilis</i> -levän muodon vaihtelut korreloivat biologisen kellon, fotosynteesin, soluhengityksen, solusyklin, sekä ympäristöolosuhteiden kanssa. (Li ym. 2017, s. 2) .....	42
Kuvio 24. Total solids (TS) eli rejektiveden kiintoainepitoisuus näytteenottoajan- jaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018).....	51
Kuvio 25. P-tot eli kokonaisfosforin määrä näytteenottoajanjaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018) .....	52
Kuvio 26. Kokonaistypen vaihtelu näytteenottoajanjaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018) .....	52
Kuvio 27. Auringonsäteilyn jakauma Keski-Suomessa verrattuna Espanjaan ja Saharaan.....	55
Kuvio 28. Levätuotantoskenaariot vuositasolla 1, 5, ja 11 % valon hyödyntämistehokkuuksilla. ....	56

## Taulukot

Taulukko 1. Kirjallisuusarvot mikroleväkasvatuksen paino- ja sisältösuhteille (Seppälä 2018, 3.).....	49
Taulukko 2. Kiintoaineen, kokonaisfosforin ja kokonaistypen korrelaatiovertailu. ....	53
Taulukko 3. Jyväskylän ammattikorkeakoulun suorittamat rejektivesianalyysit helmikuussa 2018.....	53
Taulukko 4. Case-tehtaan lähtötiedot sekä lasketut vuositasoiset määrät ja N:P-suhde .....	54
Taulukko 5. Teoreettinen leväbiomassatuontato case-tutkimuksen kohteen tehtaalla vuositasolla perustuen fosforin määrään ja vertailulaitokseen.....	55
Taulukko 6. Laskennallisen kesäkuukausina tapahtuvan keskisuomalaisen levätuotannon tarvitseman pinta-alan määrittäminen 1 % valon hyödyntämistehokkuudella.....	57
Taulukko 7. Mikrolevän rejektivesikasvatuksen SWOT-analyysi Suomen näkökulmasta .....	63



## Käsitteet

Anaerobinen mädätys	Prosessi, jossa orgaanista ainesta fermentoidaan hapettomissa olosuhteissa mikrobien avulla johtaen biologiseen hajoamisprosessiin. Lopputuotteena on mädäte, joka koostuu nesteestä, biokaasusta sekä kiinteästä fraktiosta.
Biokaasu	Kaasusekoitus, joka on syntynyt hapettomissa olosuhteissa orgaanisen aineen fermentaatiossa. Biokaasu koostuu pääasiassa metaanista (CH <sub>4</sub> ) ja hiilidioksidista (CO <sub>2</sub> ) sekä pienistä määristä muita kaasuja, kuten rikkivetyä (H <sub>2</sub> S) ja ammoniakia (NH <sub>3</sub> ).
CHP	Combined heat and power. Mekaanisen ja lämpöenergian tuotanto yhdestä lähteestä yhdellä systeemillä, joissa on yleensä voimalaite, generaattori, lämmöntalteenottojärjestelmä, sekä sähköverkkojen yhteenkytkennät.
COD	Chemical oxygen demand eli kemiallinen hapenkulutus.
<i>Euglena gracilis</i>	Silmäleviin kuuluva mikrolevä, ja aitotumallinen yksisolainen organismi, joka on sekä autotrofi että heterotrofi. Monien ominaisuuksiensa ja kestävyytensä vuoksi todettu potentiaaliseksi mm. teollisuuskäyttöön.
Fosfaatti (PO <sub>4</sub> )	Fosforihapon suola, jota leväsolut käyttävät ravinteenaan.
Koheesiopolitiikka	Taloudellisia ja sosiaalisia tarpeita yhdistävä Euroopan Unionin poliittinen menetelmä, jossa painotetaan alueellisia kehitystavoitteita.
Hydrolyysi	Kemiallinen reaktio, jossa yhdiste hajoaa lähtöaineikseen vettä lisättäessä.
KTOE	Thousand tonnes of oil equivalent -energiayksikkö eli ekvivalenttinen öljytonni, jossa 1 ktoe = 11630000 kWh.
Metaani (CH <sub>4</sub> )	Helposti syttyvä ja räjähdysherkkä väritön ja hajuton kaasu, joka muodostaa suurimman osan maakaasusta sekä hapettomassa mädätyksessä syntyvästä kaasuseoksesta.
Mikrolevä	Moninainen joukko pieniä yksisoluisia organismeja, joista suurin osa on fotosynteettisiä, yhteyttäviä lajeja, mutta osa sekä auto- että heterotrofeja, kuten <i>Euglena gracilis</i> . Mikrolevät voivat olla joko esi- tai aitotumallisia ja niiden muoto vaihtelee huomattavasti.

N:P	Typen ja fosforin suhde, jonka esimerkiksi massasuhteena meressä on todettu leväkasvulle olevan 6,8 (Redfield-suhde).
Paramylon	Hiilihydraatti ja polysakkaridi, jota muodostuu <i>Euglenan</i> klorofyllien kautta ja joka varastoituu lääketieteelle arvokkaaksi katsottuna aineena, paramylonina.
Rejektivesi	Nesteosa, joka syntyy mädätysjäännöksen mekaanisesta kuivatuksesta.
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	Myrkyllinen ja väritön kaasu, jonka haju muistuttaa mädäntyneitä kananmunia. Rikkivedyllä on erittäin haitallinen ja kuluttava vaikutus mädättämön kaasujenkäsittelylaitteistolle.
Systeeminen muutos	Prosessi, jossa pyritään muokkaamaan hallinnollisia, lainsäädännöllisiä ja liiketoiminnallisia päätöksiä pitkäjänteisesti kohti yhteisiä päämääriä.
TOC	Total organic carbon eli orgaanisen hiilen kokonaismäärä.
Yhdyskuntajäte	Asumisessa syntyvä sekä teollisuuden, kaupan ja palvelutoiminnan sellainen jäte, joka voidaan rinnastaa asumisessa syntyvään jätteeseen.
Yhteismädätys	Kahden tai useamman raaka-aineen yhteiskäsittely biokaasulaitoksella.

## 1 Bio- ja kiertotalouden innovaatiopotentiali testiin

Energiantarve, fossiilisten polttoaineiden käyttö ja siitä aiheutuva ilmastonmuutos on vuosikymmeniä kuulunut ihmiskunnan haasteisiin, kuten myös eri syistä johtuva ravinteiden valuminen maaperästä vesistöihin. Uusiutuvia luonnonvaroja kestävästi hyödyntävä biotalous on yksi tärkeä keino näiden haasteiden ehkäisemisessä ja kiertotalous tuo tehokkuutta lähes kaiken materiaalin hyödyntämisen osalta. Meneillään onkin useita tutkimusprojekteja bio- ja kiertotalouden edistämiseksi sekä kestäväan luonnonvarojen käyttöön. Näitä tarvitaan niin ympäristönsuojelua kuin teollisen tuotannon kestävyttä ja kannattavuutta ajatellen.

Työ keskittyy bio- ja kiertotalouden potentiaalisten sovellusten mahdollistamiseen sekä case-esimerkin omaisesti erityisesti rejektivesikasvatettuun mikrolevään tarkastellen mikrolevän kasvatusmahdollisuuksia suomalaisessa biokaasulaitosympäristössä. Työn tavoitteena on samalla peilata mikroleväkasvatusta bio- ja kiertotalouteen yleisemmin ja edesauttaa vastaavien prosessien mahdollistamista. Työllä pyritään yleisesti ottaen myös lisäämään ymmärrystä bio- ja kiertotaloudesta, biotuoteteollisuudesta sekä vaatimuksista kestäväan teollisuuden suhteen.

Työ tehtiin Jyväskylän ammattikorkeakoululle muun muassa Itämeren hyvinvointia kehittäväan Baltic Blue Bio Alliance Interreg -hankkeen (<https://projects.interreg-baltic.eu/projects/alliance-13.html>) innoittamana. Sekä hanke että SYKE Merikeskus mentoroivat Jyväskylän ammattikorkeakoulua, ja SYKE Merikeskus tarjosi apua myös tämän työn osalta mikrolevän kasvupotentiaalain mallinnusmenetelmiin sekä työn kommentointiin.

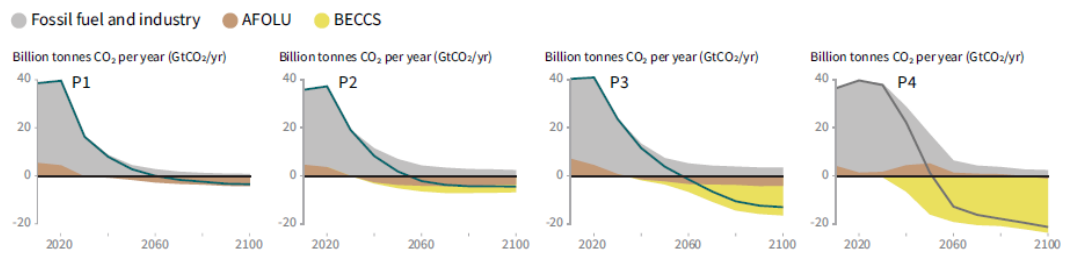
## 2 Teoreettinen tausta: Energia- ja ympäristöhaasteista kohti ratkaisuja

### 2.1 Haasteista hallittuun kestäväan kehitykseen

#### 2.1.1 Globaaleja toimintasuunnitelmia

Väestönkasvu, energiantarve ja luonnonvarojen hupeneminen aiheuttavat erilaisia haasteita. Näiden ja muiden isojen haasteiden ratkaisemiseksi YK on tehnyt maailmanlaajuisen toimintasuunnitelman jäsenmailleen globaaln hyvinvoinnin ja rauhan saavuttamiseksi. Suunnitelmassa on 17 kestäväan kehityksen ylätasoa tavoitetta sekä 169 kohdennettumpaa tavoitetta, joilla tavoitellaan kestäväa taloudellista, yhteiskunnallista sekä ekologista kehitystä. Ylätasoa tavoitteiden kautta on esimerkiksi tarkoitus poistaa köyhyys ja nälänhätä sekä varmistaa ruokaturva ja ruuan ravitsemuksellisuus, taata terveellinen elämä ja hyvinvointi kaikissa ikäluokissa sekä mahdollistaa jatkuva oppiminen. Kestäväan energian ja puhtaan veden saatavuus kaikille on myös tärkeässä roolissa, kuten myös ilmastonmuutoksen torjuminen. Ilmastokestävä infrastruktuuri, kestäväan ja innovatiivisen teollisuuden kehittäminen sekä kestävä taloudellinen kasvu ovat myös tärkeitä päämääriä, kuten myös maiden tasa-arvon edistäminen. Vesistöjen ja maaekosysteemien suojele sekä niiden kestäväan käytön edistäminen ovat myös osana toimintasuunnitelmaa. Lisäksi YK pyrkii edistämään rauhanomaisia ja monimuotoisuutta tukevia yhteisöjä sekä edistää toimeenpanokeinoja sekä yhteistyötä. Nämä tavoitteet tarkempien suunnitelmien kanssa toimivat ohjeina kaikkien YKn jäsenmaiden maakohtaisille kehityshankkeille. (UN 2015.)

IPCC eli Intergovernmental Panel on Climate Change perustettiin 80-luvulla WMO:n ja YKn toimesta tarkastelemaan ilmastonmuutokseen liittyväa tiedettä sekä tuottamaan säännöllisiä tilanneraportteja ja toimenpide-ehtouksia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi (IPCC 2013, 1). Viimeisimmässä päätöksentekijöille suunnatussa raportissaan IPCC listaa neljä globaalaa päästövähennyspolkua siihen, että hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää riittävästi ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi 1,5 Celsius-asteeseen (IPCC 2018, 16).



Kuvio 1. Neljä päästövähennyspolkua hiilineutraalisuuteen (IPCC 2018, 16.)

Kuviossa 1 vertaillaan kolmea tekijää; fossiiliset polttoaineet ja teollisuus (harmaa), maa- ja metsätalous sekä muu maankäyttö (ruskea) ja kolmantena hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (keltainen). Kaksi ensimmäistä nojautuvat kokonaisvaltaiseen ekologiseen ja yhteiskunnalliseen kestäväan kehitykseen, kun taas kaksi jälkimmäistä keskittyvät lähinnä teknologiseen kehitykseen, hiilensidontaan ja -varastointiin. (IPCC 2018, 16.).

Kun polkuja vertaillaan YKn kestävan kehityksen tavoitteisiin (SDG), kaikki vaihtoehdot vaativat kompromisseja energiantuotannon, energiatarpeen ja maankäytön suhteen, mutta myös positiivisia vaikutuksia löytyy. Eritoten energiatarpeen suhteen näitä voi olla useita, kuten esimerkiksi köyhyyden väheneminen, terveyden parantuminen, puhtaan ja kustannustehokkaan energian lisääntyminen, puhtaiden vesistöjen lisääntyminen sekä kaupunkien ja yhteisöjen kestävyden lisääntyminen. (IPCC 2018, 22.)

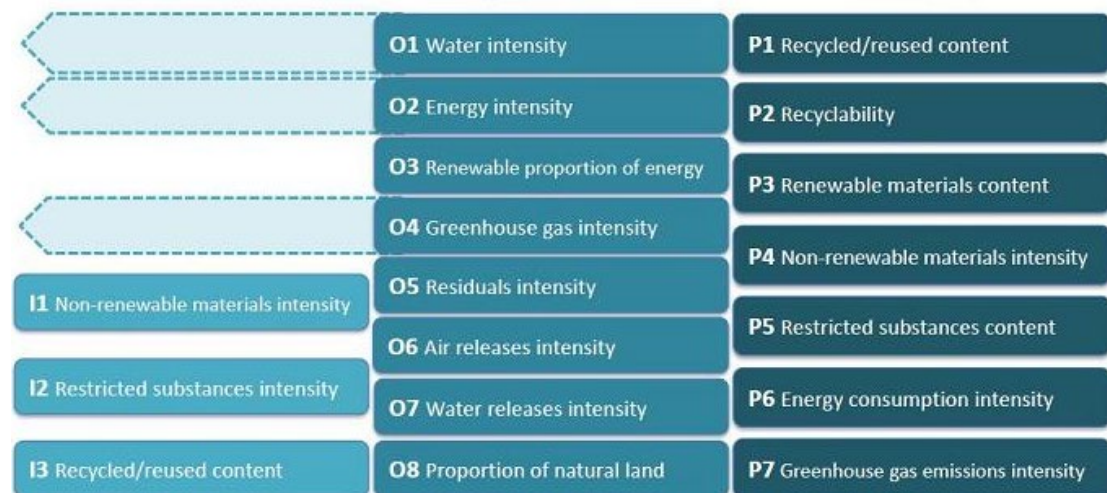
OECD, the Organisation for Economic Co-operation and Development tukee ihmisten taloudellista ja sosiaalista hyvinvointia maailmanlaajuisesti maiden hallitusten kautta. OECD tuo muun muassa IPCC:n päästövähennyspolut konkreettisemmalle tasolle listaten kuusi muutosaluetta, joiden avulla rahoitus voidaan yhdenmukaistaa ilmasto- ja kehitystavoitteiden kanssa:

- infrastruktuurin suunnittelu joustavasti hallintoelimien jokaisella tasolla suunnittelun uudistamisen kautta, jotta nykyiset infrastruktuuriprojektisuunnitelmat voidaan yhdistää pitkän aikavälin ilmasto- ja kehitystavoitteiden kanssa
- kaikkia hyödyttävien innovaatioiden mahdollistaminen soveltuvien liiketoimintamallien avulla

- monimuotoisten valtiontulojen lähteiden varmistaminen hiilisdonnaisuuden vähentämiseksi
- rahoitusjärjestelmän yhtenäistäminen pitkän aikavälin ilmatoriskien ja mahdollisuuksien kanssa korjaamalla puolueelliset kannustimet, kyvykköysaukot, riittämättömät ilmatoriskeihin liittyvät tiedonannot ja hinnoittelun, joka estää rahoituksen matalapäästöiseen infrastruktuuriin
- ilmatorahoituksen uudelleensuunnittelu varmistaen, että kehitysrahoituslaitosten resurssit, toimeenpanovaltuudet ja insentiivit tukevat muutostaedistävää ilmastotoimintaa, houkuttelevat uusia sijoittajia ja rahoituslähteitä pehmeäehtoisten rahoitusstrategioiden kautta auttaen maita rakentamaan ”ilmastomarkkinoita”
- kaupunginhallitusten mahdollistaminen rakentaa matalapäästöisiä ja joustavia kaupunkiyhteisöjä yhtenäistämällä kansalliset ja paikalliset säädökset sijoitustarpeiden kanssa rakentaen ilmastoon liittyvää ja projektirahoituskapasiteettia kaupunkitasolla.

(OECD 2018, 16.)

OECD on myös luonut indikaattoreita yksittäisille yrityksille kestävän tuotannon varmistamiseksi sisältyen seitsemän askeleen ohjeoppaaseen (OECD 2012).



Kuvio 2. Yleiskatsaus OECD:n kestävän tuotannon indikaattoreista (OECD 2012, 8)

Indikaattorit (Kuvio 2.) ottavat laajasti huomioon erilaisia näkökohtia veteen, energiaan, päästöihin ja luonnonvarojen käyttöön liittyen. Opas antaa käyttöön myös konkreettisen 24 datayksikön datalaskentamallin (OECD 2012, 50), jonka avulla yritykset voivat helpottaa työtänsä kestävän tuotannon saavuttamiseksi. Datayksiköt muodostavat matriisin yllä mainittujen indikaattorien kanssa ja pureutuvat parametrisella materiaaleihin, veden- ja energiankäyttöön, infrastruktuuriin sekä matkustukseen ja logistiikkaan. Energiankäytössä huomioidaan esimerkiksi

uusiutuvan energialähteen määrä, joka on positiivinen datayksikkö eritoten leväkasvatuksessa ja ravinteikkaan rejektiveden käytössä. Energiaan liittyvissä laskelmissa lasketaan esimerkiksi energiasisältö (MJ) yksikköä kohden, kasvihuonekaasupäästöt yksikköä kohden ja paino yksikköä kohden (OECD 2012, 50). Näiden laskennassa esimerkiksi valaisu ja prosessiteknologia ovat tärkeässä roolissa, kun levätuotantoa pyritään mahdollistamaan ja tehostamaan.

### 2.1.2 EU:n koheesiopolitiikan vaikutus

Euroopan Unioniin kuuluvissa maissa voidaan nähdä monia yllä mainittuihin kansainvälisiin tavoitteisiin liittyviä toimenpiteitä aluepolitiikan muodossa. Euroopassa onkin useita vuosikymmeniä harjoitettu alue- ja koheesiopolitiikkaa, joiden kautta voidaan keskittyä rajoitettuun määrään tavoitteita sekä lisätä toimenpiteitä ja rahoitusta köyhimpiin alueisiin. Koheesiopolitiikka yhdistää taloudellisen ja sosiaalisen ajattelun, ja sitä kuvataan niin sanotuksi Troijan hevoseksi, jolla voidaan kehittää julkishallintoa ja läpinäkyvyyttä sekä lisätä ihmisten yhteistyökykyä erilaisten verkostojen kautta. (Hubner 2008, 4.)

Vuoden 2020-jälkeistä koheesiopolitiikkaa valmistellaan ja se painottaa alueellista kehitystä yhä enemmän. Varsinais-Suomen liiton kansainvälisten asioiden päällikkö Sonja Palhus painottaa, että teknisen kehityksen lisäksi koheesiopolitiikassa tulee ottaa systemaattisempi lähestymistapa, jotta kestävä aluekehitys varmistetaan myös yhteiskunnallisesta ja ympäristönäkökulmista. Hänen mukaansa tarvitaan myös ketteryyttä sekä joustavuutta, lisää ymmärrystä ja yksinkertaistusta sekä kaikkien alueiden ja solidaarisuuden huomioimista. (Palhus 2017, 12.) Tämä toimintatapa ei liene Suomelle nytkään täysin uusi.

Suomella on viime aikoina mennyt hyvin myös globaalilla tasolla ja Suomessa on paljon osaamista ja mahdollisuuksia tuottaa korkean jalostusasteen tuotteita. Panostaminen tutkimukseen ja kehitykseen onkin ollut kansainvälisellä tasolla. Energia- ja ympäristötekniikka kuuluvat Suomen erityisosaamisalueeseen ja energia-alan investoinnit ovatkin kasvaneet hieman enemmän moniin muihin aloihin verrattuna. Myös palvelut ovat vahvassa kasvussa eritoten yksityisellä puolella.

Elinkeinoelämän keskusliiton mukaan 2/3 bruttokansantuotteen arvosta syntyy juuri palveluiden kautta. (EK 2018.)

Rakennemuutokset tosin ovat viime aikoina koetelleet eri toimialoja ja eritoten perinteisestä teollisuudesta on kadonnut useita työpaikkoja. Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan rakennemuutosten hallinta onnistuu parhaiten monipuolisella elinkeinorakenteella, jossa edistetään uusia kasvualoja ja panostetaan aluekohtaisen elinvoimaisuuden rakentamiseen. Tällainen ennakoitu rakennemuutos (ERM) korostaa ennakointia johtamisessa, alueellisessa varautumisessa, vastuussa ja uudistamisessa. Kokeilukulttuurin kehittäminen on kaiken ytimessä. (TEM 2018.)

Yksi alueellista kehittämistä vaativa kohde on maatalouden ja ruokasysteemien kehittäminen turvallisiksi, kestäviksi, innovatiivisiksi sekä kiertotaloutta tukeviksi. Esimerkiksi EUn Horizon Europe on tätä tavoitetta tieteellisen tutkimuksen kautta tukeva ohjelma ja suunnitelmia tehdään jo vuosille 2021-2027. Tavoitteena on myös ehkäistä ilmastonmuutosta, vahvistaa sosioekonomisen maaseudun luomista sekä painottaa tiedonjakoa, yhteistyötä ja neuvontaa sekä sääntöjen yksinkertaistamista maanviljelijöille ja hallinnolle. Muutoksessa on mukana myös LIFE-ohjelma, joka on EUn ympäristö- ja ilmasto-ohjelma. (European Commission 2018, 52-53.)

On selvää, että alueellisten kokeilujen läpivienti vaatii taakseen päättävät hallinnolliset elimet, jotta kokeiluissa onnistutaan. EU ei kuitenkaan pysty yksin viemään maatasolla asioita läpi, vaan vaaditaan aluekohtaista hallintoa myös maiden sisällä. Suomessa aluehallintovirastoilla sekä elinkeino-, liikenne- ja ympäristö- eli ELY-keskuksilla on keskeinen rooli yllä mainittujen asioiden käytäntöön viemisessä. Alla olevasta kuvioista (Kuvio 3.) voidaan nähdä Valtiovarainministeriön sekä Työ- ja elinkeinoministeriön strategiaan pohjautuva toiminnan viitekehys Suomen aluehallinnon virastoille.





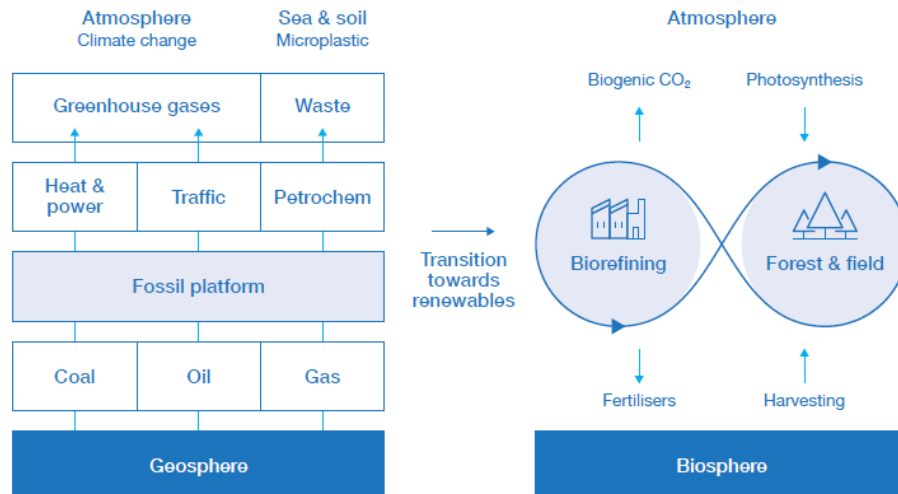
Kuvio 3. Valtion aluehallinnon virastojen toiminnan viitekehys 2016-2019 (VM & TEM 2015, 3)

Elinvoimaisuutta ja kilpailukykyä aluekohtaisesti tuetaan rahoituksella, ja suomalaiset yritykset voivat hakea muun muassa Energiatukea Työ- ja elinkeinoministeriöltä (TEM 2018) sekä Yrityksen kehittämisavustusta paikalliselta ELY-keskukselta tietyn perustein (ELY-keskus 2018).

Palvelut, aluekohtaiset vahvuudet sekä vuorovaikutteisuus ovat siis keskeisiä keinoja kasvun, sekä ihmisten ja ympäristön hyvinvoinnin edistämiseksi, ja tätä edistetään monin eri keinoin. Kuvion 3 kärkenä korostetaan aluekohtaisia vahvuuksia, mutta nykyisiin aluekohtaisiin vahvuuksiin ei todennäköisesti tule takertua liikaa, sillä uudet teknologiat, liikenneinnovaatiot ja digitalisaatio voivat muuttaa alueellisia mahdollisuuksia nopeastikin.

### 2.1.3 Energiantuotanto fossiilisesta biogeeniseen hiilenkiertoon

Globaalin aluekohtaisen kestävä kehityksen tavoitteiden taustalla on isommassa mittakaavassa muun muassa yhteiskunnan energiatarpeiden ratkaisu. Mitä enemmän energiaa saadaan tuotettua uusiutuvista lähteistä, sitä vähemmän ilmakehään pääsee hiilidioksidia ja ympäristöön jätteitä. Tätä kuvaa kuvio 4 alla, jossa energialähteet muuttuvat uusiutuviksi.



Kuvio 4. Muutos fossiilisesta hiilenkierrosta biogeeniseen (Harlin, Grönqvist, Järnefelt, Jääskeläinen, Kiiskinen, Kangas, Orelma, Paunonen, Ropponen, Sandquist & Tammelin 2018, 10)

Biogeenisessä eli luonnosta peräisin olevassa hiilenkierrossa metsä, maatalous ja biojalostamo ovat lähteitä toisilleen, kuten kuviosta 4 nähdään. Molemmissa näistä voi hiilidioksidia tosin syntyä liikaa, vaikka ilmastonmuutokseen vaikuttavat tekijät näkyvät vain fossiilista hiilenkiertoa esittävässä kuvassa. Kuva biogeenisestä hiilenkierrosta on selkeästi siis yksinkertaistettu ja kuvaa lähinnä ideaalitulannetta. Esimerkiksi Wiloso, Heijungs, Huppes & Fang (2016) käsittelevät biogeenisen hiilenkierron mahdollisia ongelmia ja epätasapainon aiheuttajia tutkimuksessaan. Pääperiaatteena muutoksessa on kuitenkin välttämättömyys siirtyä puhtaampaan energiaan pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

Tulevaisuudessa älykkäät sähkö- ja kaasuverkot tulevat todennäköisesti kattamaan suurimman osan maapallosta vedyn ja biokaasun ollessa niiden tärkeimmät energialähteet. Niitä tullaan ainakin toiveikkaimpien odotusten mukaan saamaan levästä sekä muista nopeakasvuisista biomassalähteistä. (Luoma, Vanhanen & Tommila 2011, 14-17.)

### 2.1.4 Biotalousdella luonnonvarojen viisaampaa käyttöä

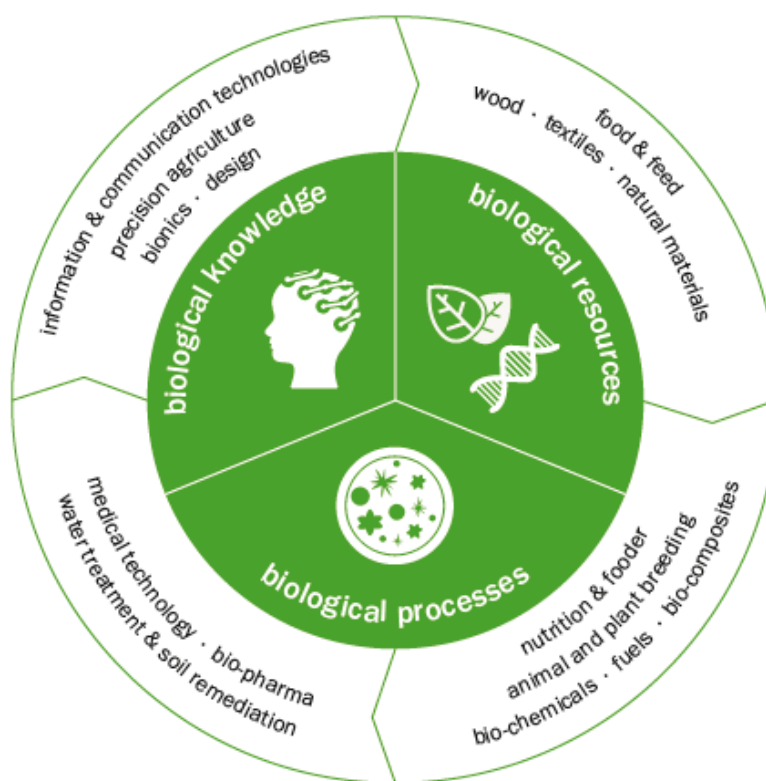
Biotalous voidaan nähdä valikoimana erilaisia keinoja, jotka edesauttavat matkaa kohti edellä mainittua biogeenistä hiilenkiertoa ja energiaongelmien ratkaisuja. Samalla talous toimii yhteiskunnallisten institutionaalisten järjestelyjen varassa, joita voidaan kuvata sosiaalisen pääoman käsitteellä (Möttönen 2014, 200). Biotalous voidaan nähdä myös merkittävänä yhteiskunnan ja sosiaalisen pääoman kehittäjänä, mutta kansainvälisesti kyseinen termi tuntuu vielä hakevan muotoaan.



Kuvio 5. Biotalouspolitiikan tilanne maailmassa (Bioökonomierat 2018, 9.)

Biotalous kehitys etenee maailmanlaajuisesti, mutta toistaiseksi vain muutamalla maalla on biotalousstrategia. Suomi on yksi näistä maista omalla strategiallaan, kuten yllä olevasta kuvioista 5 nähdään. Saksa oli pitkään biotalouden uranuurtaja perustettuaan ensimmäisen biotalousstrategian vuonna 2011, mutta on menettämässä kärkisijoitustansa, sillä esimerkiksi Suomessa, Ranskassa, Kiinassa ja Yhdysvalloissa on edistetty biotaloutta nopeammalla tahdilla (G, T. 2018). Saksan ongelmana tässä mielessä lienee suuri määrä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa tuotantoteollisuutta, joka alentaa mahdollisuuksia hiilineutraaliin tuotantoon. Saksan

biotalousneuvosto määrittelee biotalouden ”tietoperustaiseksi biologisten resurssien, innovatiivisten biologisten prosessien ja periaatteiden tuotannoksi ja hyödyntämiseksi, jotta saadaan kestäviä tuotteita ja palveluja kaikilla talouden aloilla” (Bioökonomierat 2018, 9.). Tältä pohjalta biotalouden piiriin sisällytetään perinteisen biotaloussektorit maa-, metsä- ja kalataloudesta vesiviljelyyn, sekä näihin liittyvät tuotantoprosessit ja palvelut teollisuudenaloilla, kuten paperi-, elintarvike-, tekstiili-, rakennus-, lääke- ja kemianteollisuus (Kuvio 6.). Mahdollistajina nähdään teollisissa sovelluksissa biopohjaisia prosesseja hyödyntävät bio-, nano- ja informaatioteknologiat. (Bioökonomierat 2018, 9.)



Kuvio 6. Biotalousen määritelmä visualisoituna (Bioökonomierat 2018, 9.)

Kaikkien perinteisten teollisuudenalojen säilyttämistä biotalouskäsitteessä kannattaisi rajoittaa, sillä osa sovelluksista nopeuttaa ilmastonmuutosta sekä vaikuttaa samalla esimerkiksi YK:n kansainvälisiin kestäväen kehityksen tavoitteisiin negatiivisesti.

Suomella on paljon luonnonvaroja, erityisesti metsät, ja toisaalta Suomessa on myös paljon teknologista ja yhteiskunnallista osaamista luonnonvarojen viisaaseen

käyttöön. Suomen biotalousstrategialla pyritään luomaan kilpailukykyistä toimintaympäristöä, jossa uutta liiketoimintaa saadaan biotaloudesta. Tämä vaatii vahvaa osaamis pohjaa biotalouteen liittyen sekä biomassojen käytettävyyttä sekä kestävyyttä. Käytännön tasolla Suomi aikoo nostaa biotalouden tuotoksen 100 miljardiin euroon luoden 100 000 uutta työpaikkaa vuoteen 2025 mennessä. (TEM, YM & MMM 2015, 1.)

Sitran johtaja Eeva Hellström näkee biotalouden pysyvänä yhteiskunnallisena strategiana ilmastonmuutoksen ja luonnonvarojen vähenemisen torjumiseksi, eikä ainoastaan biomassapohjaisena tuotantona ja bioteknologiana. Tätä pidetään välttämättömänä, jotta tarvittavat toimenpiteet saadaan aikaiseksi ja ymmärrys leviämään. Sitra toivoo yleisempää keskustelua siitä, miten biotaloutta kasvatetaan alueellisesti ja miten pääsemme biotaloudelliseen tehokkuuteen luonnonvarojen käytössä. Sitran visiossa vuoden 2050 biotaloudesta ihmisen hyvinvointi perustuu kestäväan ja monipuoliseen luonnonvarojen käyttöön, niiden korkeaan lisäarvoon sekä ihmisten luovaan osaamiseen. Vision mukaisessa maailmassa kaupungit ovat lähes itseriittoisia resurssiensa suhteen ja energia saadaan pääosin auringosta, tuulesta ja biokaasusta. Vettä riittää, sillä biologinen käsittely ja kierrätys toimivat tässä visiossa hyvin. Aloituspisteenä Sitra näkee tälle kaikelle jätteiden kierrättämisen biokaasulaitosten avulla energiaksi, lämmöksi sekä lannoitteiksi. (Luoma ym. 2011, 4-6.) Tämä vaikuttaa loogiselta ottaen huomion kasvavan populaation ja jätemäärän sekä tarpeen uusiutuvalle energialle.

VTT ehdottaa, että Suomi valitsee kestävän ruokatuotannon ja digitalisaation mahdollistamien uusien liiketoimintamallien kehittämisen yhdeksi biotalouden sovellusalueekseen sekä aloittaa uuden teknologiaohjelman tähän liittyen. (Poutanen, Nordlund, Paasi, Vehmas & Åkerman 2017, 40.) Tämäkin on varmasti perusteltua, sillä Suomi on erityisessä asemassa teknologiaosaamisen ja implementointimahdollisuuksien kanssa. Tarvitaan täysin uudenlaisia tehtaita ja toimintatapoja hyödyntäen robotiikkaa, automaatiota, bioteknologiaa, uusinta tutkimusta sekä esimerkiksi palvelumuotoilua. Kestävä ruokatuotanto sekä digitalisaatio tarkoittaa parhaassa tapauksessa myös ruokahävikin vähentämistä. Nämä ovat siis enemmänkin biokaasuteollisuuden kehittymistä tukevia kuin estäviä kehityskohteita.

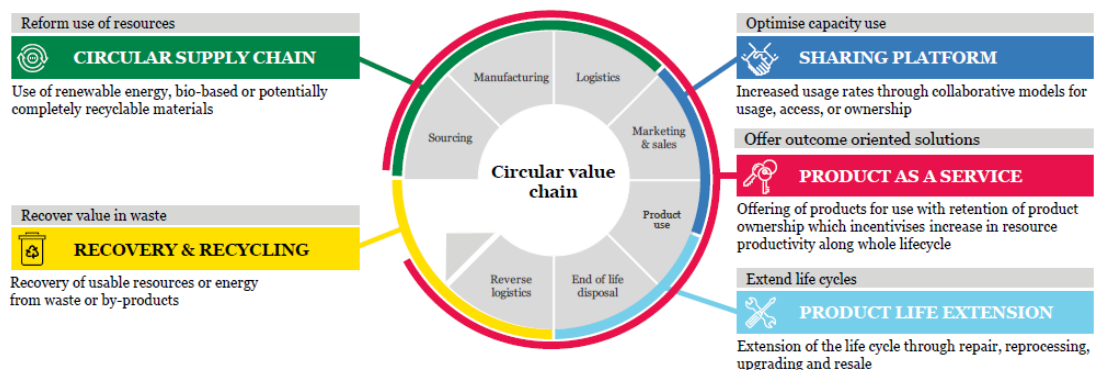
Suomen mahdollisia skenaarioita on tutkittu tulevaisuusverstaiden avulla, joissa on huomioitu eri tasoilla työskentelevien asiantuntijoiden näkemykset maaseudun tulevaisuuden käännteistä. Raportin mukaan markkinat määrittävät miten tulee käymään esimerkiksi maaseudun niukkuuden tai arvon kanssa, mutta lisääntyvää arvoa voidaan raportin mukaan säädellä poliittisilla toimilla. Raportissa päädyttiin neljään vaihtoehtoiseen tulevaisuuteen, joista ”biotalouden onnena” on ihannetilanne. Muita vaihtoehtoja ovat muita alueita riistävä siirtomaatalous, museomaaseutu, jossa maaseutu tyhjenee asukkaista, sekä saarekemaaseutu. (Kuhmonen & Kuhmonen 2014, 40.) ”Biotalous onnena” saavuttaminen vaatii selkeitä suunnitelmia ja toimenpiteitä yhteistyön ja innovaatioiden kautta, mutta tämä ei toisaalta vaikuttaisi olevan ristiriidassa nykyisten suunnitelmien ja tavoitteiden kanssa. Selkeä muutos- ja kehitystarve vaikuttaa olevan ilmeinen eritoten Euroopan ja Suomen tasolla. Berninger, Lovio, Temmes, Jalas, Kivimaa & Heiskanen (2017, 178) kirjoittavatkin taloudellisesta murroksesta ja systeemisestä muutostarpeesta, joka vaatii organisaatioilta tietynlaisia toimintatapoja. Muutos vaatii heidän mukaansa erilaisia toimijoita, kuten visionäärejä, edunvalvojia, verkoston rakentajia, välittäjäorganisaatioita sekä teknologian kehittäjiä ja kaupallistajia. Yhtenä kestävästä ravinnetaloutta edistävänä innovaationa teoksessa nostetaan esille erilaisia yrityksiä, jotka perustavat toimintansa asiakkaan ydinongelmiin, kuten lannoitteen optimointiin täsmälannoitteiden muodossa tai ylimääräisen mädätyslietteen tarjoamista ilmaiseksi lähialueen maataloille (Berninger ym. 2017, 161). Uusien teknologioiden pysyvä käyttöönotto vaatiikin nimenomaan asiakaslähtöistä suunnittelua ja tuotteistamista, jotta kannattavuutta voidaan tavoitella.

Myös organisaatiokulttuuristrategia on tärkeä osa systeemistä muutosta esimerkiksi energiamurroksessa. Asta Rossi antaa eväitä kulttuuristrategiamuutokseen korostamalla luottamuksen tärkeyttä ja sitä kuinka paljon voidaan saavuttaa, kun yrityksellä on selkeä visio paremmasta maailmasta ja työntekijöille annetaan luottamusta ja valtaa kehittää yritystä johdon mukana. Talous ja kannattavuuden tavoittelu vaatii siis alkutöikseen tukevan arvopohjan rakentamista, jos sitä ei ole. Rossi listaa kolme tienviittaa kohti Euroopan parasta työelämää, joista ensimmäinen korostaa ihmisten ja yritysten kukoistusta, toinen luottamuksen palauttamista

sitoutumisen ja kestävän kasvun avulla ja kolmas viestii hyvän työpaikan tuomisesta standardiksi unelmien, inhimillisyyden, innostavuuden ja vision kautta. (Rossi 2015, 310–314.)

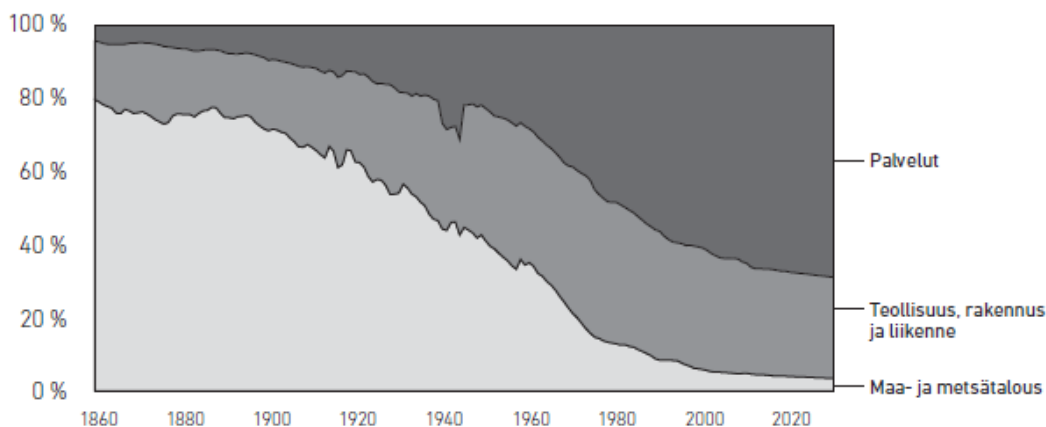
### 2.1.5 Kiertotaloudella materiaalit virtaamaan

Mitä jätteiden hallintaan ja kiertotalouteen tulee, lähtösyyksiä Euroopassa ovat olleet esimerkiksi ns. jätedirektiivi (2008/98/EY), jonka edellytyksenä Ympäristöministeriö teki valtakunnallisen jätesuunnitelman vuoteen 2023 (Laaksonen, Salmenperä, Stén, Dahlbo, Merilehto, Sahimaa 2018). Siinä erityisesti biohajoavat jätteet ovat tärkeässä roolissa, mutta myös muunlaiset jätteet pyritään saamaan kiertoon. Kiertotalouden mahdollistaminen voi useilla toimialoilla vaatia toimenpiteitä monilta osa-alueilta jätteistä ja tuotantoketjusta jakamistaloudellisiin malleihin, palveluihin ja tuotteiden elinkaaren kasvattamiseen, kuten kuviosta 7 voidaan nähdä.



Kuvio 7. Viisi kiertotalousmallia poistamaan lineaarista tehottomuutta sekä tuomaan yrityksille taloudellista kehitystä (Accenture Strategy lähteessä Reponen 2018, 7.)

Tämän tyyppiset toimenpiteen tarkoittavat todennäköisesti sitä, että palvelut lisääntyvät entisestään, kuten kuviossa 8 ennustetaan.



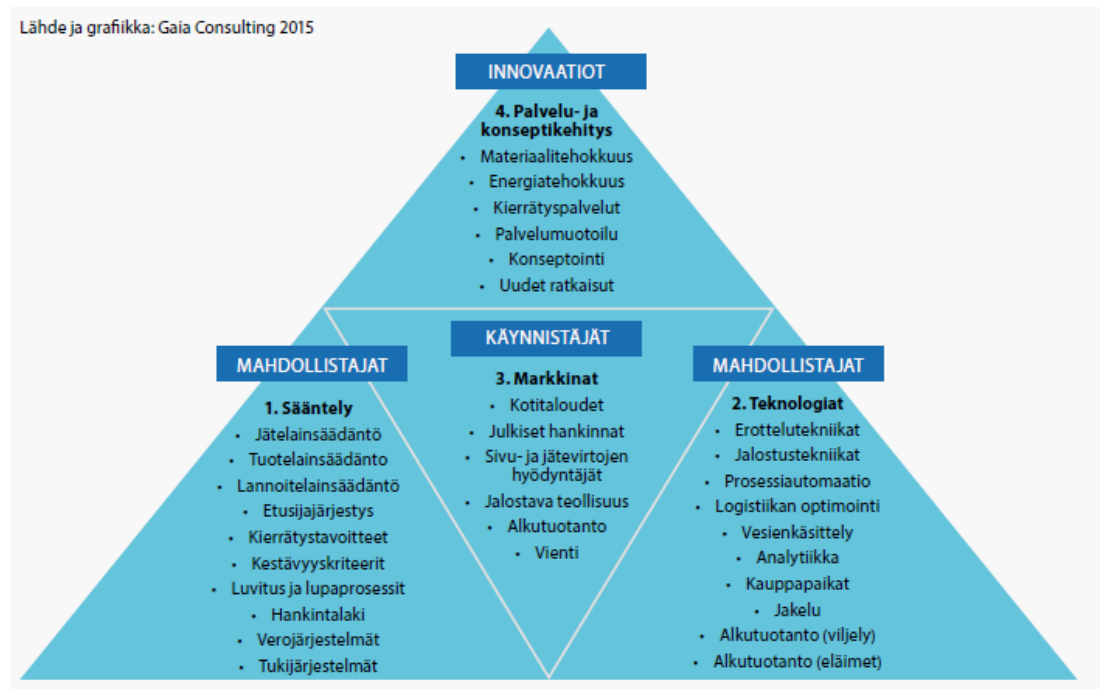
Kuvio 8. Työvoiman jakaantuminen alkutuotantoon, teollisuuteen ja palveluihin Suomessa 1860–2012 ja ennuste vuoteen 2030. (Tiainen lähteessä Hoffrén 2014, 162.)

Työvoiman keskittyminen palveluihin kasvaneeksi entisestään esimerkiksi tuotteiden elinkaari- ja konsultointipalveluiden johdosta, joita kiertotalous tulee todennäköisesti vaatimaan yhä enemmän.

Vuonna 2015 aloitettiin ns. tiekartan tekeminen kiertotalouden edistämiseksi (Sitra 2015). Kiertotalouden pääasiallisia haasteita Sitran ja Gaia Consultingin mukaan ovat ravinteiden kierto saaminen sekä mahdollisuus ja kannattavuus palauttaa ne maaperään. Samalta taholta kiertotalouden keskeisinä tavoitteina esitetään kierrätysravinteiden käytön priorisointi, ravinnekiertojen kokeilut käytännössä innovaatioiden, kokeilujen ja koulutuksen kautta sekä kolmantena ravinnekiertojen rakentajien yhteistyö muun muassa tiedolla johtamisen ja järjestelmien joustavuuden hyödyntämisen kautta. Kiertotalouden edistäminen vaatii valtakunnallista ja poliittista päätöksentekoa ja Suomessa huomioidut tai vireillä



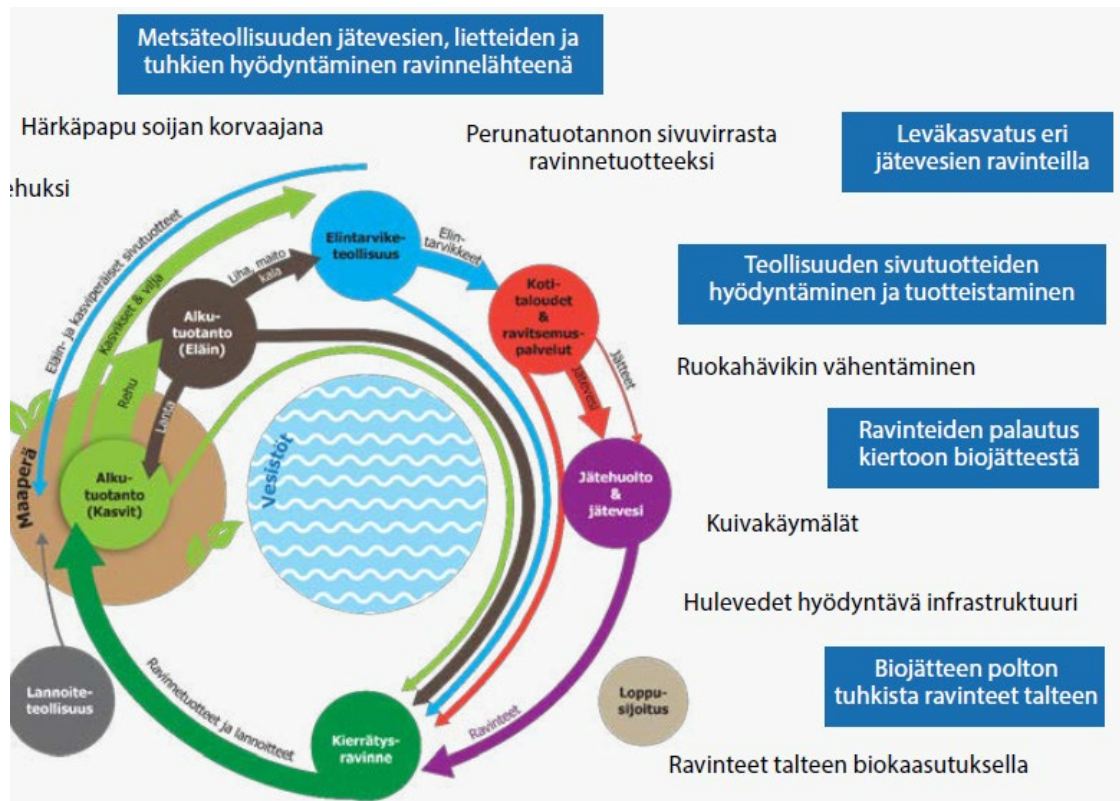
olevat asiat liittyvät esimerkiksi sääntelyyn, teknologiaan, markkinoihin ja palvelukehitykseen (Kuvio 9). (Sitra 2015, 39–42.)



Kuvio 9. Näkökulmia ravinnekiertoa edistävään muutokseen (Gaia Consulting 2015 lähteessä Sitra 2015, 42).

Kiertotalouden mahdollistajiin on panostettu viime aikoina paljon eritoten sääntelyn osalta ja vuonna 2019 uusiutuva jätelaki (Ympäristöhallinto 2018) tulee todennäköisesti nopeuttamaan kiertotaloutta entisestään, sillä kuntien vastuu kaventuu ja uusi laki sisältää muun muassa poikkeuksen velvollisuudesta luovuttaa jäte kunnan järjestämään jätehuoltoon, jos jätteenhaltija pystyy esittämään vähintään yhtä hyödyllisen vaihtoehdon (445/2018). Myös teknologioita kehitetään jatkuvasti. Käynnistäjiä on syntynyt sekä tarpeiden mukaan että ideariihien kautta.

Esimerkiksi leväkasvatus eri jätevesien ravinteilla on todettu potentiaaliseksi mahdollisuudeksi jätehuollon saralla (Kuvio 10).



Kuvio 10. Otos kuvasta “Ravinnekierron ideoita tiekarttatyöhön osallistuneilta” (Gai Consulting 2015 lähteessä Sitra 2015, 41.)

Teollisuus on ollut uusiutumassa kokonaisuudessaan kiertotalouden kautta jo jonkin aikaa ja kiertotalouden tuoma muutos onkin ehkä suurin vuosisatoihin. On alettu löytää erilaisia tapoja kehittää tuotteiden kiertotaloutta, kuten esimerkiksi tekemällä niistä pitkäikäisiä, yhteensopivia, päivitettäviä, modulaarisia sekä helppoja huoltaa ja korjata (Ethica 2018, 8). Näillä ohjenuorilla tuotteista saataneen parhaassa tapauksessa niin helppokäyttöisiä kuin huolettomiakin ja samalla ne palvelevat sekä valmistajan että asiakasyrityksen kestävästä kehityksestä.

Eritoten teollisuudenalat, joissa materiaalivirta on suurta, pystyvät jätevirtojensa kautta luomaan palvelutarpeita ja lisämahdollisuuksia muille yrityksille. Näin voidaan kasvattaa paikallisia markkina-alueita sekä yritysten keskinäistä symbioosia. (Luoma ym. 2011, 11-12.) Tämä on varmasti erityisen tärkeää maaseudulla, jossa nämä asiat eivät ole aina yhtä itsestäänselviä kuin virkeissä kaupungeissa.

## 2.2 Case-sovellukset tarkastelussa

### 2.2.1 Biokaasutuotannolla kohti hajautettua hyvinvointia

Kun maaseudun suuria mahdollisuuksia ovat esimerkiksi luonnonvarapohjainen liiketoiminta, uudistumiskyky ja yrittäjyys (Kuhmonen & Kuhmonen 2014, 60), on helppo suunnata katse näihin liittyviin kehitteillä oleviin hankkeisiin, kuten biokaasuliiketoiminnan kehittämiseen. Vuonna 2014 julkaistussa Euroopan komission dokumentissa “End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals” (Saveyn & Eder 2014) määritellään erilaiset biojätteet sekä niiden käsittelysuositukset.

Activity	Noise	Odour	Dust	Flora/ fauna	Soils	Water quality/ flow	Air quality	Climate	Building damage
Materials recycling facility	x	x	x	x	x	xx	xx	-	-
Composting	xx	xxx	xx	✓	x ✓	xx	xxx	x	-
Mechanical biological treatment	xx	xxx	xx	-	-	xx	xx	x	x
Anaerobic digestion	xx	xx	x	x ✓	x ✓	xx	xx	x	x
Gasification/ pyrolysis	xx	xx	xx	-	-	-	xx	x	x
Incineration with pre-sorting	xx	xx	xxx	xx	xx	xx	xxx	x	x
Incineration	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	x
Landfill	xxx	xxx	xx	xxx ✓	xxx	xxx	xxx	xxxx	x
Waste transfer stations	xx	xxx	x	-	-	xx	x	✓	-

Category	Meaning
✓	Direct or indirect benefit
-	No effect
x	Unlikely to be significant
xx	Potentially significant impact in some cases, but can be controlled
xxx	Impact can normally be controlled, but an issue at sites if design, engineering or operation falls below best practice
xxxx	An issue at all sites

Kuvio 11. Pääasialliset ympäristöhaitat erityyppisten ympäristöjätteiden käsittelyvaihtoehdoista (DEFRA 2011 lähteessä Saveyn & Eder 2014, 74)

Anaerobisella mädätysprosessilla on hyötyjä, kuten toimiminen uusiutuvan energian sekä arvokkaan biolannoitteen lähteenä sekä lantavarastojen kasvihuonepäästöjen vähentäjänä (Lukehurst, Frost & Al Seadi 2010 lähteessä Saveyn & Eder 2014, 74).

Kuten kuviosta 11 nähdään, anaerobinen mädätysprosessi on myös yksi parhaista tavoista käsitellä biohajoavaa kiinteää jätettä ainakin eläinperäisen maatalouden ja maaperän kannalta. Lisäksi se on huomattavasti parempi vaihtoehto ilmaston kannalta verrattuna kaatopaikkoihin. Kaiken kaikkiaan biokaasulaitosteknologian lisääntyminen on siis ymmärrettävää.

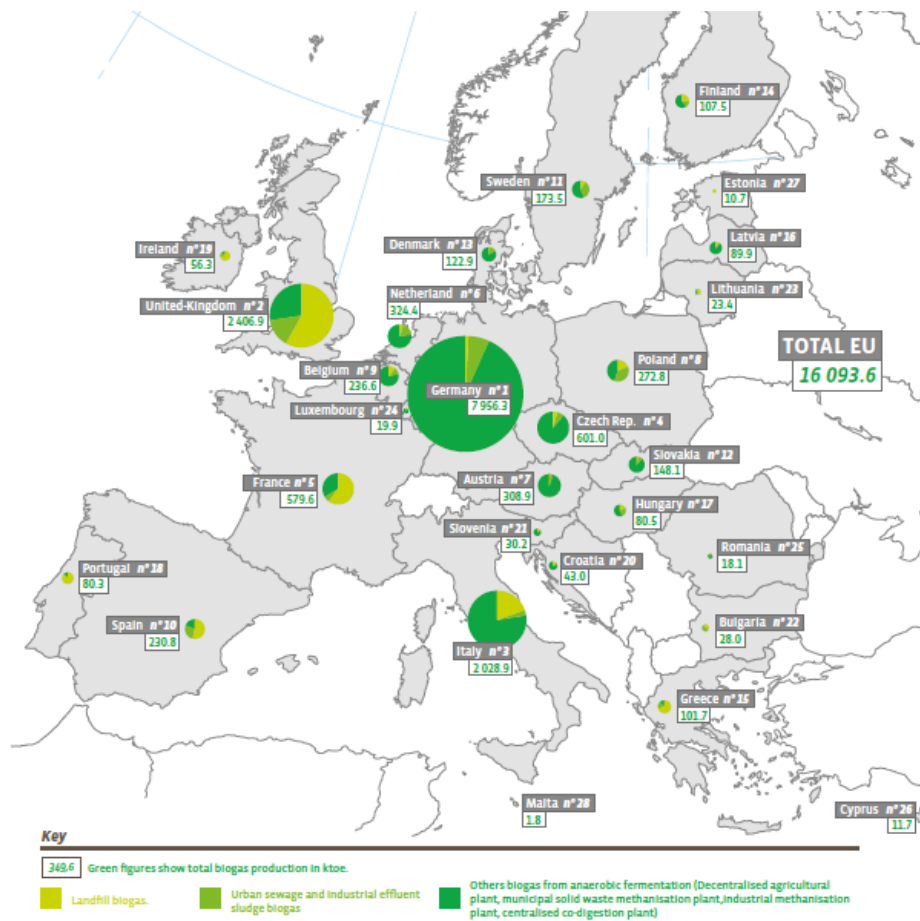
Biokaasuprosessi ei ole kuitenkaan automaattisesti kestävä ja ympäristöystävällinen, vaan vaatii tiettyjä toimenpiteitä. EU:n direktiivi 96/61/EC (Neuvoston direktiivi ympäristön pilaantumisen ehkäisemisen ja vähentämisen yhtenäistämiseksi) edellyttää monilta teollisuudenaloilta, kuten biokaasuteollisuudelta parhaimpien käytettävissä olevien tekniikkojen käyttöä (BAT – Best Available Techniques) parhaan ympäristösuojelun tason saavuttamiseksi. EU laatii tätä varten referenssidokumentteja eri tarkoituksiin, ja Euroopan komission täytäntöönpanopäätös (EU) 2018/1147 on eräs uusimmista referenssidokumenteista biokaasulle. BAT 38 sisältää jätteen anaerobiselle käsittelylle päätelmät parhaista teknologioista päästöjen vähentämiseksi ja mädättämön vakaan toiminnan takaamiseksi, joista yksi on jätteen ja prosessin muuttujien valvominen automaattisen tarkkailujärjestelmän käyttöönotolla. Hajuhaittoja aiheuttava vaahtoaminen tulee minimoida ja erilaisista vikatiloista tulee saada riittävän varhainen varoitus, jotta reaktorin vikatilat ja räjähdykset voidaan välttää. Valvottavia parametreja ovat muun muassa mädättämön toimintalämpötila, syötön alkaliniteetti ja pH-arvo, täyttönopeudet, ammoniakkin ja rasvahappojen pitoisuudet, biokaasun määrä, paine ja koostumus sekä nesteen ja vaahdon tasot. (EU 2018/1147, 75-76)

Erilaiset direktiivit, kuten EU:n RES-direktiivi (2009/28/EY) on pitkälti suomalaisten poliittisten tavoitteiden taustalla. On syöttötariffeja CHP-moottoreissa tuotetulle sähkölle, sekä maatilatukia, jotta myös pienemmät tilat pystyvät investoimaan biokaasuun. (Mutikainen, Sormunen, Paavola, Haikonen & Väisänen 2016, 24-25.) Vaikuttaa siis selvältä, että poliittiset ja lainsäädännölliset seikat vaikuttavat biokaasualan kehittymiseen paljon, mutta tarvitaan myös riskinottoa ja uskallusta. Myös tietoisuus asioista on tarpeen eli Suomessa tulee varmasti markkinoida biokaasualan hyötyjä vielä lisää. Esimerkkiä voidaan ottaa naapurimaasta Ruotsista, jossa ollaan jo pitkällä niin biokaasutuotannossa kuin maaseudun kehityksessäkin.

Esimerkiksi Skånessa on pystytty luomaan laaja alueellinen ekosysteemi biokaasutuotannon ympärille, kun on huomioitu kunnallinen taho, yritykset, toimialajärjestöt jne. (Mutikainen ym. 2016, 36.) Jos teemme jätteistä kilpaillun luonnonvaran, biokaasualan ansainta muuttuu (Aho, Pursula, Saario, Miller, Kumpulainen, Päällysaho, Kontiokari, Autio, Hillgren & Descombes 2015, 32). Tätä voidaan seurata esimerkiksi biokaasuteollisuuden indikaattorien avulla, ja tärkeimmät indikaattorit biokaasuteollisuuteen liittyen Suomessa ovat mädätetyn biohajoavan jätteen määrä (tonnia per vuosi) sekä biokaasulaitosten määrä. Nämä tiedot dokumentoidaan Itä-Suomen yliopiston Biokaasulaitosrekisteriin sekä Ympäristölupa- ja valvontatietojärjestelmä YLVAan. (Laaksonen ym., 2018, s. 57.)

Vaikka eläinperäisellä maataloudella on ympäristöä kuormittava vaikutus, maatilat voidaan kokonaisuudessaan nähdä sekä biokaasutuotannon lisääjinä että maaseudun tulevaisuuden kehittäjinä. Myös kasvipohjaisten teollisuustehtaiden on mahdollisuus hyötyä biokaasutuotannosta, sillä jäte on biologisesti hajoavaa. Samalla tulee huomioida, että Suomi on sitoutunut kasvihuonepäästöjen vähentämiseen 80-95 prosentilla vuoteen 2015 mennessä, joten metaanipäästöt tulee saada laskuun. Tätä tavoitetta helpottamaan biokaasusta on tehty yksi Suomen kärkihankkeista. (Mutikainen ym. 2016, 8.)

Vuonna 2014 biokaasulla tuotetun energian määrä oli vain puoli prosenttia Suomen uusiutuvan energian tuotannosta (Mutikainen ym. 2016, 12). On hyvä, että uusiutuvaa energiaa saadaan muualtakin, mutta koska potentiaalia ja jätettä on paljon, kannattaa biokaasutuotantoa lisätä merkittävästi, kuten monissa Euroopan maissa on jo tehtykin (Kuvio 12).



Kuvio 12. Biokaasusta saatu energiatuotanto Euroopan Unionin alueella vuoden 2016 lopulla yksikössä 1 ktce = 11630000 kWh (EurObserv'ER 2017, 7).

Kuviosta 12 nähdään, että biokaasun tuotanto on lähtenyt vahvasti käyntiin eritoten Saksassa, Englannissa sekä Italiassa. Myös monissa muissa Euroopan alueen maissa tuotanto on jo käynnissä ja todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa. Biokaasun määrä lienee mädätyskyvykkyyden lisäksi vahvasti riippuvainen ihmisten, teollisuuden ja niiden tuottaman jätteen määrästä alueella, ja näin ollen myös prosessiin liittyvät rejektiveden määrä.

### Biokaasun muodostuminen ja koostumus

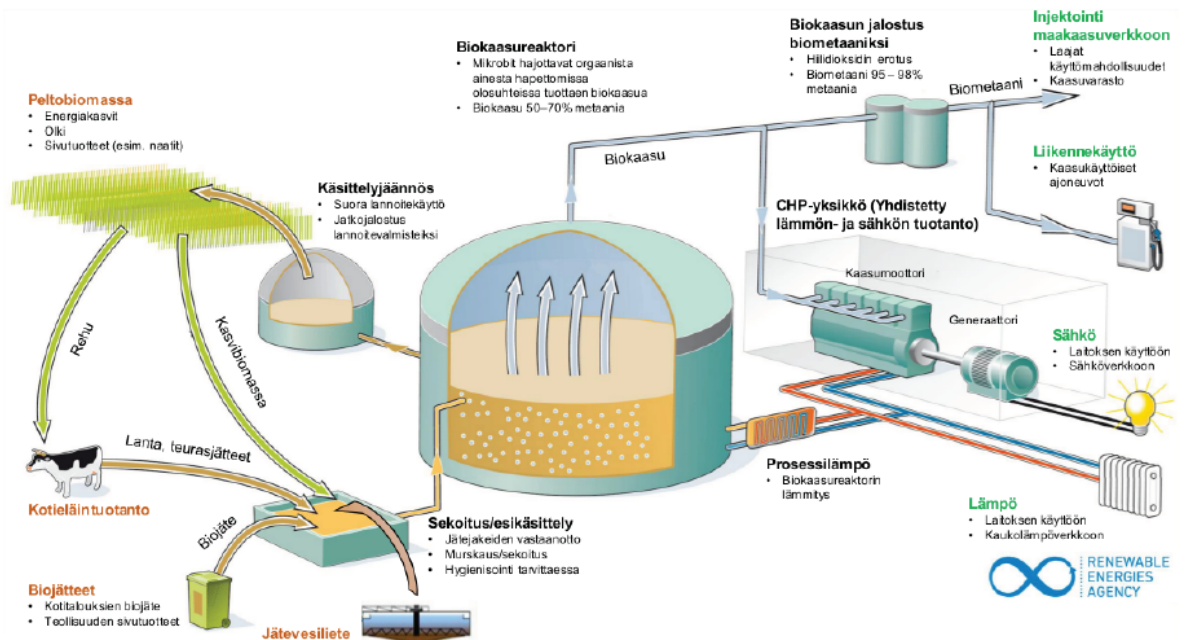
Biokaasu sisältää noin 50 – 70 % metaania noin kolmanneksen ollessa hiilidioksidia. Biokaasua voidaan käyttää sähkön- tai lämmöntuotantoon tai se voidaan jalostaa biometaaniksi poistamalla hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet. Jälkimmäinen onkin

viime vuosina yleistynyt, sillä se voidaan syöttää kaasuverkkoon esimerkiksi teollisuuden käyttöön (Kinnunen & Rintala 2015, 17).

On joitakin viitteitä siitä, että anaerobinen mädätysprosessi ja biokaasun tuotanto olisi ollut assyrialaisien ja persialaisten käytössä jo ennen ajanlaskun alkua.

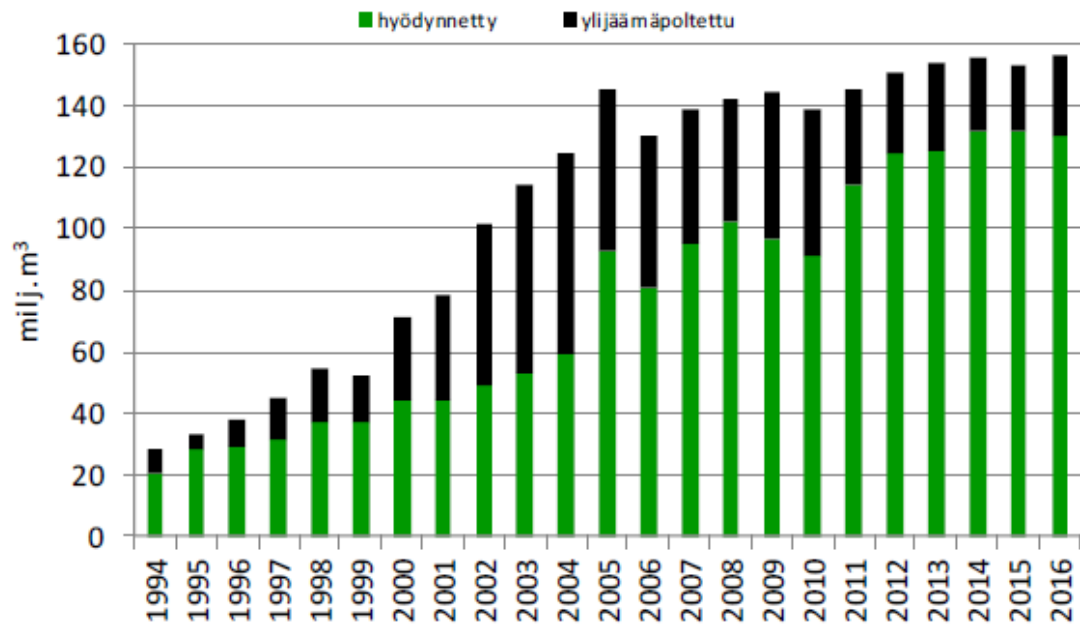
Enemmän todisteita on vuodesta 1776 alkaen, jolloin Alessandro Volta päätteli yhteyden orgaanisen aineen mädättämisen määrän ja palavan kaasun määrän välillä. Vuonna 1808 Sir Humphrey Davy päätteli metaanin läsnäolon lannan anaerobisessa mädättämisessä, ja saman vuosisadan aikana metanogeneesin todettiin olevan yhteydessä mikrobiaktiiviteettiin. Ensimmäinen biokaasutehdas syntyi Bombayihin Intiaan vuonna 1859, ja samana vuonna Englannin Exeterissä biokaasua hyödynnettiin jätevesituotannosta johdettuna kekseliäästi katulamppujen valaisuun. Vasta 1900-luvun alussa kokeiltiin ensimmäistä kaksivaiheista prosessia erotuksen ja hydrolyysin kanssa, ja 1930-luvulla tutkijat Buswell ja Hatfield selittivät anaerobisen prosessin reaktioineen tieteellisemmällä tasolla. (Adelekan 2012, 2-3.) Vaativa prosessi on siis teollisessa mielessä uudehko vaatien edelleen jatkuvaa kehitystä.

Nykypäivänä biokaasua tuotetaan erilaisista maatalouden lähteistä, kuten lannasta ja elintarvikkeista, mutta myös yleisestä teollisuus- ja yhdyskuntajätteestä (Kuvio 13). (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 21).



Kuvio 13. Biokaasuprosessi (Kinnunen & Rintala 2015, 10.)

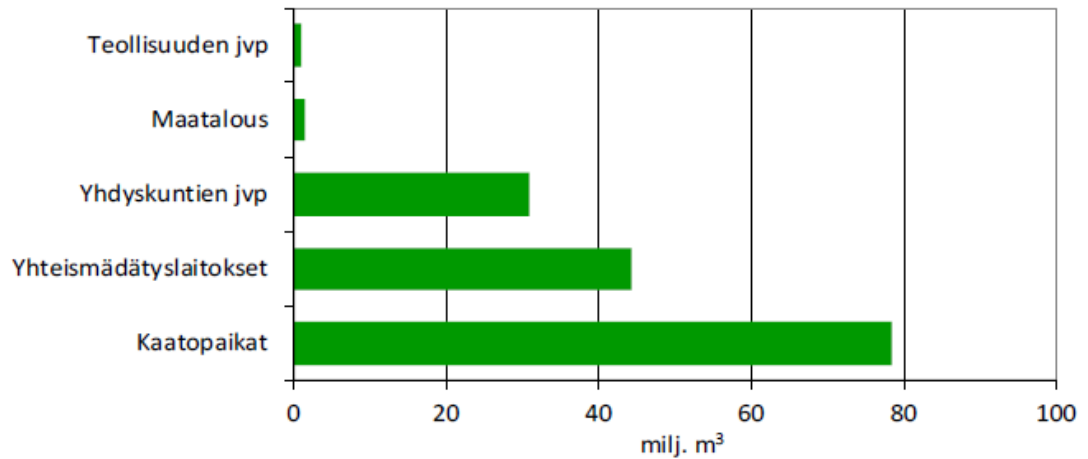
Biokaasutuotannon kannattavuutta voidaan arvioida ns. VS:TS-suhteella. TS viittaa kuiva-aineeseen (total solids) ja VS viittaa orgaaniseen aineeseen (volatile solids). Mitä suurempi suhde, sitä sopivampaa syöte on biokaasuprosessiin. VS:TS-suhteen määrittämiselle on standardi SFS 3008. (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 23–25.)



Kuvio 14. Biokaasulaitoksilla tuotettu ja hyödynnetty biokaasu vuosina 1994-2016 (Huttunen & Kuittinen 2017, 19).

Kuviosta 14 voidaan nähdä, että biokaasua on voitu vuosien edetessä hyödyntää yhä enemmän ja ylijäämäpoltto on vähenemässä. Jos tuotantoa katsoo laitostyypeittäin, voidaan nähdä, että tuotanto on suurinta perinteisessä jätehuollossa (Kuvio 15).





Kuvio 15. Biokaasutuotanto laitostyypeittäin Suomessa (Huttunen & Kuittinen 2017 , 19.)

Teollisuuden jätevesipuhdistamoissa ja maataloudessa biokaasuntuotanto ainakin toistaiseksi melko pientä, mutta on positiivista, että tuotanto on keskittynyt ilmaston ja ympäristön kannalta haitallisimpaan jätteeseen eli kaatopaikkoihin (Kuvio 15).

### Mädätysprosessin optimointi

Mikroravinteet, joita biokaasuprosessissa tarvitaan ovat hiili (C), typpi (N), fosfori (P) sekä rikki (S). Myös vitamiinit ja hivenaineet ovat tarpeellisia entsyymitoimintaan. Tarpeellisia hivenaineita ovat esimerkiksi nikkeli (Ni), koboltti (Co), molybdeeni (Mo), rauta (Fe), seleeni (Se), sinkki (Zn), kupari (Cu) ja mangaani (Mn), mutta liian korkeina pitoisuuksina Rauta (Fe), sinkki (Zn), kupari (Cu), kromi (Cr), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni) ja seleeni (Se) voivat olla myös estää entsyymitoimintaa. (Kymäläinen, 2015, s. 66.) Lyijy (Pb), elohopea (Hg) ja kadmium (Cd) ovat ainoastaan haitallisia prosessille (Kymäläinen 2015, 70).

Yhteiskäsittely auttaa välttämään ravinteiden erillistä lisäystä. Optimaalinen C:N-massasuhde on 15–25, mutta voi vaihdella esimerkiksi 5–50 välillä. Jos typpeä on liikaa, saattaa ammoniakkipitoisuus nousta liian korkeaksi ja hidastaa prosessia. Optimaalisesta C:N-suhteesta huolimatta prosessi saattaa hidastua myös hitaasti liukenevien yhdisteiden, kuten ligniinin johdosta. (Kymäläinen & Luostarinen 2015, 26.)

Biokaasureaktorin online-seuranta tehdään usein vain muutaman parametrin osalta, kuten pH, pinnankorkeus, reaktorilämpötila, biokaasuntuotto ja metaanipitoisuus. Muu seuranta tapahtuu näytteenottojen avulla. Koko tehtaan prosessia seurataan yleensä automaatiojärjestelmän avulla, johon kuuluvat

- jätteen esikäsittely
- mädätysjäännöksen käsittely
- rejektiveden käsittely
- biokaasun käsittely ja hyödyntäminen
- hygienisointi
- reaktorin syöttö, lämmitys ja sekoitus

(Kymäläinen 2015, 75–76.)

### **Rejektivesityypit ja niiden ominaisuudet**

Rejektiveden koostumus peilaa usein ympäröivän yhteiskunnan elämäntyyliä sekä käytössä olevia teknologioita. Yleensä rejektivesi sisältää proteiineja, hiilihydraatteja, rasvoja, haihtuvia happoja sekä epäorgaanista ainesta, jossa on suolaa, kalsiumia, kaliumia, magnesiumia, klooria rikkiä, fosfaattia, bikarbonaattia, ammoniumsuoloja sekä raskasmetalleja. (Bhatt, Panwar, Bisht & Tamta 2014, 2.)

Rejektivesien ominaisuudet vaihtelevat siis riippuen siitä, minkä tyyppistä jätettä biokaasulaitoksessa on mädätetty ja usein laitosten mädätysprosessit keskittyvät tietynlaisen jätteen mädättämiseen. Kaikkien laitosten ei siis tarvitse keskittyä esimerkiksi selluteollisuuden jätteisiin ja jotkut jätehuoltolaitokset toimivat vain puhdistamoina.

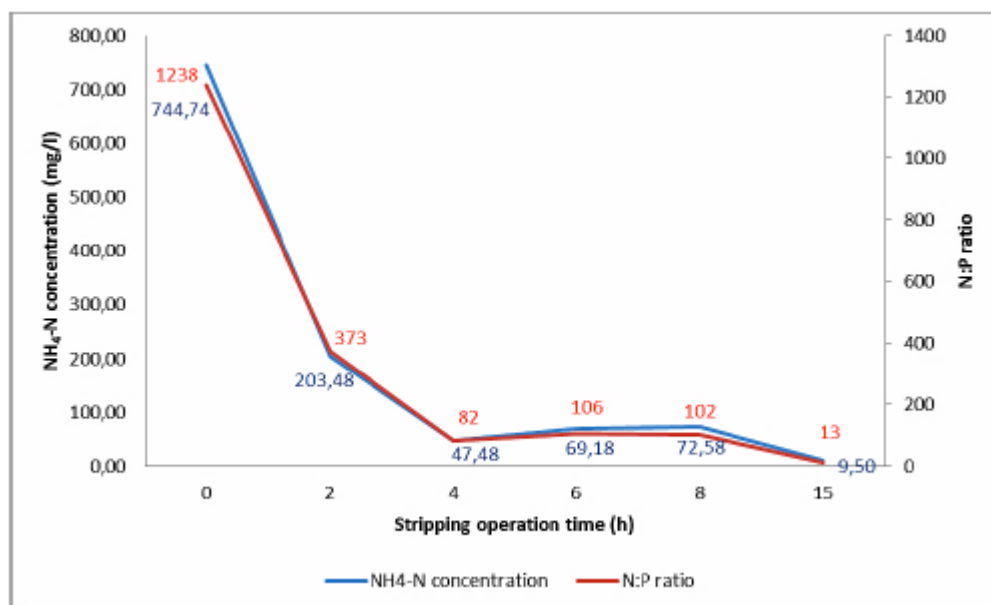
Rejektiveden yksi olennaisimmista ominaisuuksista lienee sen tyyppi:fosfori-suhde eli N:P-suhde. Meribiologian uranuurtajan A.C. Redfieldin mukaan mikrolevän optimaalinen molaarinen N:P-suhde on 16, mikä johtuu solunsisäisistä ominaisuuksista. Proteiini:rRNA-suhteen taas on todettu olevan  $3 \pm 0.7$ , joka vastaa suhdetta  $N:P = 16 \pm 3$  tuoden mielenkiintoisen yhdistävän tekijän näiden välille. (Loladze & Elser 2011, 1.) Puhdistamolietteessä fosforia on hyvin vähän tyypeen verrattuna, jolloin N:P-suhde on korkea. Lantaa ja teollisuuden sivutuotteita sisältävässä rejektivedessä tyypeä voi olla puolet enemmän ja fosforia jopa 10-kertainen määrä, kuten kuviossa 16 nähdään. (Paavola & Kapuinen 2015, 100.)

Raaka-aineet	$N_{\text{tot}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	$P_{\text{tot}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	N:P-suhde
Puhdistamoliete	3,7	0,1	37
Lanta ja teollisuuden sivutuotteet	7,0	1,0	7

Kuvio 16. Esimerkki reaktiivisuustyypien typpi- ja fosforipitoisuuksista sekä massaan perustuva N:P-suhde (Paavola & Kapuinen 2015, 100).

Jos molaarinen N:P-suhde ei ole lähellä optimaalista suhdetta 16 (Redfield Ratio), voi solukasvu yleisesti ottaen olla haasteellista, jos typpi, fosfori tai joku muu ravinne alkaa rajoittamaan kasvua. Rejektivedessä on typpeä ja fosforia yleensä riittävästi leväbiomassan tuottamiseen, mutta kasvun jatkuessa fosfori rajoittaa kasvua ennen typpeä (Piiparinen, 2018). N:P-suhteeseen voidaan myös vaikuttaa erilaisilla nestejakeen käsittelyvaihtoehdoilla, joista Suomessa yleisimpiä ovat ammoniakkistrippaus, haihdutus sekä biologinen ja kalvokäsittely. Esimerkiksi ammoniakkistrippauksessa ammoniumtyppi erotetaan nesteestä kaasufaasiin ammoniakkina. (Paavola & Kapuinen 2015, 102-103.)

Viikinmäen jätevesipuhdistamon biokaasulaitoksen rejektiveden N:P-suhteen todettiin olevan jopa 1238, mutta se saatiin ammoniakkistrippauksen avulla laskettua tasolle 13 (Merin 2016, 98), kuten alla olevasta kuviosta 17 voidaan nähdä.



Kuvio 17. Rejektiveden 15 tunnin ammoniakkistrippaus lämpötilassa 60 °C (Merin 2016, 81).

Käsittelyn avulla rejektivedestä voidaan siis saada leväkasvulle soveltuvaa. Leväkasvua voidaan hyödyntää myös puhdistamaan jätevettä ravinteista. Brinkmann, Santonja, Yükseler, Roudier & Sancho (2016) ovat kirjoittaneet kemianteollisuudelle BAT-referenssidokumentin liittyen jätevesien ja -kaasujen käsittelyyn ja hallintajärjestelmiin liittyen 2010/75/EU-direktiiviin. Työryhmä mainitsee mikrolevät muiden mikro-organismien joukossa potentiaalisina puhdistajina jätevedelle, joka sisältää happi- ja hiilijäämiä (TOC/COD). Tässä parhaassa mahdollisessa tekniikassa valitaan luonnollisesti ilmenevät mikro-organismit, tuotetaan paranneltuja ominaisuuksia sisältäviä mikrobivariantteja sekä johdetaan nämä variantit vedenpuhdistusprosessiin. Tekniikka korvaa esimerkiksi kemiallisen hapetuksen (Brinkmann ym. 2016, 571).

Tärkeiksi jätevetteen liittyviksi tekniikoiksi veden käsittelyn lisäksi on samassa raportissa nähty veden säästämiseen ja keruuseen liittyvät tekniikat, kuten myös jätteen kaasujenhallintaan, keruuseen ja käsittelyyn sekä haju- ja äänihaittojen ja päästöjen ehkäisyyn. BAT-referenssidokumentit ovat olennaisia ohjeistuksia niin jäteveden käsittelyssä kuin muissakin prosesseissa, joille näitä dokumentteja on olemassa. Tällaisia ovat esimerkiksi Large Volume Organic Chemical Industry (LVOC), Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals – Ammonia, Acids and Fertilisers

(LVIC-AAF), Energy Efficiency (ENE), Emissions from Storage (EFS), Waste Treatments Industries (WT) ja Large Combustion Plants (LCP). (Brinkmann ym. 2016, s. 539.)

## 2.2.2 Mikroleväkasvatuksella kohti biotuotetehdasta

### **Mitä mikroleväkasvatus on**

Leväkasvatus on eräs vesiviljelyn osa-alue. Vesiviljely eli ns. aquaculture on yleisessä merkityksessään vesieliöiden valvottua kasvattamista meri- ja murtovesissä ja suolattomissa sisävesissä. Erityisesti Aasiassa harjoitetaan vesiviljelyä paljon. Vesiviljelyn tuotteina levien lisäksi voivat olla myös kalat, nilviäiset, äyriäiset tai muut eläimet ja kasvit. (Niinimäki 2015, 14.) Kasvien vesiviljely on yleistymässä ja siihen kuuluvat esimerkiksi ”aquaponic” ja ”hydroponic” -menetelmät, joissa kasvien, kuten vihannesten, juuret ovat ravinnerikkaassa vedessä mullan sijaan. (Niinimäki 2015, 75.)

Sopivat olosuhteet ovat kaiken vesiviljelyn lähtökohta, ja näin myös leväkasvatuksessa. Niinimäki listaa vesiviljelylle yleisiä tavoitteita, jotka soveltuvat myös leväkasvatukseen:

- 1) maksimaalinen kasvu ja eloonjäänti,
- 2) optimaalinen tuotantohinta sekä
- 3) mahdollisimman alhaiset viljelyaltaan perustus- ja käyttökustannukset.

Yhtenä tärkeänä lisäedellytyksenä hän listaa myös sopivan lajin löytymisen. Tämä onkin olennainen edellytys eritoten rejektivesikasvatuksessa, joka ei kuulu perinteisiin kasvatusvesiin vaan lähinnä jätevesiin. Olosuhteiden osalta yleisiä edellytyksiä ovat sopiva lämpötila, pH-arvo ja happimäärä, ravinteet tai ruokinta sekä jätteiden poistuminen, veden vaihtuminen ja ammoniakkipitoisuuden määrän kurissa pysyminen. (Niinimäki 2015, 27-28.)

Eräs vesiviljelyn haitoista on kasvavan teollisuuden aiheuttamat saasteet ekosysteemissä. Raskasmetallit ovat yleisimpiä vesiympäristöjen saastuttajia. Tarpeellisetkin raskasmetallit voivat olla myrkyllisiä liiallisina pitoisuuksina (Carfagna,

Lanza, Salbitani, Basile, Sorbo & Vona 2013). Käytännössä metallit voivat siis vaikuttaa kasvavien organismien aineenvaihduntaan ja kasvuun.

### **Valoa kannalle**

Valoenergia on tärkeässä roolissa leväkasvatuksessa, sillä leväkasvatus tapahtuu yleensä autotrofisesti. Aurinkoenergia on ihanteellinen lähde valolle sen uusiutuvuuden vuoksi ja koska se ei itsessään tuo lisäkuluja toisin kuin energiaa vaativat keinotekoiset valot.

Auringonvalon hyödyntämisessä on kuitenkin myös ongelmia, sillä vaikka levät hyödyntävät valoa tehokkaasti, noin 1-5 % valoenergiasta muuntuu fotosynteesin lopputuotteiden kemialliseksi energiaksi. Tällä hetkellä noin prosentin hyödyntämisaste on realistinen, mutta pidemmällä tähtäimellä realistisena tavoitteena pidetään viiden prosentin hyödyntämisastetta kasvatussystemien kehittyessä, kun valitaan säteilyspektri vastaamaan paremmin leville käyttökelpoista spektriä. Tulee myös huomioida, että valoa voi kesäkuukausina olla myös liikaa, eli enemmän kuin mitä levä pystyy hyödyntämään. Optimiolosuhteiden löytäminen on siis keskeistä. (Seppälä 2018, 3-4.)

Jos lopputuotteen arvo on riittävä ja tuotanto voidaan toteuttaa keinotekoisella valaistuksella, käytössä on erilaisia vaihtoehtoja. Eräs tutkimus keskittyi typen poistamiseen kotitalousjätevedestä, jossa levää kasvatettiin alhaisessa valossa. Tutkimuksessa todettiin, että säteilytys ilmaston kanssa sinisen valon aallonpituudella kasvatti leväbiomassan määrää ja lisäsi typen poistumista. Ammoniumin poisto kasvoi 38.5%:sta 96.3%:iin ja levänkasvu lisääntyi määrästä 72.5 mg L<sup>-1</sup> määrään 345.3 mg L<sup>-1</sup>. Todettiin, että voimakas sininen valo ja ilmasto yhdessä johtivat levän nopeimpaan kasvuun. (Kang, Keugtae, Jang, Moon, Ju, Kwon & Jahng 2018.)

### **Mikroleväkasvatuksen tilanne Euroopassa**

Mikroleväkasvatus ja sen kehittäminen on maailmalla nopeassa kasvussa; *8th European Algae Industry Summit* -leväkonferenssissa mikrolevän potentiaali arvioitiin

yleisesti ottaen hyväksi tulevaisuudessa, mutta tuotannon laajuus sekä maantieteellinen lokaatio ovat ratkaisevia tekijöitä (Vieira 2018, 4). Tällä hetkellä mikrolevää tuotetaan lähinnä lopputuotteeksi, joka on joko kuivattu (sumutus-, pakkas- tai aurinkokuivatus), tahnamainen (5-15 % DW) tai uute. Uusien elintarvike- ja lääketieteellisuustuotteiden lisäksi tutkimus on tuonut tullessaan myös uusia sovelluksia, kuten biopolttoaineet, lannoitteet, jäteveden puhdistus sekä kemikaalit. (Vieira 2018, 11-13.) Mitä biopolttoaineisiin tulee, levistä voidaan tuottaa biopolttoaineita, kuten biodiesel, etanoli ja metaani. Kannattavinta lienee kuitenkin metaanin tuottaminen biokaasutekniikalla, sillä kuivausta ei tarvita ja levät voidaan hyödyntää kokonaan. (Lampinen 2015, 194.) Tulee kuitenkin huomioida, että vaikka levä halutaan monella taholla nähdä lupaavana energiakasvina, todellista tietoa teollisen mittakaavan levätuotannosta ja ympäristörasitteista erityisesti Suomen olosuhteissa on toistaiseksi vähän.

Vuoden 2018 yleisimmin käytetyiksi mikroleväsuvuiksi on nimetty *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Aphanizomenon* sekä uudempina tulokkaina *Nannochloropsis*, *Porphyridium*, *Phaeodactylum*, *Euglena*, *Scenedesmus* ja *Tetraselmis*. Erilaisia mikroleviä tutkivia tutkimusryhmiä on EABAn mukaan Euroopassa yli 300 ja tutkijoita yli 10 000 kpl, eli sinänsä ei ole yllättävää, että uusia lupaavia levälajeja löydetään. Kaupallisia mikrolevätuotteisiin panostavia yrityksiä Euroopan Unionin alueella on laskettu olevan yli 400 kpl ja maailmanlaajuisesti yli 2000. (Vieira 2018, 19.)

Mikrolevän kasvatusta on myös osa EU:n sinisen kasvun strategiaa (Blue Growth Strategy) ja sinistä biotaloutta. Levä on ns. sinistä biomassaa, joka nähdään potentiaalisena raaka-aineena erilaisille tuotteille ja palveluille tulevaisuudessa, kuten aiemmin todettiin. (ECORYS, 38.) Suomen Vesiviljelystrategia 2022 asettaa non-food-vesiviljelyyn suuria odotuksia ja olettavat levän olevan pitkällä aikajänteellä potentiaalisin vaihtoehto bioöljyjen raaka-aineeksi. Odotuksia on uudenlaisen energiantuotannon lisäksi myös rehuraaka-aineiden ja erilaisten lisäarvotuotteiden osalta. (Valtioneuvosto 2014, 3.)

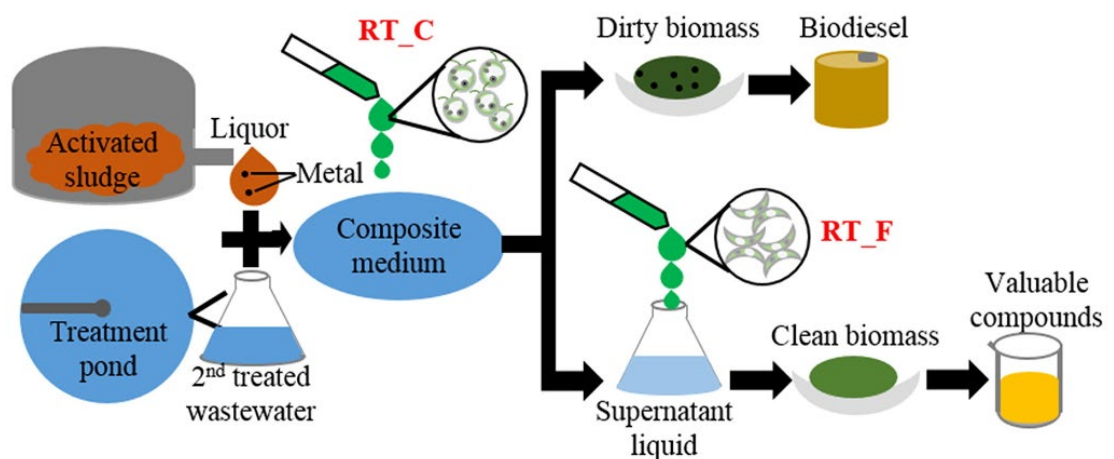
Mitä tulee rejektivesikasvatettuun levään, se ei ainakaan EU:n kriteeristöissä liene tällä hetkellä syömäkelpoista, sillä se potentiaalisesti kerää rejektivedestä itseensä erilaisia raskasmetalleja ja haitallisia ravinteita. Esimerkiksi MTT:n tutkimuksen

perusteella biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä esiintyy useita haitallisia orgaanisia yhdisteitä ja lääkeaineita (Marttinen, Suominen, Lehto, Jalava & Tampio 2014, 56). Muita käyttömahdollisuuksia kuitenkin on, ja koska prosessit kehittyvät jatkuvasti, myöskään rejektivesikasvatetun syömäkelpoisen mikrolevän tuotantomahdollisuudet eivät ole poissuljettuja.

### Mikrolevän rejektivesikasvatukseen liittyvät löydökset

Jätevesi- ja biokaasuprosessin rejektiveteen liittyvää leväkasvatustutkimusta on tehty jo jonkin verran, ja erityisesti vuoden 2018 aikana on saatu mielenkiintoisia tuloksia.

Eräs lupaava tutkimus keskittyi jätevedessä kasvatetun mikrolevän parempaan hyödyntämiseen kaksivaiheisen prosessin kautta (Han, Pan & Thomsen 2018). Siinä todettiin jäteveden kykenevän ylläpitämään kahden mikrolevätyypin kasvua ja että kaksivaiheisella prosessilla voidaan saada myös korkeat hygieeniavaatimukset täyttävää mikrolevää, sillä haitallisten aineiden poistokyky on korkeampi. Prosessin avulla voidaan siis tuottaa mikrolevää useampaan sovellukseen.

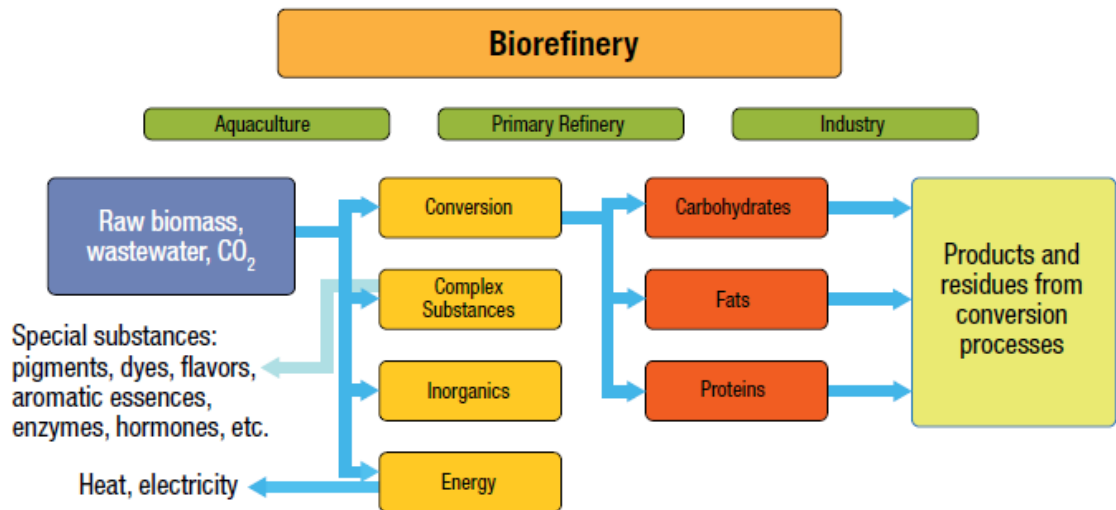


Kuvio 18. Mikrolevätuotanto kaksivaiheisella prosessilla (Han ym. 2018, 2).

Kuviossa 18 dekontaminoitunut biomassa menee biodieselin tuotantoon, mutta teoriassa myös muut sovellukset saattavat olla mahdollisia esimerkiksi pigmenttiteollisuudessa tai sovelluksissa, joissa hygieeniavaatimuksista voidaan jonkin verran tinkiä.

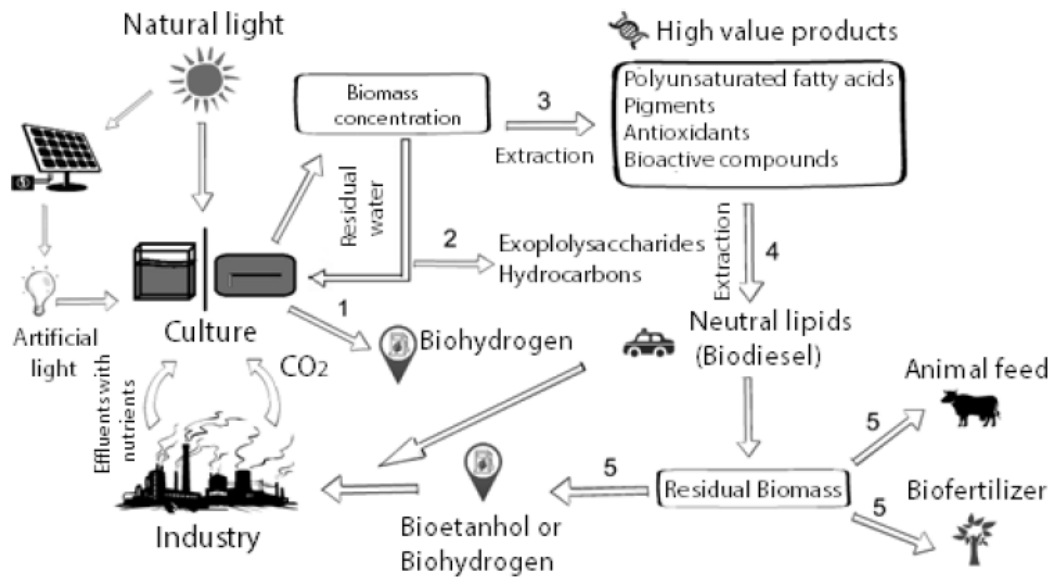


Jos tällainen kaksivaiheinen prosessi saadaan toteutettua, on reaktivesikasvatuksella paremmat edellytykset biojalostamon tai biotuotetehtaan raaka-aineeksi. Kuviossa 19 nähdään Yhdysvaltojen energiaviraston näkemys mikro- ja sinilevän potentiaalista.



Kuvio 19. Biojalostamokonsepti (U.S. DOE 2010, 61)

Kuviossa 19 leväbiojalostamon tuotteet on esitetty kategorisoituina kolmeen pääkategoriaan vuoden 2010 näkemyksen mukaisesti. Vuoden 2018 näkemys kuviossa 20 ei eroa merkittävästi tuotteiden osalta, mutta kaaviossa on esillä myös energialähteet sekä teollisuuden kiertotalousmahdollisuus tuottamalla hiilidioksidia leväbioreaktoriin.



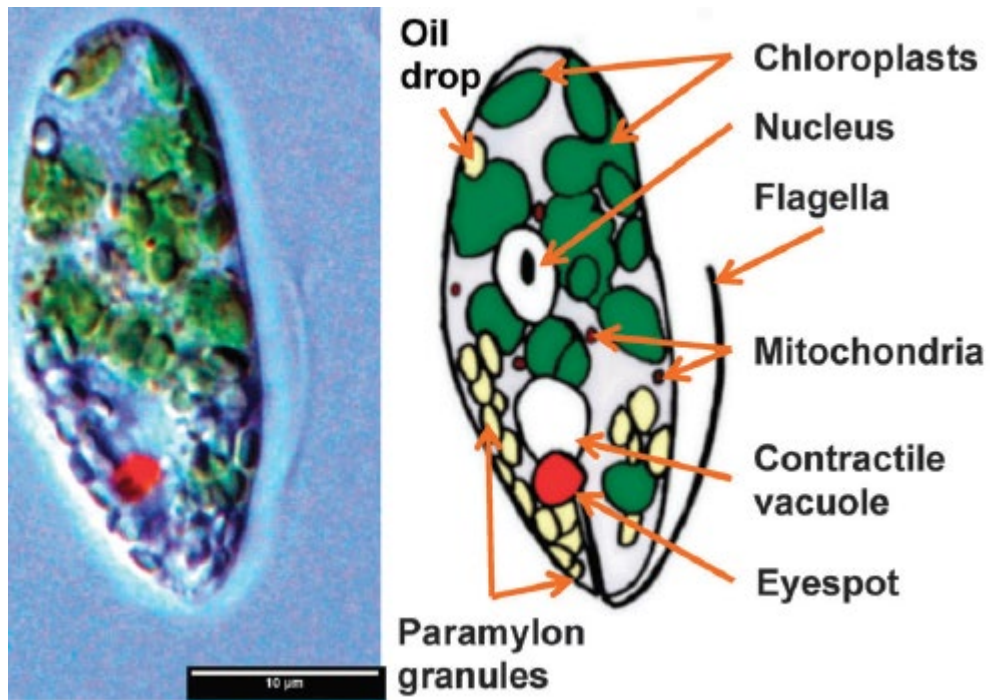
Kuvio 20. Mikroleväkasvatuksen hyödyntämismahdollisuudet biojalostamossa (Giraldo-Calderón, Romo-Buchelly, Arbeláez-Pérez, Echeverri-Hincapié & Atehortúa-Garcés 2018, 220.)

Tuotemahdollisuuksia on siis useita, kunhan sopivat levälajit ja tuotantoteknologiat kartoitetaan pidemmälle. Erityisen tärkeää on kiertotalouden edistäminen ja olemassa olevien ravinteiden ja hiilidioksidin hyödyntäminen leväkasvatusprosessissa. Myös olosuhteiden optimoinnissa erityisesti Suomen ilmastoon on vielä paljon työtä ottaen huomioon valon tärkeyden.

Kasvatuksen optimointiin liittyen on tutkittu esimerkiksi mikrolevän (*Nannochloropsis limnetica*) ja sikalalietteen anaerobista mädätystä. Biokaasua saatiin eniten käyttämällä yhteismädätysprosessia sikalalietteen kanssa ja erilaiset substraatit johtivat hyvin toimivaan prosessiin. Korkein metaanitaso saatiin kuitenkin mädättämällä ainoastaan mikrolevää, eli prosessi kannattaa valita tarkoituksen mukaan. (Tsapekos, Kougias, Alvarado-Morales, Kovalovszki, Corbière & Angelidaki 2018.) Sikalalietteen varaan ei myöskään ole johdonmukaista suunnitella prosesseja, sillä metaanirikkaan eläinperäisen maatalouden vähentäminen lienee joka tapauksessa välttämätöntä muun muassa ilmastomuutoksen torjumiseksi.

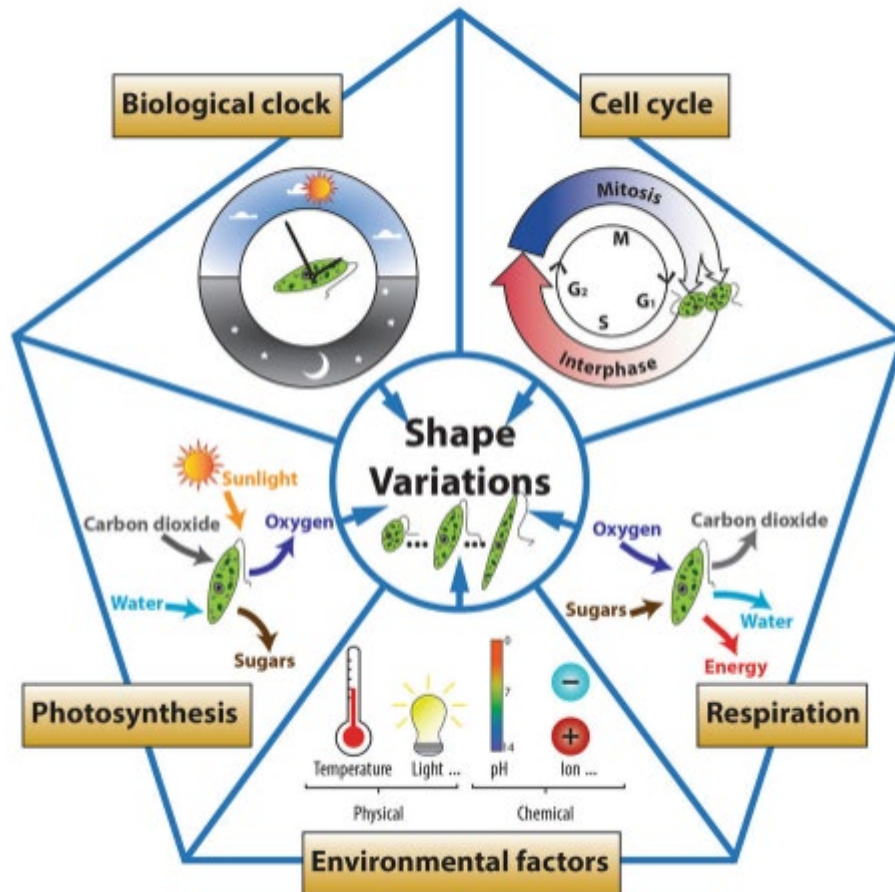
Yhteismädätyksen lisäksi myös useamman levälajin yhteiskasvatuksella on onnistuttu kasvattamaan levämäärää. Lajit saattavat siis kasvaa yhdessä paremmin, mutta toistaalta yksi laji saattaa helposti ottaa vallan, jos olosuhteet ovat toiselle





Kuvio 22. *Euglena gracilis* -mikrolevä (O'Neill ym. 2015, 2)

Laji esiintyy eri muodoissa pitkulaisesta pyöreään, mikä on tärkeä biomarkkeri kyseiselle levälle, sillä muoto näyttää levän fotosynteesin ja soluhengitykseen liittyvän kapasiteetin, solusyklivaiheen sekä ympäristön tilan. Jotta *E. gracilis* -levää voidaan tuottaa ylivoimaisilla ominaisuuksilla kustannustehokkaaseen biodiesel- ja biomassatuotantoon, tulisi kasvattaa puhtaita synkronoituja *E. gracilis* -solupopulaatioita, joissa soluilla on yhteneväinen muoto ja koko (Kuvio 23). Kustannustehokas prosessi vaatii siis hiomista tällaisen yhdenmukaisen leväbiomassan tuottamiseksi. (Li, Muñoz, Goda & Di Carlo 2017, 1-2.)



Kuvio 23. *E. gracilis* -levän muodon vaihtelut korreloivat biologisen kellon, fotosynteesin, soluhengityksen, solusyklin, sekä ympäristöolosuhteiden kanssa. (Li ym. 2017, s. 2)

Kuviosta 23 nähdään, kuinka muotoon vaikuttavat useat eri tekijät. Erityisesti olosuhteita säätämällä voidaan todennäköisesti siis vaikuttaa solun muotoon merkittävästi.

Olosuhteilla voidaan vaikuttaa myös paramylonin tuotantoon. *E. gracilis* tuottaa nimittäin aerobisissa olosuhteissa paramylonia, liukenematonta  $\beta$ -1,3-glukaania, jonka on todettu parantavan ja ehkäisevän erilaisia tauteja, kuten paksusuolen syöpää sekä atooppista ihottumaa. *E. gracilis* -laji tuottaa myös alfatokoferolia sekä betakaroteenia ja sen avulla on raportoitu voitavan määrittää B12-vitamiinin määrää, sekä jäteveden laatua ja muokattujen nanopartikkeleiden ekotoksisuutta. (Li ym. 2017, 1.) *E. gracilis* saattaa siis kyetä tuomaan kaupallista lisäarvoa useaan sovellusalueeseen, mukaan lukien uusiutuva bioenergia, ravitseminen, ympäristö ja terveydenhoito.

*E. gracilis* -lajin hyödyntämistä teollisuudessa yleisesti ottaen puoltaa myös se, että se ei ole patogeeninen riski ihmisille, eli sen kanssa on turvallinen työskennellä. Fotoheterotrofisena lajina se kykenee kasvamaan tavallisen viherkasvin tavoin, mutta myös pimeässä hyödyntämällä useita orgaanisia hiililähteitä, kuten rejektivesikasvatuksessa. Mitä hiilenlähteisiin tulee, lajia on kasvatettu esimerkiksi glukoosin, fruktoosin, laktoosin, maltoosin, sakkaroosin, etanolin ja asetaatin avulla. Typen lähteinä on käytetty mm. tryptonia, peptonia, hiivauutetta, ureaa ja natriumglutamaattia erilaisten aineenvaihduntatuotteiden tuottamiseksi. Lisäksi *E. gracilis* tarvitsee B12-vitamiinia kasvaakseen. Parhaimmat biomassakonsentraatiot on tyypillisesti saatu heterotrofisesti, sillä valon määrä rajoittaa kasvua tiheissä fotoautotrofisissa tuotantoympäristöissä. (Abi, Müller & Jördening 2017, 273.)

Mitä rejektivesikasvatukseen tulee, *E. gracilis* -lajin kasvatusta on tutkittu jonkin verran, esim. Piiparinen, Edelman, Piironen & Spilling (2018). Useat lajit pystyvät kasvamaan laimeassa rejektivedessä (<10%) (Piiparinen, 2018), mutta puhtaan veden käyttö laimentamiseen on kallista. Näin ollen lajitutkimuksia tarvitaan vaativille kasvatusolosuhteille vielä lisää.

### 3 Tutkimusmenetelmät

#### 3.1 Tutkimuksen tausta ja tarve

Luonnonvarat ovat vähenemässä ja maapallon ekologinen tila heikentyy väkiluvun kasvaessa. Ilmastonmuutoksen hidastaminen vaatii siirtymistä fossiilitaloudesta biotalouteen, ja biotalous vaatii kehittämistä, jotta luonnonvarojen käyttö olisi kestäväällä pohjalla. Bio- ja kiertotalous ovat uudehkoja konsepteja, joilla pyritään vastaamaan ihmiskunnan tarpeisiin ekologisesti kestäville tuotantoprosesseilla. Näin ollen teollisuusyritykset pyrkivät vastaamaan kuluttajien ja muiden yritysten tarpeisiin innovoiden samalla uudenlaisia biopohjaisia ja kiertotaloutta edistäviä tuotteita ja tuotantoprosesseja. Tuotteiden elinkaaria pohditaan niiden lähdemateriaalista jätehuoltoon asti yhä enemmän ja erilaisia prosesseja pyritään yhdistämään toisiaan ruokkiviksi laajemmiksi järjestelmiksi. Mikrolevä on tullut esille edellä mainittuihin prosesseihin sopivana tuotteena, mutta sitä on toistaiseksi hyödynnetty varsin vähän erityisesti Suomen olosuhteissa ja sen käyttö vaatii lisää tutkimuksia. Rejektivesikasvatus on todettu yhdeksi mahdollisuudeksi kannattavuuden ja kestävyuden saavuttamiseen, sillä rejektivesi on ravinteikasta ja sitä tuottavia laitoksia ei tarvitse rakentaa erikseen.

#### 3.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimus keskittyi käytännön tasolla keskisuomalaisiin biokaasutuotanto-olosuhteisiin yhden mikrolevälajiesimerkin kautta. *Euglena gracilis* -mikrolevälaji valikoitui alustavien tutkimuskartoitusten pohjalta (esim. Li ym. 2017), sillä se on todettu moniin vaativiin sovelluksiin soveltuvaksi lajiksi. Rejektivesidataa sekä muutamia rejektivesinäytteitä saatiin eräältä keskisuomalaiselta biokaasulaitokselta, jota hyödynnettiin levänkasvupotentiaalin arviointiin liittyvissä mallinuksissa. Laitos valikoitui saadun datan lisäksi lähinnä sijainnin perusteella, sillä se on lähellä työn tilaajaa eli Jyväskylän ammattikorkeakoulua.

Varsinaisiksi tutkimuskysymyksiksi valikoituivat seuraavat kysymykset:

- Mitä mikroleväkasvatus yleisesti ottaen vaatii?
- Onko erilaisia lietteitä käsittelevän case-tutkimuskohteena olevan biokaasulaitoksen rejektivesi soveltuvaa leväkasvatukseen ja mitä vaatimuksia prosessissa on?
- Onko *Euglena gracilis* teoreettisesti soveltuva levä rejektivesikasvatukseen erilaisia lietteitä käsittelevässä biokaasulaitoksessa ja miten se pärjää muille saman levän kasvatusvesille?
- Millaisia valolähteitä ja -määriä mikroleväkasvatukseen tarvitaan?

Näiden kysymysten avulla pyrittiin siis selvittämään mikrolevän rejektivesikasvatuksen potentiaalia Suomessa.

### 3.3 Tutkimusalue ja poisrajaukset

Mikroleväkasvatus on aihepiirinä hyvin laaja, jossa on paljon rajoitteita ympäristöolosuhteista ja ravinteista riippuen sekä toisaalta rajaton määrä mahdollisuuksia levälajien suuren määrän johdosta. Käytännön työskentely ja tutkimus niin ympäristötutkimus- kuin biokaasulaitoksessa rajautui pois, mutta toisaalta aihepiiriä oli mahdollisuus katsoa bio- ja kiertotalouden kehittämisen näkökulmasta yleisemmin. Työssä pyrittiin huomioimaan myös kansainväliset ja suomalaiset strategiat ja tavoitteet, joilla pyritään varmistamaan yhteiskunnallinen kestävyys ja hyvinvointi. Työ tehtiin siis tutkimalla kirjallisuutta, raportteja, lakeja, esityksiä sekä rejektivesinäytedataa, kuten myös konsultoimalla Suomen ympäristökeskusta ja käyttämällä sieltä saatuja kaavoja ja menetelmiä rejektivesimallinnukseen liittyen.

Tutkimuksesta on rajattu pois käytännön mikroleväkasvuanalyysit, sillä varsinaisia leväkasvatusmahdollisuuksia ei työtä kirjoittaessa ollut ja siihen liittyvää tutkimusta tehdään Suomessa hyvin ammattimaisella tasolla. Rajauksia oli tehtävä myös esimerkiksi taloudellisissa laskelmissa, levälajien kartoittamisessa ja monessa muussa mielenkiintoisessa ja aihetta ympäröivässä asiassa, jotta työ voitiin tehdä oikeassa mittakaavassa sekä keskittyä biotalouden kehityksen näkökulmaan riittävästi. Rajauksia tehtiin myös ajallisessa mielessä niin, että työ oli mahdollista suorittaa opintojen normaalin aikataulun ja vaatimusten mukaisesti. Lisäksi rajausta tehtiin jättämällä tutkimuksen kohteena olleen biokaasulaitoksen nimi mainitsematta, sillä se ei ollut tutkimuksen kannalta olennainen tieto.



### 3.4 Tutkimusajanjakso

Ensimmäiset hahmotelmat alkoivat syystalvella 2017, mutta ajallisesti tutkimus sijoittui pääasiassa vuoteen 2018. Ensimmäiset rejektivesinäytteet otettiin helmikuussa 2018 ja tuloksia saatiin maaliskuussa. Pidemmän aikavälin dataa saatiin laitokselta käyttöön vielä 2018 kesän ja syksyn aikana. Suomen ympäristökeskukselta saatiin menetelmiin liittyviä suosituksia marraskuussa 2017 ja saadun datan pohjalta kehitettyjä mallinnuskaavoja lokakuussa 2018. Kirjallisuuteen ja asiantuntijamielipiteisiin tutustuminen sijoittui pääasiassa vuoteen 2018.

### 3.5 Tutkimusaineisto

#### 3.5.1 Aineiston kerääminen

Koska tutkimuskysymyksiin oli tarkoitus vastata suureksi osaksi teoreettiselta pohjalta, pyrittiin lähteinä käytetty kirjallisuus, raportit, dokumentit, esitykset ja keskustelut valitsemaan luotettavilta tahoilta tutkimusportaaleista sekä alan asiantuntijoiden kautta. Lähteitä haettiin pääasiassa kansainvälisistä tietokannoista, Itävallasta *8th European Algae Industry Summit* -leväkonferenssista sekä suomalaisten biotaloutta edistävien tutkimuslaitosten julkaisuista.

Rejektivesinäytteet käytiin hakemassa suoraan tutkimuksen case-kohteena olleelta biokaasulaitokselta. Prosessiin liittyvien haitta-aineiden vuoksi näytteet otti laitoksen oma prosesseista vastaava ja prosessiin liittyvät turvalliset työtavat tunteva laatuinsinööri. Jätevesinäytteenotolle pätee standardi ISO5667-10, ja ympäristöhallinto on antanut ohjeita organisaatioille myös työsuojelusta vesi- ja ympäristönäytteenotossa ja hydrologisissa mittauksissa. Näitä valvoo FINAS – Suomen kansallinen akkreditointielin. (Westerholm, Björklöf, Gustaffson, Marttila, Palanne, Saares, Saukkonen & Harjuoja 2014.)

Näytteenottosuunnitelma oli tehty JAMKin projektipäälliköiden toimesta laitokselle mentäessä. Näytteitä otettiin prosessin kahdesta eri vaiheesta noin viiden minuutin

sisällä – ennen mädätystä sekä mädätyksen jälkeen. Rejktivesi oli valmiiksi erotettu kiinteästä fraktiosta prosessiin integroidun suodatuslaitteiston avulla. Rejktivettä otettiin molemmista kohdista noin kymmenen litraa, jotta tarvittavat analyysit voitiin varmasti tehdä. Rejktivesinäytteet otettiin kertanäytteinä reaktorin poistoventtiilien kautta muovisiin näyteastioihin, jotka projektiryhmä toi Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalouskampukselta mukanaan. Tämän jälkeen näytteet kuljetettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun laboratorioon, jossa ne pakastettiin ja analysoitiin kuun lopussa. Tämän tarkempaa suunnitelmaa tai toimenpidettä ei katsottu tarpeelliseksi tehdä, sillä rejktiveden koostumus yhteen päivään perustuvassa mittauksessa on joka tapauksessa vain suuntaa antavaa ja toisaalta työn tarkoituksena oli tutkia kasvatuspotentiaalia yleisemmällä tasolla. Näytteiden lisäksi saatiin rejktivesianalyysidataa myös pidemmältä aikaväliltä, joka oli hyödyllistä perustellumpien johtopäätösten tekemiseksi.

### 3.5.2 Aineiston käsittely

Kirjallisuutta ja tutkimuksia käytiin läpi melko laajalti, ja näkökulmina käytettiin lähinnä ekologista, teknistä, kaupallista ja yhteiskunnallista viitekehystä, joihin työhön liittyvä luonnonvara-alan ja biotalouden kehittämisen koulutus perustuu. Suurimpaan osaan tutkimuskysymyksistä vastattiin kirjallisuuden ja kvalitatiivisen tutkimuksen pohjalta.

Lisäksi tutkittiin kvantitatiivisempaa aineistoa rejktivesinäytteisiin liittyen.

Näytteistä mitattiin seuraavat ravinteet SYKE:n suositusten perusteella (Seppälä & Piiparinen 2017):

- Kokonaistyyppi (tot-N)
- Kokonaisfosfori (tot-P)
- Fosfaatti ( $\text{PO}_4$ )
- Ammonium ( $\text{NH}_4$ )

Lisäksi määritettiin hivenaineet

- mangaani (Mn)
- sinkki (Zn)

Kyseisten hivenaineiden määrän optimoinnilla voidaan mahdollisesti kehittää kasvutahtia sekä biomassan kasvupotentiaalia. Eräillä levälajeilla saatiin selkeää kasvuvaihtelua sinkkipitoisuusvälillä 0.06-0.09 mg/l ja kasvua oli eniten kun sinkin määrä oli korkeimmillaan. (Radzun, Wolf, Zhang, Stephens, Ross & Hankamer 2014, 7).

Tämän lisäksi laitokselta saatiin hieman myöhemmin viiden kuukauden ajalta valmista dataa noin 60:sta rejektivesinäytteestä. Yleisesti ottaen näytteissä voi olla eri ajanjaksoina paljonkin vaihtelua jätteiden sisällöstä riippuen, joten datasta huomioitiin sekä keskiarvo että ääriarvot skaalan molemmissa päissä.

Laatuinsinöörin ottamien sekä laitokselta saatujen tulosten arvoja vertailtiin toisiinsa rejektiveden stabiilisuuden määrittämiseksi sekä yksittäisen näytteenoton merkitsevyyden määrittämiseksi.

Tämän jälkeen dataa käsiteltiin Suomen ympäristökeskuksen Jukka Seppälän mallinnusmenetelmien avulla (Seppälä, 2018) sekä kirjallisuusarvojen että tehtaalta saatujen arvojen kautta ja niitä vertailemalla. Levätuotannon potentiaali tehtaalla aloitettiin pyrkimällä selvittämään seuraavat lähtöarvot tutkimuksen case-kohteena olevasta laitoksesta:

- rejektiveden määrä (tn/a), joka muunnettiin muotoon l/a (tn/a \* 1000)
- kokonaistyyppi (mg/l), joka muunnettiin muotoon kg/l (rejektiveden määrä l/a \* kokonaistyyppi (mg/l) / 1 000 000)
- kokonaisfosfori (mg/l), joka muunnettiin muotoon kg/a (rejektiveden määrä l/a \* kokonaisfosfori (mg/l) / 1 000 000)

Nämä laskettiin ensin kirjallisuusarvojen perusteella (ks. Taulukko 1.). Käytännössä laskettiin typen ja fosforin painosuhte (kg/kg) jakamalla kokonaistyyppi (kg/a) ja kokonaisfosforin määrällä (kg/a). Oletuksena oli, että tyyppiä on riittävästi ja näistä kahdesta fosforin määrä ratkaisee levätuotantopotentiaalin. Hivenaineiden vaikutusta ei otettu huomioon. Oletuksena oli myös se, että vesi laimennetaan levälle optimaaliseksi ja että levä on optimaalista kasvatukselle. Leväsolujen painoyksiköitä eri painosuhteille tarkasteltiin kirjallisuusarvojen kautta, jotta voitiin arvioida kuivapainona tai hiilenä, kuinka paljon rejektiveden sisältämällä fosforilla voidaan kasvattaa levää. Olennaisia parametreja olivat siis kuiva- ja märkäpaino, hiilen, typen ja fosforin määrät, sekä myös klorofyllin määrä. Potentiaali laskettiin

myös näihin liittyvillä kirjallisuuden viitearvoilla, jotka ovat listattuina taulukossa 1 alla.

Taulukko 1. Kirjallisuusarvot mikroleväkasvatuksen paino- ja sisältösuhteille (Seppälä 2018, 3.)

Suhde	Kirjallisuusarvot suhteille (kg/kg)
<b>Kuivapaino:Märkápaino (DW:FW)</b>	0.2
<b>Hiili:Märkápaino (C:FW)</b>	0.11
<b>Hiili:Typpi (C:N)</b>	6
<b>Hiili:Fosfori (C:P)</b>	41
<b>Typpi:Fosfori (N:P)</b>	6.8
<b>Hiili:Klorofylli (C:Chl)</b>	40

Näin voitiin mallinnuksen avulla laskea potentiaalinen kuivapaino vuosittaiselle levätuotannolle. Tämä saatiin kertomalla oletettu märkápaino (FW eli fresh weight) DW:FW-kirjallisuusarvosuhteluvulla 0,2. Sen jälkeen voitiin laskea hiilen, typen, fosforin ja klorofyllin osuus kuivapainosta:

$C \text{ kg} = \text{kg (FW)} * 0.11$  eli aiemmin laskettu märkápaino kerrottiin C:FW-luvulla

$N \text{ kg} = C \text{ kg} / 6$  eli hiilen määrä jaettiin C:N-luvulla

$P \text{ kg} = C \text{ kg} / 41$  eli hiilen määrä jaettiin C:P-luvulla

$Chl \text{ kg} = C \text{ kg} / 40$  eli hiilen määrä jaettiin C:Chl-luvulla

Sama pyrittiin tekemään tehtaalta saaduilla luvuilla.

Teoreettisesti yhden leväkilon tuottamiseen autotrofisesti tarvitaan 2 kg hiilidioksidia, mutta koska hävikkiä käytännön tasolla on paljon, tarvitaan hiilidioksidia yleisesti ottaen noin viisinkertainen määrä, eli noin 10 kg CO<sub>2</sub> per 1 kg levää. Toisaalta jos käytössä olisi fotoautotrofisen *Euglena gracilis*, hiilidioksidia ei välttämättä tarvittaisi yhtä paljon. (Seppälä, 2018, s. 3.) Koska laskelmia ei kuitenkaan tehty juuri *Euglena gracilis* -lajille vaan yleisemmässä

kartoitustarkoituksessa, saatu leväkilomäärä kerrottiin kymmenellä tarvittun hiilidioksidimäärän määrittämiseksi.

Levätuotantopotentiaalin arvioiminen vaatii myös arviota pinta-alatarpeista, ja tässä työssä pinta-alavaatimuksia arvioitiin vuotuisen auringonvalodatan avulla. EU:n Photovoltaic Geographical Information System -online-työkalusta katsottiin ensin säteilyarvodata Jyväskylälle, jotta saatiin käsitys säteilystä nimenomaan Keski-Suomessa. Saadut säteilyarvot ( $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) muunnettiin yksiköihin  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , josta laskettiin levämäärän sitoma energia. Biomassa oletettiin kaloriarvoksi  $25 \text{ kJ / g}$  ja sen jälkeen laskettiin skenaariot 1, 5 ja 11 % hyödyntämistehokkuuksille. SYKEN menetelmä perustuu tutkimukseen (Williams & Laurens, 2012), jossa on perehdytty muun muassa fotosynteesin aikana tapahtuvaan energiakatoon (Taulukko 5. lähteessä Williams & Laurens, 2012) sekä valon hyödyntämistehokkuuksiin (Kuvio 18. lähteessä Williams & Laurens, 2012).

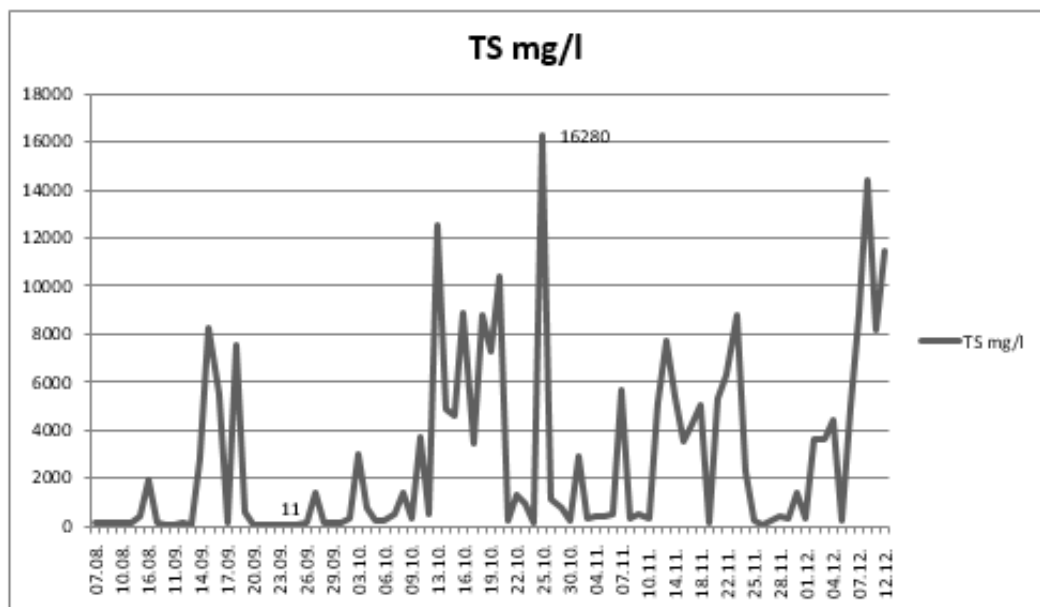
## 4 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu

Alla olevissa kappaleissa vastataan työn tutkimuskysymyksiin.

### 4.1 Analysoidun rejektiveden soveltuvuus mikroleväkasvatukseen

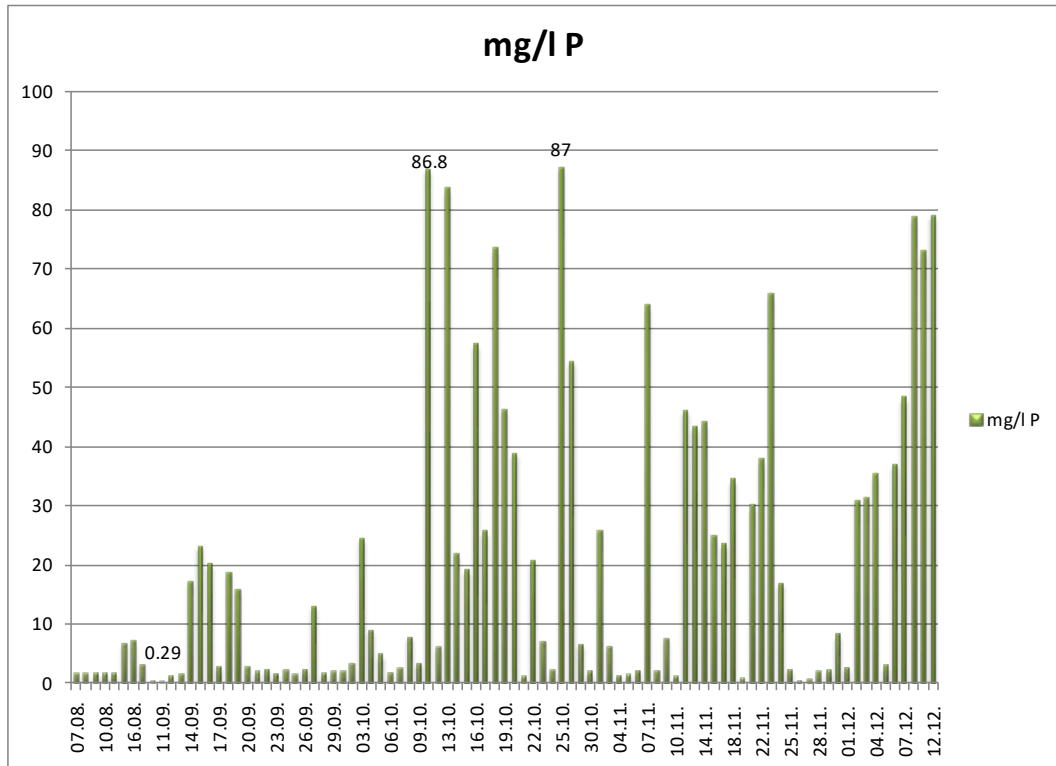
#### 4.1.1 Rejektiveden stabilisuus

Tehtaalta saadun pidemmän aikavälin näytteiden mukaan rejektiveden laatu vaihtelee paljon. Se näkyy esimerkiksi kiintoainepitoisuudessa.



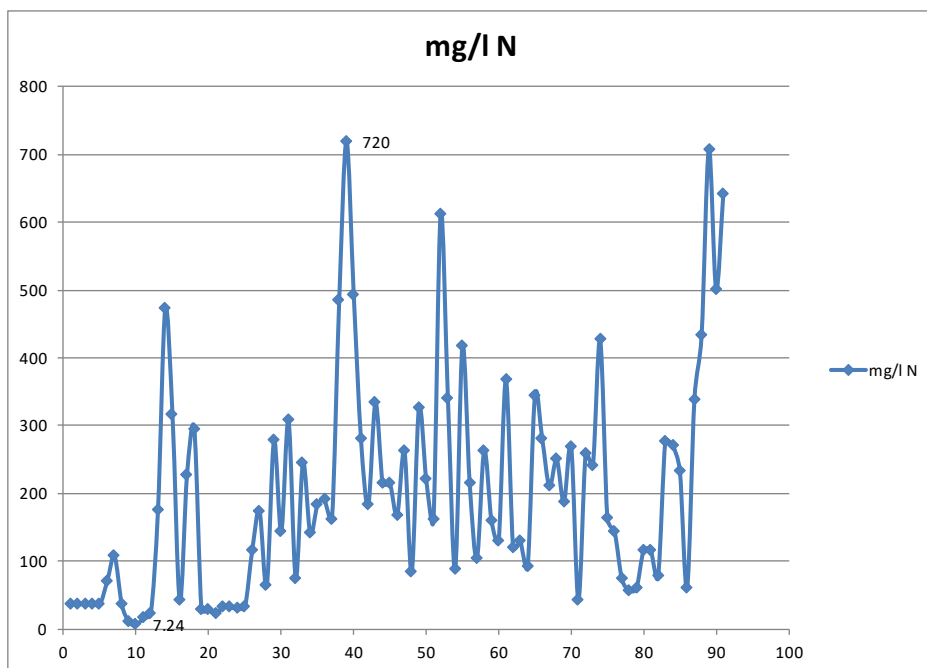
Kuvio 24. Total solids (TS) eli rejektiveden kiintoainepitoisuus näytteenottoajan-jaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018)

Vaikuttaa siltä, että fosforin ja typen vaihtelut ovat yhteydessä kiintoaineen määrään. Kuvio 25 voidaan nähdä samankaltainen vaihtelu.



Kuvio 25. P-tot eli kokonaisfosforin määrä näytteenottoajanjaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018)

Kokonaistypen määrä seuraa samankaltaista vaihtelua (Kuvio 26). Typen määrä siis kasvaa vähitellen tutkimusjakson aikana.



Kuvio 26. Kokonaistypen vaihtelu näytteenottoajanjaksolla (Julkaisematon näyteraportti 2018)

Kiintoaineen määrä vaikuttaisi siis olevan olennainen tekijä typen ja fosforin kontrolloinnissa, mutta Taulukko 2 selventää asiaa korrelaatioanalyysin kautta.

Taulukko 2. Kiintoaineen, kokonaisfosforin ja kokonaistypen korrelaatiovertailu.

Aine	Kiintoaine
Kokonaisfosfori	0.83
Kokonaistyyppi	0.51

Voidaan nähdä, että erityisesti fosforilla ja kiintoaineella vaikuttaisi olevan korrelaatiota. Regressioanalyysin avulla voitiin laskea, että selitysaste kiintoaineen ja kokonaisfosforin välillä on 68,4 % eli reilusti yli puolet fosforin vaihtelusta voidaan regressioanalyysin mukaan selittää kiintoaineen määrän vaihtelulla.

Yksittäisten testien osalta helmikuussa 2018 tehtiin seuraavat analyysit (Taulukko 3.). Taulukosta nähdään, että kiintoaine on ymmärrettävästi vähentynyt mädätysprosessin jälkeen erotetusta rejektivedestä. Näitä lukuja ei kuitenkaan voi suoraan verrata keskenään, sillä mädätettävästä aineksestä on mädätyksen aikana on vapautunut alkuaineita.

Taulukko 3. Jyväskylän ammattikorkeakoulun suorittamat rejektivesianalyysit helmikuussa 2018

Parametri	Ennen mädätystä (mg/l)	Mädätyksen jälkeen (mg/l)	Muutos
Kiintoaine	1604.5	178.0	-89%
Kokonaistyyppi	23.4	270.0	1056%
NH <sub>4</sub> -N	5.1	2.2	-57%
Kokonaisfosfori	10.9	6.8	-38%
PO <sub>4</sub> -P	6.1	4.6	-26%
Sinkki (Zn)	0.8	0.5	-39%
Mangaani (Mn)	2.9	15.7	441%
pH	7.5	8.0	7%

Mangaanin arvo on huomattavasti suurempi mädätyksen jälkeen, mutta erityisesti tähän tulee suhtautua varauksella, sillä rejektiveden sameus on saattanut vaikuttaa analyysitulokseen tehden siitä virheellisen. Näiden yksittäisten tulosten perusteella ei kannattane tehdä suuria johtopäätöksiä ottaen huomioon rejektiveden todetut suuret vaihtelut niin kiintoaineessa kuin esimerkiksi typpi- ja fosforiarvoissa. On kuitenkin hyvä ymmärtää, että yksi ensisijaisista tehtävistä ennen



mikroleväkasvatusta lienee biokaasuprosessin kehittäminen mahdollisimman vakaaksi.

#### 4.1.2 Vuosittaisen levätuotannon arviointi

Lähtötietojen avulla arvioitiin myös potentiaalinen kuivapaino vuosittaiselle levätuotannolle. Viimeisin keskimääräiseksi arvioitu kokonaistyyppi tehtaalla marraskuussa 2018 tehdyn arvion perusteella oli 248 mg/l ja kokonaisfosfori 27,7 mg/l perustuen n. 30 % otokseen kokonaisvirtaamasta 700 000 m<sup>3</sup>. Tämä on otoksena melko kattava, mutta keskittyy vain osaan vuotta, joka saattaa vaikuttaa kokonaisuuteen. Näin ollen N-tot on vuositasolla 173 600 kg ja P-tot on 19 390 kg (Taulukko 4). N:P-suhde on noin 9 eli melko lähellä levien optimaalista N:P-painosuhdetta 6.8. Samoin kuin viiteraportissa (Seppälä 2018), tässäkin fosforin määrä määrittää syntyvän leväbiomassan määrän ja oletetaan, että rejektivesi laimennetaan optimaaliseksi leväkasvatusta ajatellen.

Taulukko 4. Case-tehtaan lähtötiedot sekä lasketut vuositasoiset määrät ja N:P-suhde

Parametri	Arvo	Yksikkö
Rejektiveden määrä	700 000	tn/a
	700 000 000	l/a
Kokonaistyyppi	248.00	mg/l
	173 600	kg/a
Kokonaisfosfori	27.70	mg/l
	19 390	kg/a
Typen ja fosforin suhde	8.95	kg/kg

Fosforia on noin 9,7 kertaa enemmän (19 390 kg/a) kuin viiteraportin tapauksessa (2000 kg/a), jossa leväbiomassa-arvion märkäpaino on 754 454 kg vuodessa.

Käytetään siis samassa suhteessa laskettua arvoa 7 318 200 kg vuodessa märkää leväbiomassaa, jonka kuivapaino on SYKEN mallin mukaisesti laskettuna **noin 1 463 640 kg vuodessa** kun fosforin määrä on 19 390 kg/a.

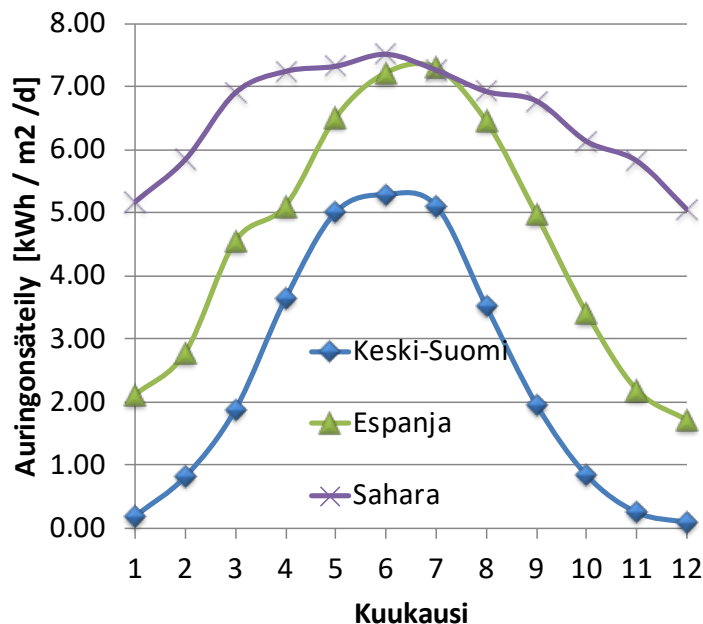
Taulukko 5. Teoreettinen leväbiomassatuotanto case-tutkimuksen kohteen tehtaalla vuositasolla perustuen fosforin määrään ja vertailulaitokseen.

Parametri	Lyhenne	Kg
Märkäpaino	FW	7 318 200
<b>Kuivapaino</b>	<b>DW</b>	<b>1 463 640</b>
Hiili	C	805 002
Typpi	N	173 600
Fosfori	P	19 390
Klorofylli	Chl	20 125

Hiilen määrä on arviolta 802 002 kg, kuten taulukosta 5 nähdään, joten **levätuotanto tarvitsisi tuekseen 8 020 020 kg hiilidioksidia**, jota saadaan rejektiveden orgaanisista yhdisteistä. Tämä perustuu aiemmin mainittuun viiteraportin arvioon (10 kg CO<sub>2</sub> per 1 kg levää).

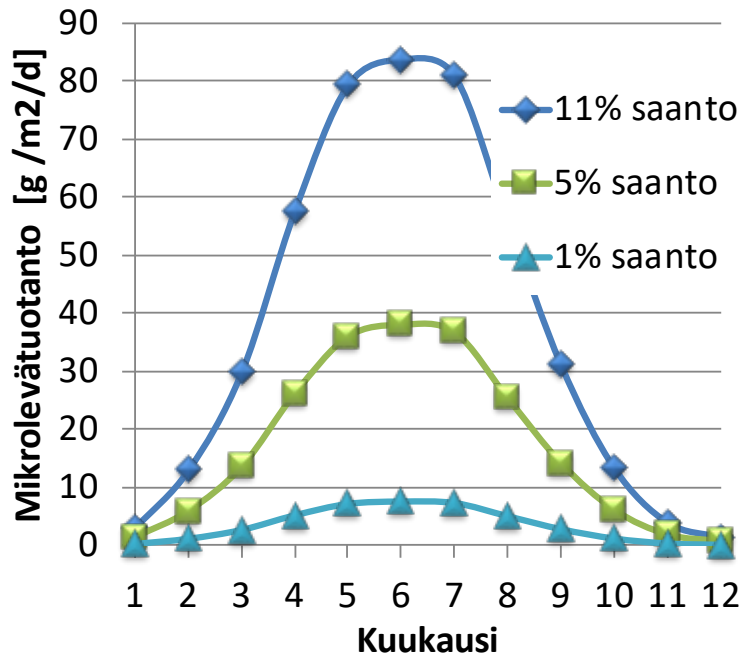
Jos leväbiomassaa saataisiin vuositasolla laskennallinen määrä **1 463 640 kg** olettaen, että muut ravinteet ja olosuhteet olisi optimoitu, voidaan seuraavaksi tarkastella tämän määrän vaatimaa kasvatuspinta-alaa.

EU:n Photovoltaic Geographical Information System -online-työkalusta saatu säteilyarvodata Keski-Suomelle oli keskimäärin 2,38 kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Kuukausitasoinen vaihtelu esitetään vertailuna alla Saharan ja Espanjan säteilyarvojen kanssa.



Kuvio 27. Auringonsäteilyn jakauma Keski-Suomessa verrattuna Espanjaan ja Saharaan.

Kuten kuviosta 27 voidaan nähdä, auringonvaloa on selvästi vähemmän Suomessa kuin Espanjassa tai Saharassa. Kuvion 27 auringonsäteilyarvot muunnettiin yksiköihin  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , jotta voitiin laskea levämäärän sitoma energia biomassan kaloriarvolla 25 kJ / g sekä skenaariot 1, 5 ja 11 % valonhyödyntämistehokkuuksille, jotka perustuvat viiteraportin mallinnusesimerkkiin (Seppälä 2018).



Kuvio 28. Levätuotantoskenaariot vuositasolla 1, 5, ja 11 % valon hyödyntämistehokkuuksilla.

Todennäköisin hyödyntämistehokkuus on 1 % ja tulevaisuudessa päästään mahdollisesti 5 % tehokkuuteen (Seppälä 2018). Kun tarkastellaan 1 463 640 kg mikrolevätuotantoa (kuivapaino) yhden prosentin perusteella (Taulukko 6.), **yhden hehtaarin vuosituotanto olisi Keski-Suomessa noin 11 633 kg levää** (kuivapaino), kun talvikuukaudet on poistettu. Tämä tarkoittaa teoriassa sitä, että **1 463 640 kg tuotantoon tarvittaisiin noin 125,8 ha alue**.

Taulukko 6. Laskennallisen kesäkuukausina tapahtuvan keskisuomalaisen levätuotannon tarvitseman pinta-alan määrittäminen 1 % valon hyödyntämistehokkuudella.

	Päivät	kg levän kuivapaino ha-1 kk- 1 (1 % hyötysuhde)	Talvikuukaudet poistaen (alle 5 Mj m-2 d-1)
Tammikuu	31	84.8	
Helmikuu	28	329.0	
Maaliskuu	31	839.2	839.2
Huhtikuu	30	1 572.5	1 572.5
Toukokuu	31	2 236.5	2 236.5
Kesäkuu	30	2 285.3	2 285.3
Heinäkuu	31	2 281.1	2 281.1
Elokuu	31	1 571.3	1 571.3
Syyskuu	30	846.7	846.7
Lokakuu	31	374.5	
Marraskuu	30	107.6	
Joulukuu	31	40.2	
<b>1 ha vuosituotanto</b>		12 568.7	<b>11 632.6</b>
<b>Kokonaistuotanto</b>		6 700.0	<b>1 463 370.0</b>
<b>Vaadittava pinta-ala</b>		0.5	<b>125.8</b>

Hyödyntämistehokkuus voi lisäksi vaihdella valomäärän mukaan liian korkeassa tai matalassa säteilyaltistuksessa, ja talvikuukausina noin viiden kuukauden ajan vettä tulisi joko varastoida tai ohjata muualle (Seppälä 2018). Jos levästä saatava lopputuote on arvokas voidaan talvikuukausiakin mahdollisesti saada käyttöön, jos keinotekoinen valaistus ja lämmitys on kannattavaa. Malli on kuitenkin tehty optimaaliselle levälle, joka on tiedostaa kun mallia käyttää.

#### 4.2 *Euglena gracilis* -mikrolevän soveltuvuus rejektivesikasvatukseen

*Euglena gracilis* vaikuttaisi olevan ainakin teoreettisesti soveltuva levä biokaasulaitoksen rejektivesikasvatukseen, sillä todisteita sen kasvusta rejektivedessä löytyy ainakin laboratoriomittakaavassa, kuten aiemmin on todettu (esim. Spilling, 2013), mutta muitakaan lajeja ei kannata unohtaa, sillä myös yhteiskasvatus on todettu tehokkaaksi.

*E. gracilis* -lajilla on erityisiä ominaisuuksia, jotka voivat tehdä siitä korkean lisäarvon tuotteen riippuen tarpeesta, jatkokäsittelystä, kasvatusvedestä ja puhdistusmahdollisuuksista. Vesijohtovesikasvatus voi antaa mikrolevälle merkittäviä korkean lisäarvon mahdollisuuksia lääke- ja elintarviketeollisuudessa, kun taas rejektivesikasvatettu levä tuottaa lopputuotteita lähinnä pigmentti-, lannoite-, tai energiatarkoituksiin.

Eräs tämän levälajin vahvuus on sen fotoautotrofisuus, eli se kykenee yhteyttämään heterotrofisesti kasvien lailla sekä autotrofisesti ilman valoa, eikä todennäköisesti myöskään vaadi yhtä paljon hiilidioksisia kuin heterotrofiset levät.

### 4.3 Mikrolevän rejektivesikasvatuksen vaatimukset

Kirjallisuuden ja case-tutkimuksen perusteella vaikuttaa siltä, että mikroleväkasvatus Suomen olosuhteissa on teknologisessa mielessä toistaiseksi melko haasteellista. Yleinen ilmapiiiri ja kehitysmahdollisuudet vaikuttavat kuitenkin hyviltä ja innovointia tuetaan Suomessa erilaisten hankkeiden kautta. Mahdollisuuksia siis on ja mikroleväteollisuus vaikuttaa tällä hetkellä kehittyvän globaalilla tasolla. Myös Suomessa tehdään alaan liittyvää tutkimusta.

#### 4.3.1 Kannattavuusvaatimukset

Laajemmassa kuvassa yhdeksi tärkeimmistä vaatimuksista mikroleväkasvatukselle vaikuttaisi olevan **lopputuotteen korkeahko arvo**, joka mahdollistaa tehtaan ja prosessin tarpeet sekä ylläpitää toimintaa kestäväällä pohjalla. Näin ollen kehityksen tulee olla asiakaslähtöistä ja keskittyä eritoten arvonluontiin joko lopputuotteissa tai esimerkiksi biokaasutehtaan sisäisissä elinkaarikustannuksissa ja kestävydessä.

Kannattavuutta on hyvä miettiä myös laajemmalla tasolla, eikä jättää kehitystä yksittäisten laitosten varaan. Kuten aiemmin on todettu, biokaasu- ja biotuotelaitoksilla on merkittävä rooli Suomen maaseudun ja alueiden kehityksessä

ja yhteiskunnallisessa hyvinvoinnissa. On siis olennaista, että Suomen innovaatioympäristö pysyy otollisena tässä suhteessa.

#### 4.3.2 Teknologiavaatimukset

Kuten aiemmin todettiin, päätelmiä parhaasta mahdollisesta teknologiasta on olemassa muun muassa anaerobiselle mädättämiselle, mutta mikroleväteknologiat vaikuttavat olevan vielä kehitysasteella kaikkialla. Kehittymistä ei valitettavasti nopeuta se, että teknologiatarpeet vaihtelevat laajasti ilmastollisista olosuhteista riippuen valon ja lämpötilan määrittäessä kasvatuksen kustannustehokkuutta. Tarvitaan myös pinta-alaa joko leväbioreaktoriputkistojen tai allaskasvatuksen avulla, ravinnerikasta rejektivettä, sekä mahdollisia lisäravinteita, joiden lisääminen ei kuitenkaan ole kustannustehokasta.

Kuten useat kriittiset prosessit, myös mikroleväkasvatus vaikuttaa tarvitsevan prosessin jatkuvatoimista olosuohdehallintaa, jotta kriittisiä kontrollipisteitä voidaan seurata ja prosessia säätää tarpeen mukaan. Tämä kaikki vaatii osaavaa henkilökuntaa ja soveltuvaa IT-arkkitehtuuria.

Koska rejektiveden ominaisuudet ovat vahvasti riippuvaisia syötetystä jätteestä sekä prosessin tasalaatuisuudesta, on tärkeää panostaa myös mädätysprosessin optimointiin ja monitorointiin rejektiveden kannalta.

Rejektivesi vaatii todennäköisesti laimentamista tai käsittelyä levälajista huolimatta, jotta mikrolevän kasvu on mahdollista. Näin ollen laitoksen vedenhallinta kannattaa suunnitella sen mukaisesti hyödyntämällä esimerkiksi muita tehtaan prosessivesiä tai hulevesialtaita. Myös vesijohtovesi voinee tulla kyseeseen, kun lopputuote on riittävän arvokas.

Sopivien levälajien löytyminen on myös kriittistä prosessin kannalta. Eri lajien yhteiskasvatus vaikuttaa lupaavimmalta tavalta niiden erilaisten ominaisuuksien vuoksi. Mikroleväkasvatuksen pääasiallinen tarkoitus tehtaan ja yrityksen kannalta on kuitenkin tärkeässä roolissa liittyen siihen, mitä lajeja ja teknologioita kannattaa käyttää. Jos tavoitteena on esimerkiksi tuottaa levästä biopolttoainetta, kannattaa laji valita sen mukaisesti. *E. gracilis* -laji saattaa tietyissä olosuhteissa tuottaa paljon

rasvahappoja, mutta toisaalta sen rasvahappokoostumus ei välttämättä ole paras mahdollinen juuri biopolttoaineeksi joihinkin muihin lajeihin verrattuna. Myös kasvatusalusta ja -olosuhteet vaikuttavat *Euglenan* koostumukseen; rejektivedessä kasvatettu *Euglena* ei sisällä rasvahappoja erityisen paljon (Piiparinen 2018).

#### 4.3.3 Ekologisen kehityksen vaatimukset

Mikrolevän rejektivesikasvatus ei ole tällä hetkellä todistetusti kestävää Suomen olosuhteissa, mutta voi tuki tulevaisuudessa olla sitä, jos prosessi ja infrastruktuuri saadaan toimivaksi ja mikroleväkasvatusta tukevaksi. Mikrolevällä on kyky sekä puhdistaa rejektivettä että tuottaa erilaisia lopputuotteita usealle teollisuudenalalle, joten myös kasvatuksen tarkoitus vaikuttaa vaatimuksiin. Yritystasolla on hyvä tehdä kestävä valmistuksen katsaus joka tapauksessa esimerkiksi OECDn ohjeistuksen ja indikaattoreiden avulla (OECD 2012).

#### 4.3.4 Yhteiskunnan kehittymisen vaatimukset

Biokaasulaitosten on katsottu olevan erityisesti maaseudun hyvinvointia kehittäviä, ja mikrolevä saattaa auttaa tehostamaan niiden toimintaa tulevaisuudessa. Jos siihen kyetään, mikroleväteollisuus voi biokaasuteollisuuden ohella olla tulevaisuudessa merkittävä työpaikkojen lisääjä.

Kannattavan mikrolevätuotannon mahdollistaminen vaatii myös ekologista ja yhteiskunnallista kestävyttä, kuten periaatteessa mikä tahansa tuotanto, ja tämä tarkoittaa teollisuuden, infrastruktuurin ja yhteiskunnan kokonaisvaltaista suunnittelua mikrolevä- ja muuta biotuotetuotantoa tukevaksi. Yhteiskunnan näkökulmasta siis vaatimuksena vaikuttaisi olevan teollisuuden ja tutkimuslaitosten sujuva yhteistyö, alaa tukeva infrastruktuuri sekä uudenlaista vesiviljelyä tehostava lainsäädäntö ja rahoitusmallit, jotka kaikki vaikuttavat lupaavilta.

## 5 Johtopäätökset

Mikrolevän rejektivesikasvatus Suomessa teollisessa mittakaavassa on tulevaisuudessa teoriassa mahdollista ja sillä voi olla merkittävä rooli kestävän ekologisen, kaupallisen, teknologisen ja yhteiskunnallisen kehityksen edistämässä, jos kasvatuksesta saadaan kannattavaa. Lisää ymmärrystä tarvitaan vielä tutkimusten, elinkaariarviointien sekä käytännön kokeilujen kautta.

Toistaiseksi ei vaikuta olevan vielä yhtäkään lähdettä todistamaan mikrolevän rejektivesiviljelyn kestävyttä suomalaisessa tai muissa pohjoisissa tehdasympäristöissä, mutta tilanne voi muuttua, kun biokaasutehtaat kehittyvät edelleen, levälajeja ja toimivia yhteiskasvatusmenetelmiä löydetään lisää ja rejektiveden tasalaatuisuutta päätetään ottaa hallintaan esimerkiksi mikroleväviljelyn edistämiseksi tai muusta syystä.

Aihealue on siis toistaiseksi haastava, sillä mikrolevälajeja on useita, rejektivesien ominaisuudet vaihtelevat eikä biokaasutehtaiden teknologiaa olla juurikaan kehitetty rejektivesien hallinnan osalta, sillä vedet voidaan ohjata esimerkiksi jätevesipuhdistamoihin laitosten ulkopuolelle.

Haasteet vaikuttavat kuitenkin kohtalaisen selkeiltä. Esimerkiksi typen ja fosforin yhteys kiintoaineen määrään viittaa siihen, että rejektivettä voitaisiin mahdollisesti suodattaa kiintoaineen poistamiseksi sopivassa kohdassa prosessia ja näin tasalaatuistaa rejektiveden ominaisuuksia.

Yleisesti ottaen mikrolevän rejektivesiviljelyllä olisi useita kestävästä kehitystä edistäviä piirteitä, kuten suuri hiilidioksidin tarve, rejektivettä hyödyntävä uusiutuva biomassa sekä potentiaali erilaisiin bio- ja kiertotaloutta edistäviin lopputuotteisiin. Nämä piirteet sopivat esimerkiksi IPCC:n esittämiin hiilineutraaliuteen pyrkiviin kehityspolkuihin (Kuvio 1.). Lämpimissä maissa kannattavuus on olosuhteiden vuoksi parempi, mutta Suomessa ja muissa kylmien olosuhteiden maissa kannattavuutta voidaan saada teknologisella kyvykkyydellä yhdistää erilaisia prosesseja tehdasinfrastruktuurissa, jolloin lämpö ja hiilidioksidi tulevat ympäröivän tehtaan muista prosesseista. Myös valo voidaan saada muista prosesseista asentamalla leväbioreaktorit esimerkiksi kasvihuoneympäristöön, kuten joissakin



tulevaisuusskenaarioissa on jo mietittykin. Rejektivesikasvatuksen suunnittelu kannattaa joka tapauksessa aloittaa kiertotaloutta yleisesti kehittävällä tuotekehitysstrategialla ja miettiä miten se voidaan yhdistää muiden mahdollisten prosessien kanssa.

Teknologinen kehitys ja tutkimukseen panostaminen ovat monissa yrityksissä mahdollistaneet täysin uudenlaisia innovaatioita ja tällaista ajattelua tukee myös esimerkiksi OECDn kehittämät muutosalueet rahoituksen yhdenmukaistamiseksi ilmasto- ja kehitystavoitteiden kanssa (kpl 2.1.1). Tuotekehitysstrategiassa voi siis unohtaa vanhat ajatusmallit ja lähestyä asiakkaiden tai yhteiskunnan haasteita täysin uudesta kulmasta. Asiakslähtöisten lopputuotteiden kartoitus ja kehitysmahdollisuudet sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä on siis kaiken lähtökohta. Myös OECDn kestävän tuotannon indikaattorit (Kuvio 2.) ovat tärkeä työkalu uusia biotuotetehtaita hahmoteltaessa.

Jos tehdas on vasta suunnitteilla ja leväkasvatus katsotaan vartenotettavaksi lisäksi tehtaalla, voidaan alusta alkaen varmistaa paras mahdollinen ympäristö, infrastruktuuri ja laitehankinta. Koko hankinta- ja logistiikkaketju kannattaa kartoittaa kestävä ja kannattava bio- ja kiertotaloutta ajatellen. Valmistautuminen tulevaisuuden tarpeisiin tarkoittaa myös skaalautuvuuden ja mittasuhteiden harkintaa niin tiloissa kuin laitteissa ja koneissa, jotta kaikkea ei tarvitse uusia tuotantokapasiteetin kasvaessa. Samalla tulee miettiä miten veden varastointi, siirto tai hyödyntäminen järjestetään talvikuukausina, jos leväkasvatusta ei silloin toteuteta. Kuten mallinnuksien kautta nähtiin, suuren kapasiteetin levätuotantoon voidaan käyttää yli 100 hehtaaria pinta-alaa. Tämä vaatisi siis monenlaista suunnittelua laitteiston ja tehdasalueen osalta.

Mahdollisen kaksivaiheisen mikrolevätuotantoprosessin tutkimiseen ja suunnitteluun kannattaa ehkä käyttää aikaa ensin, sillä se vaikuttaa lupaavalta tavalta tuottaa mikrolevää eri tarpeisiin. Asiakslähtöisyys kannattavuuden saavuttamiseksi on olennaista. Korkeat hygieniakriteerit täyttävä rejektivesikasvatettu mikrolevä muuttaisi nykyistä tilannetta merkittävästi positiiviseen suuntaan, sillä loppukäyttömahdollisuudet kasvaisivat ja lopputuotteet olisivat todennäköisesti arvokkaampia. Jos kuviota 18. vastaava prosessi voidaan jatkossa toteuttaa, on

mikroleväkasvatus Suomessa tulevaisuudessa todennäköisempää, sillä tuotantokulut saadaan helpommin katettua.

Yhteiskunnan hyvinvoinnin takaamiseksi kannattavuuden tavoittelu vaatii yhteiskunnallisten ja ekologisten näkökulmien huomioimista alusta alkaen. Kuten aiemmin todettiin, valmistelussa oleva koheesiopolitiikka painottaa alueellista kehitystä entistä enemmän ja vaikuttaa siltä, että Suomessa tullaan panostamaan teknisen kehityksen lisäksi entistä enemmän systemaattisuuteen, jossa huomioidaan myös yhteiskunta ja ympäristö (kpl 2.1.2).

Alle on koostettu pääasialliset johtopäätökset rejektivesikasvatetun mikrolevän mahdollisuuksiin Suomessa yleisellä tasolla (Taulukko 7).

Taulukko 7. Mikrolevän rejektivesikasvatuksen SWOT-analyysi Suomen näkökulmasta

Vahvuudet	Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biokaasulaitosten rejektivedessä on valmiiksi monia mikrolevän kasvuun tarvittuja ravinteita (esim. Bhatt ym. 2014, 2.)</li> <li>• Yhteiskunnalla on valmius ja tarve biokaasutehtaiden lisäämiseen ja kehittämiseen (esim. Luoma ym., 2011, 4-6.)</li> <li>• Biokaasulaitosten ja biotuotetehtaiden kehittämiseen liittyviä kannustimia ja tukia on haettavissa (esim. TEM Energiatuki)</li> <li>• Aluekohtaiseen kehitykseen panostetaan aluehallinnon ja rahoitusten kautta (esim. Hubner 2008)</li> <li>• Mikrolevään liittyvä tutkimus ja kehitys on viime vuosina lisääntynyt (esim. Vieira 2018, 19.)</li> <li>• Suomessa vaikuttaisi olevan yleistä innovointi-innostusta esim. tiekarttatyon muodossa (esim. Gaia Consulting 2015 lähteessä Sitra 2015, 41.)</li> <li>• Mikrolevillä on yleisesti ottaen vahvaa potentiaalia moneen sovellukseen (esim. Vieira, 11-13, 2018.)</li> <li>• Mikrolevä nähdään potentiaalisena mahdollisuutena ilmastonmuutoksen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suomen ilmasto on haastava valon ja lämmön kannalta, joka tuo lisäkustannuksia (esim. Kuvio 27.)</li> <li>• Jätevesiin liittyvä mikroleväkasvatusteknologia ja siihen liittyvä osaaminen on vielä vähäistä (esim. Kang ym. 2018.)</li> <li>• Rejektivesikasvatus tuottaa toistaiseksi pääasiassa likaista biomassaa (esim. Han ym. 2018)</li> <li>• Rejktiveden laatu vaihtelee syötteen mukaan, joten prosessia on haastava optimoida (Julkaisematon näyteraportti 2018)</li> <li>• Optimaalisia levälajeja ei olla vielä määritetty eri sovelluksiin ja ilmastoihin (useat lähteet)</li> <li>• Kannattavuus on vahvasti riippuvaista teknologiasta ja loppukäytöstä (esim. Lampinen 2015, 194.)</li> <li>• Mikrolevätutkimusta ei tiettävästi tueta yhtä paljon kuin sovelluksia, jotka voidaan ottaa heti käyttöön</li> <li>• Rejktivedestä saattaa jäädä haitallisia aineita mikrolevämassaan (esim. Bhatt ym. 2014)</li> </ul>

ehkäisemiseen (esim. Luoma ym. 2011.)	
Mahdollisuudet	Uhat
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biokaasu- ja biotuotetehtaiden kehittyessä mikrolevä voi olla monen eri tuotantoprosessin yhdistävä tekijä</li> <li>• Kaksivaiheinen hygieenista mikrolevää tuottava prosessi saattaa auttaa monialaisen biotuotetehtaan perustamisessa</li> <li>• Jatkossa tuet saattavat kasvaa mikrolevään liittyvään kiertotalouteen entisestään</li> <li>• Tulevaisuudessa voidaan joko löytää tai tuottaa biotekniikan avulla uusia mikrolevälajeja, joiden tuotanto on kannattavaa rejektivesiolosuhteissa</li> <li>• Yhdistämällä hyvinkin erilaisia tuotantoprosesseja samaan tilaan saatetaan löytää tekijöitä energian säästämiseksi</li> <li>• Mikroleväkasvatukseen liittyvä konsultointi ja palvelut saattavat olla uusi työllistävä alue</li> <li>• Mikroleväkasvatusta tukeva yhteistyö Suomessa kasvaa ja tehdään online-palveluita kaikkien alan toimijoiden hyödynnettäväksi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kannustimet ja tuet biokaasulaitosten perustamiseen saattavat poistua</li> <li>• Ilmasto- tai muu katastrofi tekee biokaasu- tai biotuoteteollisuudesta mahdotonta tai vie kehitystä taaksepäin</li> <li>• Joissakin mikrolevään liittyvissä lopputuotteissa huomataan riski, joka lopettaa tutkimuksen niiden osalta kokonaan</li> <li>• Mikroleväkasvatusta päätetään todeta Suomessa liian vaivalloiseksi eikä haluta investoida kehitykseen enempää</li> <li>• Mikroleväosaaminen ei ole laitoksilla riittävää, sen ostaminen on vaikeaa tai tarvittavaa kokonaisvaltaista osaamista ei ole saatavilla</li> <li>• Rejektivesikasvatetun levän lopputuotteista ei saada tarpeeksi arvokkaita, jotta prosessi olisi kannattava</li> </ul>

Vahvuuksia ja mahdollisuuksia, kuten myös heikkouksia ja uhkia on useita, kuten taulukosta 7 nähdään. Toisaalta heikkouksien ymmärtäminen auttaa kehittämään niitä ja mahdollisuuksia kannattaa hyödyntää lisää.

Erityisesti biokaasutuotannon osalta erilaisia näkökulmia on helppo yhdistää, sillä jätteiden mädätys lisää kestävyttä itsessään ratkaisemalla jäteongelmaa, ja prosessin avulla voidaan saada erilaisia lopputuotteita, kuten sähköä, lämpöä, lannoitteita ja biopolttoaineita. Jää nähtäväksi tuleeko mikrolevä olemaan osa tätä yhtälöä, mutta ennakoitu rakennemuutos sekä kokeilukulttuurin edistäminen yhteiskunnassa ja yrityksissä on olennainen osa haastavien uusien sovelluksien mahdollistamisessa, johon myös kappaleessa 2.1.2 viitataan. Suomessa aluehallintovirastot ja ELY-keskukset ovat tärkeässä roolissa esimerkiksi siinä, onnistutaanko biotuotetehtaiden kehittämisessä niin, että huomioidaan infrastruktuuri, ympäristö, maaseutujen kehitys, kiertotalouden kehittyminen ja

taloudellinen hyvinvointi (Kuvio 3.). Yrityksiltä vaaditaan uskallusta, innokkuutta ja rahoitusmahdollisuuksien huomiointia.

Systeeminen muutos vaatii yrityksiä, jotka toimivat asiakkaan ydinongelman ympärillä (kpl 2.1.4). Näin ollen esimerkiksi biokaasulaitosten, vedenpuhdistamoiden, lannoitteiden tai muiden teknokemiallisten sovellusten parissa toimivat yritykset voisivat mahdollisuuksiensa mukaan laajentaa tutkimustaan rejektiveden hallintaan ja optimointiin sekä mikrolevätuotanto-osaamiseen. Tämä taas vaatii näiltä teknologiayrityksiltä myös oikeanlaista organisaatiokulttuuristrategiaa, josta Rossi antaa esimerkkejä samassa kappaleessa. Näillä yrityksillä on luultavasti mahdollisuus saada taloudellista kasvua usealta saralta palveluista ja konsultoinnista erilaisiin jakamistaloudellisiin ja tuotantoratkaisuihin (kpl 2.1.5).

*Euglena gracilis* -mikrolevän kasvatumahdollisuudet Suomen rejektivesissä voitaneet toistaiseksi nähdä suunnilleen yhtä hyvinä kuin monen muunkin laboratorioolosuhteissa hyvin kasvaneen levän. Sillä on monia hyviä ominaisuuksia, mutta tutkimuksia tarvitaan lisää. Todettiin myös, että yhteiskasvatus vaikuttaa tehokkaammalta kuin yhden lajin kasvatus, joten joka tapauksessa on aiheellista etsiä useita sopivia lajeja.

Leväkasvatuksen suhteen positiivista on myös se, että sen onnistuminen ei ole kiinni rejektiveden riittämättömästä fosforista tai typestä. Aiemmin todettiin, että esimerkiksi sinkin ja mangaanin määrän optimoinnilla voidaan mahdollisesti kehittää kasvutahtia sekä biomassan fotoautotrofista kasvupotentiaalia (Radzun ym. 2014, 7). Rajoittava tekijä on fosforin tai typen sijaan paremminkin sinkki (Piiparinen 2018) tai muu hivenaine, jos määrä on ollut syötöissä vähäinen. Case-tutkimuksen kohteena olevan tehtaan sinkkipitoisuus rejektivedessä mädätyksen jälkeen helmikuussa 2018 oli 0,5 mg/l. Tästä yksittäisestä tuloksesta ei voi päätellä paljoa, mutta alustavasti tämä pitoisuus vaikuttaa hyvältä verraten esimerkiksi aiemmin mainittuun tutkimukseen, jossa levätuotantoa tutkittiin sinkkipitoisuuksissa 0.06-0.09 mg/l (Radzun ym. 2014, 7). Mangaanipitoisuus oli mädätyksen jälkeen jopa 15.7 mg/l, mutta tämäkään arvo yksittäisenä testinä ei ole tilastollisesti merkitsevä.

Yleisesti ottaen vaikuttaa siltä, että mikrolevän rejektivesikasvatuksen potentiaali Suomessa on pitkälti kiinni yksittäisten yritysten tai tutkimuslaitosten

mahdollisuuksista viedä asiaa eteenpäin, vaikka samalla myös tiedonvaihto ja yhteistyö on tärkeää, jota edistävät erilaiset hankkeet.

Todettakoon, että tämän tutkimuksen perusteella ei ole nähtävissä mitään suoranaista syytä ainakaan rejektivesinäytteiden osalta, miksei case-tutkimuksen kohteena olevalla tehtaalla voisi harkita rejektivesikasvatusprosessin kehittämistä. Kasvatus vaatii toki esimerkiksi altaita, joissa vesi voidaan käsitellä tasalaatuisesti ja kasvatukselle optimaaliseksi sekä riittävää pinta-alaa, johon on erilaisia ratkaisuja lasiputkileväbioreaktoreista altaisiin. Kun mietitään kokonaisuutta siitä, miten yksittäinen biokaasulaitos voisi lähteä harkitsemaan laajentuvansa biotuotetehtaaksi hyödyntäen mikrolevää, voidaan tutkimuksen pohjalta listata ainakin seuraavat asiat:

- Biokaasuprosessin optimoinnin riittävyys uuteen prosessiin panostamiseksi
- Rejektiveden tasalaatuisuus tai kyky kehittää sitä
- Mikrolevään liittyvän lopputuotteen arvo ja markkinat ja/tai sisäiset hyödyt
- Projektin budjetti ja rahoitusmenetelmät
- Kasvuvaatimusten (valo, lämpö, ravinteet, tila) täytyminen tai mahdollisuus tuottaa ne keinotekoisesti ja kannattavasti
- Organisaation osaaminen ja/tai muutoin saatavilla oleva konsultointi
- Tehdasalueen kehittämismahdollisuudet prosessienvälisen synergioiden löytämiseksi
- Elinkaariarviointi ja kestävä valmistuksen indikaattorien käyttöönotto
- Kontaktiverkosto tutkimuslaitosten, yhdistysten ja yritysten välillä
- Innovointiin kannustava organisaatiokulttuuri

Ainakin yllä mainitut seikat auttavat tekemään sekä alustavaa harkintaa että kattavampaakin tutkimusta, jos jokaiseen perehdytään vielä tarkemmin erikseen. Voidaan oikeastaan palata kuvion 9 mahdollistajiin, jotka ovat suureksi osaksi samankaltaisia tekijöitä kuin mihin tässä työssäkin päädyttiin. Kuvion 9 listassa voisi toki erikseen mainita vielä organisaatiokulttuurin ja koulutusmahdollisuuksien tärkeyden.

## 6 Pohdinta

Yllä esitetyillä johtopäätöksillä matka kohti kehitystä ja päätöksentekoa voi alkaa. Voimmeko saavuttaa ”biotalouden onnelan” Suomessa kestävän ja tehokkaan kiertotalouden avulla, jossa biokaasuprosessit, jätevirrat ja leväbiomassat ovat keskiössä muiden uusiutuvien energialähteiden lomassa? Tämä kysymys vaatii vielä tutkimusta ja selvittelyä sekä paljon työtä yhteiskunnalta ja yrityksiltä. Suomen lisäksi tulee tukea myös muiden maiden kehitystä näissä asioissa.

Jatkoa ajatellen on hyvä kehittää virallisempi arviointiprosessi, jonka avulla biokaasu- ja biotuotetehtaat voivat helposti ja kohtalaisen nopeasti arvioida mikroleväkasvatuksen kannattavuutta ja mahdollisuuksia omalta osaltaan. Asiaa kehittäisivät edelleen helpot online-työkalut sekä ohjeistukset biotuotetehtaiden pitkän tähtäimen kehitykseen, jossa myös mahdollinen mikrolevätuotanto on huomioitu. Esimerkiksi työssä käytettyjen mallinnuskaavojen pohjalta SYKE voisi harkita verkkosivuilleen helppokäyttöistä laskuria tai online-testiä, jota biokaasu- ja jätevesilaitokset voisivat hyödyntää kartoittaakseen levätuotantokyvykkyyttään. Tämän lisäksi selkeä ja vapaasti käytettävissä oleva mikrolevätietokanta rejektivedessä testatuista lajeista olisi myös tärkeä. Suomen tai EU:n tasolla voi myös aloittaa esimerkiksi jonkinlaisen prosessisynergiaprojektin, jonka kautta edistetään tietämystä erilaisista prosesseista, syötteistä, saannoista, ja näiden mahdollisista yhdistämismenetelmistä. Näitäkin voivat tukea esimerkiksi online-työkalut tai -koulutukset

Myös korkeakoulut voivat tukea levätuotannon ja biotuotetehtain kehittymistä opetuksen kautta luoden selkeän kuvan mahdollisesta yhteiskunnasta, jossa prosessit ja tehtaat on optimoitu toisiaan ruokkiviksi, ja ihmisten elintapojen ja jätteiden rooli näyttäytyy selkeästi. Biotalouskoulutukset ovat tästä jo toki hyvä esimerkki.

Pelifirmoilla olisi myös selkeä mahdollisuus tehdä yhteiskuntapelejä, joissa pelastetaan maailma onnistuneella infrastruktuurilla huomioiden esimerkiksi ravinnekierto ja uusiutuvan energian tuotanto.

Kaiken kaikkiaan globaali yhteistyö ja selkeä viestintä saattavat olla merkittävä tekijä mikroleväkasvatuksen sekä muiden kestävien biotuotteiden kannattavuuden lisäämisessä. Yritystenvälinen kilpailu toisaalta lisää kehitystä, mutta saattaa hidastaa innovaatioihin liittyvää tiedonjakoa, joten julkista työtä tekevien tutkijoiden ja asiantuntijoiden on hyvä panostaa tiedonjakoon erityisen paljon, jotta uudet biotuotteet saadaan hyötykäyttöön kestävällä tavalla ja luontoa kuormittamatta. Yritysten, tutkimuslaitosten ja koulutuslaitosten yhteistyö on tärkeää ja vaikuttaa Suomessa toimivan hyvin. Suomalaista yhteistyötä voisi tuki vielä lisätä esimerkiksi laajentamalla Biokaasuyhdistyksen toimintaa kokonaisvaltaisemman biotuotekehityksen suuntaan, jossa mikroleväkasvatuskokeilut voisivat olla mukana.

### **Lopuksi**

Tutkimus tehtiin melko aikarajoitteisesti, joten kehittymismahdollisuuksia aiheeseen liittyviin jatkotutkimuksiin löytyy varmasti useita. Joitakin tällaisia ovat esimerkiksi otoksen laajentaminen laitosten, parametrien tai levälajien suhteen, käytännön leväkasvatuskokeiden tekeminen erilaisissa olosuhteissa ja asiantuntijahaastattelut.

Tämän työn jatkaminen esimerkiksi väitöskirjalla tai käytännön tekemisellä voisi tarkoittaa soveltavaa tutkimusta mikroleväkasvatuksen menestyksekkäästä käyttöönotosta uuteen biotuotetehtaaseen käytännön tasolla. Tämä vaatisi pohjakeseen kartoituksen tai tiedon mikrolevän potentiaalisesta asiakaskunnasta ja markkina-arvosta juuri kyseiselle tehtaalle, sekä lopulta tuotteistamisen mahdollisesti eri tuotantoprosesseihin erilaisilla investoinneilla. Tämä vaatisi myös kokonaisvaltaista tehdassuunnittelua ottaen huomioon esimerkiksi jäähdytys-, lämmön- ja sähkönjakovaihtoehdot kaikkien tehtaan prosessien välillä. Mikrolevä olisi mahdollisesti vain pieni osa suurta biotuotetehdasta, mutta se voisi toimia useammassa prosessissa esimerkiksi teknokemian, lääketeollisuuden sekä energia- ja elintarviketeollisuuden innovatiivisena lopputuotteena.

Työn luotettavuutta varmistettiin käyttämällä tieteellisiä tutkimuksia ja alan asiantuntijoiden tuottamaa kirjallisuutta mahdollisimman laaja-alaisesti. Työn pääohjaajana toiminut opettaja Jyväskylän ammattikorkeakoulusta sekä työelämän mentorit SYKE Merikeskuksesta ovat korkeasti koulutettuja luonnontieteen alan

asiantuntijoita, joiden kommentit edesauttoivat työn luotettavuutta. Luotettavuutta varmistettiin myös sillä, että liian pitkälle vietyjä johtopäätöksiä case-tutkimuksen kohteena olleen biokaasulaitoksen käytännön levätuotantomahdollisuuksista ei tehty. Esitettiin lähinnä löydöksiä, joiden avulla pidemmälle vietyä tutkimusta voisi lähteä tekemään, jos rejektivesiprozessia päätetään laitoksella kehittää.

Työn heikkouksina voidaan nähdä sen teoreettisuus ja laaja-alaisuus, joka laskee syvällistä pureutumista mikroleväkasvatukseen. Toisaalta työllä ei ollut tarkoitus olla rinnastettavissa levätutkijoiden työhön, vaan lähinnä tuoda selkeyttä ja kokonaisvaltaista ymmärtämystä uuden kiertotalousinnovaation käyttöönottovaatimukseen vaativissa ympäristöolosuhteissa olevilla biokaasulaitoksilla. Laaja-alaisuus voidaan siis nähdä myös positiivisena tekijänä.

Vaatimuksia voisi vielä selkeämmin peilata esimerkiksi OECD:n luomiin indikaattoreihin, ja ala vaatii ehdottomasti myös elinkaaritutkimuksia, joka rajattiin tästä työstä tarkoituksella pois, sillä sellainen olisi vaatinut täysin oman kokonaisuutensa. Myös dataa olisi voinut käsitellä laajemmin, mutta rejektiveden lisäanalyysit eivät todennäköisesti muuttaisi työn lopullisia johtopäätöksiä.



## Lähteet

2008/98/EY. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=FI>

445/2018. Laki jätelain muuttamisesta. FINLEX. Viitattu 9.12.2018. Valtion säädöstietopankki Finlex. <http://www.finlex.fi>, ajantasainen lainsäädäntö.

(EU) 2018/1147. Euroopan komission täytäntöönpanopäätös. Jätteenkäsittelyn parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa koskevat päätelmät (BAT-päätelmät). Liite., Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU mukaisten parhaita käytettävissä olevia tekniikoita (BAT) koskevien päätelmien vahvistamisesta jätteenkäsittelyä varten. Euroopan unionin virallinen lehti. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018D1147&qid=1540715333115&from=EN>

Abi, A., Müller, C. & Jördening, H. 2017. Improved laminaribiose phosphorylase production by *Euglena gracilis* in a bioreactor: A comparative study of different cultivation methods. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. Heinäkuu 2017, Volume 22, Issue 3, s. 272–280. <https://doi.org/10.1007/s12257-016-0649-8>

Adekan, B. 2012. Potentials of Selected Tropical Crops and Manure as Sources of Biofuels in Biogas. Edited by Sunil Kumar.

Aho, M., Pursula, T., Saario, M., Miller, T., Kumpulainen, A., Päällysaho, M., Kontiokari, V., Autio, M., Hillgren, A. & Descombes, L. 2015. Ravinteiden kierron taloudellinen arvo ja mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityksiä 99. Sitra.

Berninger, K., Lovio, R., Temmes, A., Jalas, M., Kivimaa, P. & Heiskanen, E. 2017. Suomi seuraaville sukupolville. Taloudellisten murrosten käsikirja. Helsinki: Into Kustannus Oy.

Bhatt, N., Panwar, A., Bisht, T. & Tamta, S. 2014. Coupling of Algal Biofuel Production with Wastewater. *Scientific World Journal*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4058258/pdf/TSWJ2014-210504.pdf>

Bioökonomierat. 2018. Bioeconomy Policy (Part III) Update Report of National Strategies around the World. A report from the German Bioeconomy Council. Viitattu 9.12.2018. [http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS\\_2018\\_Bioeconomy-Strategies-around-the\\_World\\_Part-III.pdf](http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Bioeconomy-Strategies-around-the_World_Part-III.pdf)

Brinkmann, T. Santonja, G., Yükseler, H., Roudier, S. & Sancho, L. 2016. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector. Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). JRC Science of Policy Development. Viitattu 9.12.2018. [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CWW\\_Bref\\_2016\\_published.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CWW_Bref_2016_published.pdf)

- Carfagna, S., Lanza, N., Salbitani, G., Basile, A., Sorbo, S. & Vona, V. 2013. Physiological and morphological responses of Lead or Cadmium exposed *Chlorella sorokiniana* 211-8K (Chlorophyceae). SpringerPlus, 2(1), 147. doi:10.1186/2193-1801-2-147.
- EK – Elinkeinoelämän keskusliitto. 2018. Tuotanto ja investoinnit. Viitattu 9.12.2018. <https://ek.fi/mita-teemme/talous/perustietoja-suomen-taloudesta/3998-2/>.
- Ethica Oy. 2018. Liiketoimintaa kiertotaloudesta. Edelläkävijän opas. Ethica Finland.
- EurObserv'ER. 2017. Biogas Barometer. Observ'ER. ECN. Renac. Frankfurt School. Fraunhofer ISI. Viitattu 9.12.2018. <https://www.eurobserv-er.org/pdf/biogas-barometer-2017-en/>
- ECORYS; S.Pro. 2017. Towards an implementation strategy for the sustainable blue growth agenda for the Baltic sea region. Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries (European Commission). Viitattu 9.12.2018. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/60adf799-4f19-11e7-a5ca-01aa75ed71a1> Luettu 28.12.2017.
- ELY-keskus. 2018. Yrityksen kehittämisavustus. Kehittämisavustuksella yritykselle uutta suuntaa ja kasvua. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Viitattu 9.12.2018. <http://www.ely-keskus.fi/web/ely/yrityksen-kehittamisavustus>
- European Commission. 2018. EU Budget for the Future. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. A Modern Budget for a Union that Protects, Empowers and Defends The Multiannual Financial Framework for 2021-2027. Viitattu 9.12.2018. [https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/communication-modern-budget-may\\_2018\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/communication-modern-budget-may_2018_en.pdf)
- Giraldo-Calderón, N.D., Romo-Buchelly, R.J., Arbeláez-Pérez, A.A., Echeverri-Hincapié, D. & Atehortúa-Garcés, L.A., 2018. Microalgae biorefineries: applications and emerging technologies DYNA, 85(205), pp. 219-233, June, 2018. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68780>
- G, T. 2018. Bioeconomy: Germany to lose pole position. European Biotechnology. Life Science and Industry Magazine. Viitattu 9.12.2018. <https://european-biotechnology.com/up-to-date/latest-news/news/bioeconomy-germany-to-lose-pole-position.html>
- Han, J., Thomsen, L., Pan, K. & Thomsen, C. 2018. Two-step process: Enhanced strategy for wastewater treatment using microalgae. Bioresource Technology, Volume 268. November 2018, Pages 608-615. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.054>
- Harlin, A., Grönqvist, S., Järnefelt, V., Jääskeläinen, A., Kiiskinen, H., Kangas, H., Orelma, H., Paunonen, S., Ropponen, J., Sandquist, D. & Tammelinen, T. 2018. Cellulose goes digital – VTT's vision of digital cellulose-based industries. VTT Visions 14. VTT. Viitattu 9.12.2018. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2018/V14.pdf>

Hoffrén, J. 2014. Hyvinvoinnin mittaaminen jälkiteollisessa yhteiskunnassa. Toim. Särkelä, R., Siltaniemi, A., Rouvinen-Wilenius, P., Parviainen, H., Ahola, E. 2014. Hyvinvointitalous. SOSTE Suomen Sosiaali ja Terveys ry.

Honkanen, T. 2018. Process Management. Lecture. Summer Course. HAMK University of Applied Sciences.

Hubner, D. 2008. Alueilla on merkitystä. Goulet, R. (Toim.) EU:n koheesiopolitiikka 1988–2008: Sijoittaminen Euroopan tulevaisuuteen. InfoRegio Panorama. Euroopan unioni. Aluepolitiikka. Nro 26. Viitattu 9.12.2018.

[http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/panorama/pdf/mag26/mag26\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/panorama/pdf/mag26/mag26_fi.pdf)

Huttunen, M. & Kuittinen, V. 2017. Suomen biokaasulaitosrekisteri N:O 20. Tiedot vuodelta 2016. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 29. Viitattu 9.12.2018. [http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-2553-4/urn\\_isbn\\_978-952-61-2553-4.pdf](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2553-4/urn_isbn_978-952-61-2553-4.pdf)

IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. & Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp. Viitattu 9.12.2018. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sr15/sr15\\_spm\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sr15/sr15_spm_final.pdf)

IPCC. 2013. IPCC Factsheet: What is the IPCC? Viitattu 9.12.2018. [https://www.ipcc.ch/news\\_and\\_events/docs/factsheets/FS\\_what\\_ipcc.pdf](https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf)

Kang, D., Keugtae, K., Jang, Y., Moon, H., Ju, D., Kwon, G. & Jahng, D. 2018. Enhancement of wastewater treatment efficiency through modulation of aeration and blue light on wastewater-borne algal-bacterial consortia. Bioresource Technology. Volume 268, November 2018, Pages 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.008>

Kinnunen, V. & Rintala, J. 2015. Biokaasualan monet mahdollisuudet. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys.

Kuhmonen, T & Kuhmonen, I. 2014. Maaseudun alueidenkäytön tulevaisuuskuvat. TUTU-julkaisu 1/2014. Tulevaisuuden tutkimuskeskus. Turun yliopisto.

Kymäläinen, M. 2015. Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys.

Kymäläinen, M. & Luostarinen, S. 2015. Biokaasutuotannon raaka-aineet. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys.

Laaksonen, J., Salmenperä, H., Stén, S., Dahlbo, H., Merilehto, K. & Sahimaa, O. 2018. Kierrätyksestä kiertotalouteen – Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2023. Suomen ympäristö 01/2018. Ympäristöministeriö. Viitattu 9.12.2018.

<http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160441>

Lampinen, A. 2015. Biokaasualan historia ja tulevaisuus. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) Suomen biokaasuyhdistys ry. 2015. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Park, K., Lim, B. & Kisay L. 2009. Growth of microalgae in diluted process water of the animal wastewater treatment plant. Q IWA Publishing 2009 Water Science & Technology—WST | 59.11 | 2009.

Li, M., Muñoz, H., Goda, K. & Di Carlo, D. 2017. Shape-based separation of microalga *Euglena gracilis* using inertial microfluidics. Scientific Reports, volume 7, Article number: 10802 (2017). Nature. Viitattu 9.12.2018.

<https://www.nature.com/articles/s41598-017-10452-5>

Loladze, I. & Elser, J. 2011. The origins of the Redfield nitrogen-to-phosphorus ratio are in a homeostatic protein-to-rRNA ratio. Department of Mathematics. University of Nebraska-Lincoln. Ecology Letters. Viitattu 9.12.2018.

[http://elserlab.asu.edu/pdf/Loladze\\_EL\\_2011.pdf](http://elserlab.asu.edu/pdf/Loladze_EL_2011.pdf)

Luoma, P., Vanhanen, J. & Tommila, P. 2011. Distributed Bio-Based Economy – Driving Sustainable Growth. Sitra.

Marttinen, S., Suominen, K., Lehto, M., Jalava, T. & Tampio, E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT-raportti 135. Viitattu 9.12.2018.

<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti135.pdf>

Merin, Sara. 2016. Reject water management at biogas plants and the utilization of reject water as a culture medium from microalgae. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. School of Energy Systems. Degree Program in Environmental Technology.

Mutikainen, M., Sormunen, K., Paavola, H. Haikonen, T. & Väisänen, M., 2016. Biokaasusta kasvua. Biokaasuliiketoiminnan ekosysteemien mahdollisuudet. Ramboll Finland. Sitran selvityksiä 111. Sitra.

Möttönen, S. 2014. Kansalaisyhteiskunta, talous ja hyvinvointivaltio. Toim. Särkelä, R., Siltaniemi, A., Rouvinen-Wilenius, P., Parviainen, H. & Ahola, E. 2014. Hyvinvointitalous. SOSTE Suomen Sosiaali ja Terveys ry.

Niinimäki, J. 2015. Vesiviljely – Kalat, äyriäiset, nilviäiset, levät. Helsinki: Books On Demand GmbH.

OECD. 2012. OECD Sustainable Manufacturing Toolkit - Seven Steps to Environmental Excellence. Start-Up Guide. Viitattu 9.12.2018.

<https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/48704993.pdf>

- OECD. 2018. Financing Climate Futures: Rethinking Infrastructure. OECD/The World Bank/UN Environment. Viitattu 9.12.2018. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264308114-en.pdf>
- O'Neill, E., Trick, M., Hill, L., Rejzek, M., Dusi, R., Hamilton, C., Zimba, P., Henrissat, B. & Field, R. 2015. The transcriptome of *Euglena gracilis* reveals unexpected metabolic capabilities for carbohydrate and natural product biochemistry. Royal Society of Chemistry. Mol. BioSyst 2015, 11, 2808-2820. <https://doi.org/10.1039/C5MB00319A>
- Paavola, T. & Kapuinen, P. 2015. Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. M. Kymäläinen & O. Pakarinen. Suomen Biokaasuyhdistys.
- Palhus, S. 2017. Involving regions and preserving solidarity. Boosting innovation across the regions. Panorama No 62. European Commission. Viitattu 9.12.2018. [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/panorama/pdf/mag62/mag62\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/panorama/pdf/mag62/mag62_en.pdf)
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. Institute for Energy and Transport (IET). European Commission. Viitattu 9.12.2018. [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#MR](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#MR)
- Piiparinen, J. 2018. Sähköpostikommunikaatio. Marraskuu 2018.
- Piiparinen, J., Edelmann, M., Piironen, V. & Spilling K. 2018. Utilization Of Reject Water From Biogas Production In Algal Cultivation. Algaeurope 2018. Posterisitys. SYKE Merikeskus. Helsingin yliopisto. Ympäristöministeriö.
- Poutanen, K., Nordlund, E., Paasi, J., Vehmas, K. & Åkerman, M. 2017. Elintarviketalous 4.0. VTT:n visio älykkään, kuluttajakeskeisen ruokatuotannon aikakauteen. VTT Visions 9. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
- Radzun, K., Wolf, J., Zhang, E., Stephens, E., Ross, I. & Hankamer, B. 2014. Automated nutrient screening system enables high-throughput optimisation of microalgae production conditions. US National Library of Medicine. National Institutes of Health. Viitattu 9.12.2018. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4432509/>
- Reponen, S. 2018. Circular Economy business models in the manufacturing industries. Circular Economy Playbook for Finnish SME's. Executive Summary. Accenture Strategy, Sitra & Teknologiateollisuus. Viitattu 9.12.2018. [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file\\_attachments/circular\\_economy\\_playbook\\_for\\_manufacturing\\_executive\\_summary.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/circular_economy_playbook_for_manufacturing_executive_summary.pdf)
- Rossi, A. 2015. Kulttuuristrategia 2. Kohti Euroopan parasta työelämää. Kauppakamari. Helsinki: Helsingin seudun kauppakamari / Helsingin Kamari Oy ja Asta Rossi.
- Saveyn, H. & Eder, P. 2014. End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. JRC Scientific and Policy Reports. European Commission. Viitattu 9.12.2018. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC87124/eow%20biodegradable%20waste%20final%20report.pdf>

Seppälä, J. & Piiparinen, J. 2017. SYKE Suomen ympäristökeskus. Puhelinpalaveri 11/2017.

Seppälä, J. 2018. Simulation of algae cultivation, including mass balances, using local conditions and liquid from biogas production. SYKE Suomen ympäristökeskus. Julkaisematon. Versio 0.1 16.10.2018.

Spilling, K. 2013. Algal cultivation integrated into municipal waste water treatment. Finnish Environment Institute. Mona Arnold (Ed.). Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows. Espoo 2013. VTT Technology 147. 84 p.

TEM. 2018. Rakennemuutos. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 9.12.2018.  
<https://tem.fi/rakennemuutos>

TEM. 2018. Energiatuki. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 9.12.2018.  
<https://tem.fi/energiatuki>

TEM, MMM & YM. 2015. Kestävää kasvua biotaloudesta. Suomen biotalousstrategia. Viitattu 9.12.2018. [http://biotalous.fi/wp-content/uploads/2014/07/Julkaistu\\_Biotalous-web\\_080514.pdf](http://biotalous.fi/wp-content/uploads/2014/07/Julkaistu_Biotalous-web_080514.pdf)

Tossavainen, M., Chopra, N., Kostia, S., Valkonen, K., Sharma, A., Sharma, S., Ojala, A. & Romantschuk, M. 2018. Conversion of biowaste leachate to valuable biomass and lipids in mixed cultures of *Euglena gracilis* and chlorophytes. *Algal Research*. Volume 35, November 2018, Pages 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.007>

Tsapekos, P., Kougias, P., Alvarado-Morales, M., Kovalovszki, A., Corbière, M. & Angelidaki, I. 2018. Energy recovery from wastewater microalgae through anaerobic digestion process: Methane potential, continuous reactor operation and modelling aspects. *Biochemical Engineering Journal*. Volume 139. 15 November 2018, Pages 1-7. Viitattu 9.12.2018.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X18302894#fig0035>

UN. 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. General Assembly. United Nations A/RES/70/1. Viitattu 9.12.2018.  
[http://www.un.org/en/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1](http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1)

U.S. DOE. 2010. National Algal Biofuels Technology Roadmap. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program. Viitattu 9.12.2018.  
[https://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/algal\\_biofuels\\_roadmap.pdf](https://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/algal_biofuels_roadmap.pdf)

Valtioneuvosto. 2014. Vesiviljelystrategia 2022 – Kilpailukykyinen, kestävä ja kasvava elinkeino. Valtioneuvoston periaatepäätös 4.12.2014. Maa- ja metsätalousministeriö. Viitattu 9.12.2018. [http://mmm.fi/documents/1410837/1516655/1-3-Vesiviljelystrategia\\_2022.pdf/89ae6a1d-9fa5-4c51-b339-35029399801f](http://mmm.fi/documents/1410837/1516655/1-3-Vesiviljelystrategia_2022.pdf/89ae6a1d-9fa5-4c51-b339-35029399801f)

VM & TEM. 2015. Aluehallintovirastojen ja elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskusten strategia-asiakirja 2016 - 2019. Alueiden vahvuuksilla kestävä kasvua ja hyvinvointia. Viitattu 9.12.2018.  
[https://tem.fi/documents/1410877/2845886/AVI-ELY\\_Strategia\\_2016-2019\\_FINAL.pdf](https://tem.fi/documents/1410877/2845886/AVI-ELY_Strategia_2016-2019_FINAL.pdf)

Vieira, V. 2018. The volatility of the Algae Industry. Overview of the industry status in the world and in Europe. European Algae Biomass Association. 8<sup>th</sup> European Algae Industry Summit. Huhtikuu 25-26, 2018. Wien, Itävalta.

Westerholm, H., Björklöf, K., Gustaffson, J., Marttila, J., Palanne, P., Saares, R., Saukkonen, P. & Harjuoja, J. 2014. Opas akkreditointivaatimusten soveltamiseksi ympäristönäytteenotossa. Opas 2/2014. FINAS. Viitattu 9.12.2018.  
[https://www.finas.fi/Tiedostot%201/Julkaisut/finas\\_opas\\_2\\_2014\\_Opas\\_akkreditointivaatimusten\\_soveltamiseksi.pdf](https://www.finas.fi/Tiedostot%201/Julkaisut/finas_opas_2_2014_Opas_akkreditointivaatimusten_soveltamiseksi.pdf)

Wiebe, M. & Wang, Y. 2013. The productivity of algae in mixotrophic conditions. Mona Arnold (Ed.). Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows. Espoo 2013. VTT Technology 147. 84 p.

Williams, P. & Lauriens, L. 2010. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. Review. Energy & Environmental Science. DOI: 10.1039/b924978h.

Wiloso, E., Heijungs, R., Huppes, G. & Fang, K. 2016. Effect of biogenic carbon inventory on the life cycle assessment of bioenergy: challenges to the neutrality assumption. Journal of Cleaner Production. Volume 125, 1 July 2016, sivut 78-85. Viitattu 9.12.2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.096>

Ympäristöhallinto. 2018. Jätehuollon vastuut ja järjestäminen. Ympäristö.fi-verkkosivusto. Viitattu 9.12.2018. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Jatteet\\_ja\\_jatehuolto/Jatehuollon\\_vastuut\\_ja\\_jarjestaminen](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Jatehuollon_vastuut_ja_jarjestaminen)