

Mikrolevästä biokaasua

Mikrolevän kasvattaminen biokaasulaitoksen rejektivedessä

Heidi Rutila

Opinnäytetyö
Helmikuu 2020
Luonnonvara- ja ympäristöala
Agrologi (YAMK)
Biotalouskehittäminen

Tekijä(t) Rutila, Heidi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, ylempi AMK	Päivämäärä maaliskuu 2020
	Sivumäärä 55	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Mikrolevästä biokaasua Mikrolevän kasvattaminen biokaasulaitoksen rejektivedessä		
Tutkinto-ohjelma Agrologi (YAMK), Biotalouskehittämisen tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Vesisenaho, Tero (JAMK) & Honkanen, Hannariina (JAMK)		
Toimeksiantaja(t) Stenman, Tarja (JAMK)		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Ilmaston muutos luo paineita biopolttoaineiden käytön lisäämiseen. Mikrolevän käyttö biopolttoaineiden raaka-aineena on ollut kiinnostuksen kohteena sekä teollisuudessa että tiedemaailmassa. Mikrolevän tekee houkuttelevaksi sen suuri kasvunopeus ja se, että sitä voidaan kasvattaa joutomailla. Biokaasulaitoksessa syntyy ravinnerikasta rejektivettä, jonka hyötykäyttöä on paljon mietitty. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin, onko mahdollista kasvattaa kestävästi mikrolevää biokaasulaitoksen rejektivedessä ja tuottaa mikrolevästä edelleen biokaasua.</p> <p>Case-esimerkinä tarkasteltiin Mustankorkean biokaasulaitosta Jyväskylässä. Tutkimuksessa vertailtiin elinkaariarvioinnin (LCA) avulla levän kasvatusta avoimessa kasvatusjärjestelmässä ja fotobioreaktorissa. Tarkastelukohteeksi valittiin nettoenergiasuhde ja kasvihuonekaasupäästöt. Lisäksi laskettiin Mustankorkealle soveltuva levän kasvatuspinta-ala suhteutettuna rejektiveden sisältämään typpimäärään.</p> <p>Elinkaariarvioinnin tuloksena saatiin avoimelle kasvatusjärjestelmälle nettoenergiasuhdeeksi 1,20 ja fotobioreaktorille 0,38. Nettoenergiasuhde kertoo, kuinka paljon pystytään tuottamaan energiaa suhteessa käytettyyn fossiiliseen energiaan. Jos nettoenergiasuhde $NER < 1$, kuluu fossiilista energiaa enemmän kuin mitä bioenergiaa syntyy. Kasvihuonekaasupäästöjen suhteen kumpikin leväkasvattamotyyppi näyttäisi toimivan lyhytaikaisena hiilinieluna. Levän kasvatuspinta-alaksi saatiin n. 2 ha.</p> <p>Tämä tutkimus osoittaa, että fotobioreaktori ei sovellu nykyisellään mikrolevän massakasvatukseen. Avoimessa kasvatusjärjestelmässä tuotetun mikrolevän käyttö biometaanin raaka-aineena sen sijaan näyttäisi olevan kestävä.</p>		
Avainsanat (asiasanat)		
biokaasulaitos, biometaani, elinkaariarviointi, fotobioreaktori, mikrolevä, nettoenergiasuhde, kasvihuonekaasupäästö, typpi		

Author(s) Rutila, Heidi	Type of publication Master's thesis	Date March 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 55	Permission for web publication: X
Title of publication Biogas from Microalgae Microalgae cultivation in liquid digestate of biogas plant		
Degree programme Master of Natural Resources, Degree Programme in Bioeconomy Development		
Supervisor(s) Vesisenaho, Tero (JAMK) & Honkanen Hannariina (JAMK)		
Assigned by Stenman, Tarja (JAMK)		
Abstract <p>Climate change is creating pressure to increase the use of biofuels. The use of microalgae as a raw material for biofuels has been of interest to both industry and academic world. The micro-algae is attractive because of its high growth rate and the fact that it can be grown in the poor-quality land. The biogas plant generates nutrient-rich liquid digestate, which use has been considered a lot. This study looked at the feasibility of growing micro-algae in the liquid digestate of a biogas plant sustainably and further producing biogas from the microalgae.</p> <p>A case study was the Mustankorkea biogas plant in Jyväskylä. The study compared algae cultivation in an open cultivation system and a photobioreactor by means of life cycle assessment (LCA). The focus of the study was on the net energy ratio and greenhouse gas emissions. In addition, a suitable algal cultivation area for Mustankorea was calculated by mean of nitrogen content of the liquid digestate.</p> <p>The life cycle assessment resulted in a net energy ratio of 1.20 for an open cultivation system and 0.38 for a photobioreactor. The net energy ratio indicates how much energy can be produced in relation to the fossil energy used. If the net energy ratio is $NER < 1$, more fossil energy is consumed than what bioenergy generates. In terms of greenhouse gas emissions, both algae types appear to act as short-term carbon sinks. The algae was cultivated with an area of about 2 ha.</p> <p>This study shows that the photobioreactor is at the moment unsuitable for mass cultivation of microalgae. It seemed that use of the microalgae produced in the open cultivation system as biogas raw material is sustainable.</p>		
Keywords/tags (subjects) biogas plant, biomethane, life cycle assessment, photobioreactor, microalgae, net energy ratio, greenhouse gas emissions, nitrogen		

Sisältö

Käsitteet	4
1 Biopolttoainetta mikrolevästä ravinteita kierrättämällä	6
2 Mikrolevän kasvatus ja biokaasun tuotanto	8
2.1 Mikrolevät	8
2.1.1 Mikrolevä biopolttoaineena	8
2.1.2 Mikrolevän kasvuolosuhteet	10
2.1.3 Mikrolevän kasvatusjärjestelmät	12
2.1.4 Mikrolevän korjuumenetelmät ja vedenpoisto	22
2.2 Biokaasu	23
2.2.1 Anaerobinen hajoaminen	23
2.2.2 Biokaasun jalostus	24
2.2.3 Mikrolevän biokaasun tuotantopotentiaali	25
2.2.4 Mikrolevän esikäsittely	25
3 Tutkimusasetelma ja -menetelmät	26
3.1 Elinkaariarviointi (Life cycle assessment, LCA)	27
3.2 Leväkasvattamon mitoitus	29
3.3 Leväkasvattamon elinkaariarviointi	31
4 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu	37
4.1 Kasvatusjärjestelmän mitoitus	37
4.2 Kasvatusjärjestelmien elinkaariarviointi	38
5 Johtopäätökset	41
6 Pohdintaa	44
Lähteet	47

Liitteet	52
Liite 1. Mustankorkean biokaasulaitoksen rejektiveden analyysitulokset.....	52
Liite 2. Eri alkuaineiden massaosuudet mikrolevän massasta.....	53
Liite 3. Biometaanin poltossa vapautuvan hiilidioksidin määrä.	54
Liite 4. Sitoutuvan hiilidioksidin määrä, kun kasvatetaan 100 kg levää.	55

Kuviot

Kuvio 1. Kaaviokuva avoimesta kilparata-altaasta	133
Kuvio 2. Putkimallinen fotobioreaktori	177
Kuvio 3. Säkkimäinen fotobioreaktori.....	18
Kuvio 4. Kolonnimainen fotobioreaktori.....	19
Kuvio 5. Paneelimainen fotobioreaktori.....	20
Kuvio 6. Horisontaali fotobioreaktori, HBR.....	21
Kuvio 7. Biofilmifotobioraktorin toimintaperiaate.....	21
Kuvio 8. <i>Chlorella vulgaris</i> levää ennen ja jälkeen ultraääniesikäsittely	26
Kuvio 9. Elinkaariarvioinnin vaiheet.....	28
Kuvio 10. Biometaanin valmistuksen vaiheet avoimessa kasvatusaltaassa ja fotobioreaktorissa.....	33
Kuvio 11. BIOFAT EU-projektissa rakennettu ohutpaneelifotobioreaktori Toscanassa Italiassa.....	36
Kuvio 12. Energiavertailu, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla fotobioreaktorissa ja avoimessa kasvatusjärjestelmässä.....	39
Kuvio 13. Energiankulutuksen jakautuminen eri prosessivaiheissa avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla.....	40
Kuvio 14. Energiankulutuksen jakautuminen eri prosessivaiheissa avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla.....	40
Kuvio 15. Kasvihuonekaasupäästöjen jakautuminen infrastruktuuriin ja tuotantoon, kun tuotetaan 1 GJ energiaa, biometaanilla.....	41
Kuvio 16. Meta-analyysillä saadut EROI-arvot mikrolevätutkimuksista.....	43

Taulukot

Taulukko 1. Avoimen ja suljetun kasvatusjärjestelmän edut ja haitat.....	12
Taulukko 2. Infrastruktuuriin sitoutunut energia ja kasvihuonekaasupäästöt avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa. Käyttöaika vuodessa 180 vrk.	34
Taulukko 3. Biometaanin tuotantoon kuluva energia ja kasvihuonepäästöt avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla	35
Taulukko 4. Infrastruktuuriin sitoutunut energia ja kasvihuonekaasupäästöt ohutpaneelifotobioreaktorissa, kun tuotetaan 1 GJ energiaa. Käyttöaika vuodessa 180 vrk	36
Taulukko 5. Biometaanin tuotantoon kuluva energia ja kasvihuonepäästöt ohutpaneelibioreaktorissa, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla	37

Käsitteet

adsorptio	kiinteän aineen kyky kiinnittää pinnalleen nestemäistä tai kaasumaista ainetta
autoflokkulaatio	ilman apuaineita tapahtuva pienten partikkelien yhteenliittyminen
autotrofi	omavarainen eliö
biogeeninen	eloperäinen
desorptio	adsorption käänteisprosessi, jossa nestemäinen tai kaasumainen aine irtoaa kiinteän aineen pinnasta
elektroforeesi	sähköisesti varautuneet hiukkaset kulkeutuvat sähkökentän vaikutuksesta kohti vastakkaismerkkistä elektrodia
energiaintensiivinen	prosessivaihe, jossa kuluu paljon energiaa
EROI	kuva energiantuotannon hyötysuhdetta, energy return on energy invested
esteröinti	reaktio, jossa rasvahapot reagoivat alkoholin kanssa muodostaen estereitä
flokki	pienien partikkelien yhteenliittymä
flotaatio	flokkien nostaminen nesteen pintaan kaasukuplien avulla
fotoinhibitio	leväsolussa fotosynteesin estävä valostressireaktio
heterotrofi	toisenvarainen eliö

irreversiibeli	prosessi, joka ei ole palautuva
KHK	kasvihuonekaasupäästöt
LCA	elinkaariarviointi, life cycle assessment
metanogeneesi	hapettomissa oloissa tapahtuva metaanin mikrobiologinen tuotanto
mikсотrofi	eliö, joka voi yhteyttää sekä käyttää energianlähteenä orgaanisia yhdisteitä
NER	nettoenergiasuhde, kertoo, paljonko polttoaineesta saadaan energiaa verrattuna energiaan, joka polttoaineen tuotannossa kuluu, Net Energy Ratio
rejektivesi	mädätysprosessissa syntyvä nestejäte
reversiibeli	palautuva prosessi
sedimentoituminen	gravitaation vaikutuksesta tapahtuva pienten partikkelien laskeutuminen nesteessä astian pohjalle
sentrifugi	laite, jossa keskipakoisuusvoiman avulla saadaan kiinteä aine erottumaan nesteestä
turbulentti	nesteen tai kaasun virtaus, jossa on pyörteisyyttä
VS	organisen aineen määrä, volatile solids

1 Biopolttoainetta mikrolevästä ravinteita kierrättämällä

Ilmastonmuutos ja fossiilisten polttoaineiden ehtyminen ovat kasvattaneet kiinnostusta uusiutuvia polttoaineita kohtaan sekä teollisuudessa että tiedemaailmassa. Kiinnostuksen kohteina ovat erityisesti biomassaan pohjautuvat ns. toisen sukupolven biopolttoaineet, jotka hyödyntävät orgaanista jätettä ja teollisuuden sekä maatalouden sivuvirtoja.

Ilmastonmuutos on globaali ongelma, joka pakottaa etsimään korvaavia tuotteita fossiilisille polttoaineille. Uusiutuvan energian käyttöä EU:n alueella ohjaa RES-direktiivi (Direktiivi 2009/28/EU). RES-direktiiviä tarkistettiin kesäkuussa 2018. Uudessa sopimuksessa asetetaan yleistavoitteeksi se, että EU:ssa 32 % kokonaisenergiasta saataisiin uusiutuvista lähteistä ja liikennepolttoaineista 14 % olisi biopolttoaineita vuoteen 2030 mennessä (Uusiutuva energia: neuvosto sopimukseen parlamentin kanssa 2018). Lisäksi ensimmäisen sukupolven biopolttoaineille asetetaan 7 % enimmäisosuus liikenteen energian loppukulutuksesta. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineilla tarkoitetaan polttoaineita, joita on tuotettu maatalousmaalla pääasiassa energiakäyttöön viljellyistä pääviljelykasveista (Direktiivi (EU) 2015/1513).

Euroopan komissio esitti uuden päivitetyn biotalousstrategiansa 11.10.2018. Strategialla pyritään kehittämään biotaloutta, joka hyödyntää kestävä kierrätöksen keinoja palvellessaan yhteiskuntaa, ympäristöä ja taloutta. Konkreettisina toimina vuodesta 2019 alkaen komissio pyrkii helpottamaan uusien kestävien biojalostamoiden kehittämistä kaikkialla Euroopassa. Komissio perustaa 100 miljoonan euron suuruisen biokierrätöksen aihekohtaisen investointifoorumin, jonka avulla pyritään tuomaan biopohjaiset innovaatiot lähemmäksi markkinoita ja vähentämään kestäviin ratkaisuihin tehtävien yksityisten investointien riskejä (Uusi biotalousstrategia kestäväälle Euroopalle 2018).

Biopolttoaineiden tuotanto on teknisesti ja taloudellisesti järkevää, jos ne ovat hinnaltaan kilpailukykyisiä fossiilisten polttoaineiden kanssa, ne tarvitsevat vain vähän

maapinta-alaa, parantavat ilmanlaatua (sitovat CO₂) ja niiden tuotantoon tarvitaan vain vähän vettä (Wang, Li, Wu & Lan 2008, 707).

EU:n uudessa biotalousstrategiassa nostetaan esiin mm. levien muuttaminen polttoaineeksi. Mikrolevä biopolttoaineiden raaka-aineena on kiinnostavaa siksi, että mikrolevällä on suuri kasvunopeus ja niiden kasvatukseen tarvitaan vain vähän maapinta-alaa. Lisäksi mikrolevän kasvatusta ei kilpaile ruuantuotannon kanssa, koska sitä voidaan kasvattaa ruuantuotantoon kelpaamattomilla maa-alueilla. (Zaimes & Khanna 2013, 1.) Mikrolevistä voidaan tuottaa monenlaisia biopolttoaineita esimerkiksi bioetanolia, biodieseliä ja biokaasua. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että leväpohjaisten biopolttoaineiden tuotanto ei ole taloudellisesti järkevää eikä kestävä kehityksen mukaista, jos levän kasvatuksessa käytetään keinotekoisia ravinteita (Andersson, Broberg, Hackl, Karlsson & Berntsson 2014, 115). Energia-analyysissä on todettu, että fossiilista energiaa kuluu paljon levän korjuuseen ja öljyn uuttamiseen levämassasta. Tällöin energiatase menee helposti negatiiviseksi, toisin sanoen fossiilista energiaa kuluu enemmän kuin bioenergiaa pystytään tuottamaan. (Zaimes & Khanna 2013; Norsker, Barbosa, Vermue & Wijffels ym. 2011). Siksi on tarpeen löytää energiatehokkaampi tapa käyttää leväbiomassaa bioenergian tuotantoon. Jos leväbiomassaa käytetään biokaasulaitoksen syötteenä, vähenee vedenpoiston tarve ja näin saadaan energiankulutusta pienennettyä. Tällöin tuotetaan metaania bioetanolin ja biodieselin sijaan. Biokaasulaitoksen ravinnerikas rejektivesi voidaan ohjata levän kasvatusliuokseksi. Näin saadaan ravinteet takaisin kiertoön ja välttämään kalliiden keinoravinteiden käytöltä. (Collet, Helias, Lardon, Ras, Goy & Steyer 2011, 207.)

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan voiko biokaasulaitoksen rejektivedessä kasvattaa mikrolevää kestävästi. Työssä vertaillaan mikrolevän avointa kasvatustajärjestelmää ja fotobioreaktoria elinkaariarvioinnin avulla (LCA, Life Cycle Assessment). Mikroleväbiomassa käytetään biokaasulaitoksen syötteenä biometaanin tuotantoon. Tapausesimerkkinä tarkastellaan Mustankorkean biokaasulaitosta Jyväskylässä.

2 Mikrolevän kasvatusta ja biokaasun tuotanto

2.1 Mikrolevät

Mikrolevät ovat mikroskooppisen pieniä yksisoluisia eliöitä, jotka tuottavat happea. Mikrolevän kuivapainosta n. 50 % on hiiltä. Ne tarvitsevat kasvaakseen energiaa, hiilenlähteen ja ravinteita. Tarvitsemansa energian levät voivat ottaa auringonvalosta tai veteen liuenneista orgaanisista yhdisteistä. (Kinnunen 2016, 4.) Levät jaetaan kasvatustapansa mukaan autotrofeihin, heterotrofeihin ja miksotrofeihin (Lunkka-Hytönen, Lohtander-Buckbee & Ruohonen -Lehto 2016, 25). Autotrofiset levät yhteyttävät käyttäen auringonvaloa energianlähteenä ja hiilenlähteenä ne käyttävät veteen liuenneita hiilidioksidia. Heterotrofiset levät eivät yhteytä, vaan ne käyttävät orgaanisia yhdisteitä sekä hiilen- että energianlähteenä ja siksi eliöt voivat elää pimeässä. Miksotrofiset levät voivat käyttää energianlähteenä sekä auringonvaloa, että orgaanisia yhdisteitä ja hiilenlähteenä veteen liuenneita hiilidioksidia ja orgaanisia yhdisteitä. Miksotrofiset levät voivat yhteyttää päivällä, kun auringonvaloa on saatavilla ja jatkaa kasvua yöllä orgaanisten yhdisteiden turvin. (Chojnacka & Marquez-Rocha 2004, 22.)

2.1.1 Mikrolevä biopolttoaineena

Mikrolevät ovat herättäneet paljon kiinnostusta viime aikoina ja niiden käyttöä biopolttoaineiden raaka-aineena on tutkittu paljon ympäri maailmaa. Mikrolevästä voidaan valmistaa monenlaisia polttoaineita esimerkiksi biodieseliä, bioetanolia, biovettyä ja biometaania. Mikrolevän kasvatusta tarvitsee vain vähän maapinta-alaa verrattuna ensimmäisen sukupolven biopolttoaineissa käytettyihin viljelykasveihin. Sitä voidaan kasvatella sellaisilla maa-alueilla, jotka eivät sovellu viljelykäyttöön. Näin ollen sen kasvatusta ei kilpaile ruuan- tai rehutuoannon kanssa, eikä kasvatusta aiheuta maankäytön muutoksia. Mikrolevää voidaan kasvatella jätevedessä, jolloin saadaan hyödynnettyä jäteveden sisältämät ravinteet, pääasiassa typpi ja fosfori. Levien kasvunopeus on erittäin suuri, ne voivat kaksinkertaistaa biomassansa jopa 3,5 tunnissa. (Brennan & Owende 2010, 558.) On todettu, että levät pystyvät tuottamaan enemmän öljyä hehtaaria kohden kuin perinteiset öljykasvit (Lunkka-Hytönen ym.

2016, 19). Mikroleväbiomassasta voidaan polttoaineiden lisäksi valmistaa myös korkeamman jalostusasteen tuotteita esim. lääke- ja kosmetiikkateollisuuden tarpeisiin. Mikrolevät parantavat ilmanlaatua sitomalla hiilidioksidia ilmakehästä. Yksi kilogramma kuivaa mikroleväbiomassa kuluttaa 1,83 kg hiilidioksidia (Chisti 2007, 297).

Leväbiomassan käytössä on myös omat haasteensa. Jos leväbiomassasta valmistetaan biodieseliä tai korkeamman jalostusasteen tuotteita, pitää leväkantojen olla puhtaita. Erilaiset leväkannat soveltuvat eri tarkoituksiin. Esimerkiksi biodieselin valmistukseen kannattaa valita leväkanta, jossa rasvapitoisuus on mahdollisimman korkea. Yhteyttävät autotrofiset levät tarvitsevat paljon auringonvaloa, mikä tuo haasteita kasvatusjärjestelmän suunnitteluun ja toteutukseen. Suomessa levälajiksi kannattaa valita mikсотrofinen levä, koska levä kasvaa myös ilman valoa. Erityisesti avoimissa kasvatusjärjestelmissä veden haihtuminen ja hiilidioksidihäviöt ovat ongelmana. Levän kasvatusprosessi sisältää useita energiaintensiivisiä vaiheita mm. kasvatusliuoksen sekoitus, kaasujen kuljetus ja vedenpoisto levämassasta. (Brennan & Owende 2010, 568.) Toistaiseksi teollisessa mittakaavassa toimivia leväkasvattamoja on vain vähän. Tämän vuoksi tutkimustietoa suuren mittakaavan laitoksista ei juuri ole.

Biopolttoaineiden tuotannossa hyödynnetään mikrolevien suurta öljypitoisuutta. Myös levämassan sisältämiä hiilihydraatteja ja valkuaisaineita voidaan käyttää biopolttoaineiden valmistuksessa (Lunkka-Hytönen ym. 2013, 9). Biodieselin valmistuksessa käytettävään mikrolevään pyritään saamaan mahdollisimman korkea rasvapitoisuus, jotta esteröinnin tuloksena saadaan biodieselille suuri saanto. Rasvan määrään pystytään vaikuttamaan jonkin verran myös levän kasvuolosuhteilla. Esimerkiksi levän tyyppien saantia rajoittamalla on saatu rasvapitoisuutta nostettua merkittävästi (Rodolfi, Graziella, Zittelli, Bassi, Padovani, Biondi, Bonini & Tredici 2009, 101). Biomassan suuri rasvapitoisuus nostaa myös biokaasuprosessin metaanin saantoa, mutta se voi häiritä biokaasuprosessin metanogeneesi vaihetta, jossa asetaatista (CH_3COO^-), vedystä ja hiilidioksidista muodostuu biokaasua (Biokaasuteknologia 2016, 59.) Rasvojen ja proteiinien suuri määrä biomassassa voi johtaa ammoniakkin ja pitkäketjuisten rasvahappojen kerääntymiseen biokaasuprosessiin. Nämä ovat merkittäviä mädätysprosessia inhiboivia yhdisteitä. Biokaasutuotannon etuna on, ettei siinä tarvita puhtaita leväkantoja toisin kuin biodieselin tuotannossa. Tämä osaltaan

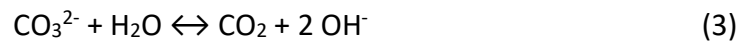
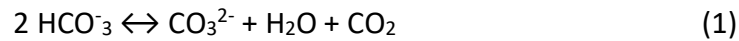
laskee mikrolevän tuotantokustannuksia biokaasuprosessin yhteydessä. (Murphy, Drog, Allen, Jerney, Xia, Herrmann 2015, 25.)

2.1.2 Mikrolevän kasvuolosuhteet

Tärkeimmät tekijät, jotka säätelevät levän kasvua ovat lämpötila, ravinteiden määrä ja laatu, pH sekä valon määrä. Optimilämpötila levän kasvulle on 20–30 °C. Jos lämpötila laskee alle 15 °C:een, alkaa levän kasvunopeus hidastua merkittävästi. Korkeissa lämpötiloissa (> 35 °C) leväsolut tuhoutuvat. (Lunkka-Hytönen ym. 2016, 33.) Suomen olosuhteissa levän kasvatuskausi jää melko lyhyeksi, jos sitä kasvatetaan ulkona avoimissa kasvatusjärjestelmissä. Kasvatusta voidaan tehdä myös kasvihuoneissa. Olennaisimpia rakennusaineita kuten typpeä, rautaa, fosfaatteja ja silikaatteja tarvitaan suuret määrät. Optimaalisen kasvun saavuttamiseksi tarvitaan ravinteita samassa suhteessa, mitä alkuaineita esiintyy mikrolevän kemiallisessa koostumuksessa, joka esitetään usein muodossa $\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$. Fosforia on syytä lisätä kasvuliuokseen ylimäärin, koska fosfori muodostaa metalli-ionien kanssa fosfaatteja, jotka eivät ole biologisesti mikrolevän hyödynnettävissä. (Chisti 2007, 297.) Leväkasvuston pitää saada tarvitsemansa ravinteet kasvuliuoksesta. Tarvittava ravinteiden määrä vaihtelee jonkin verran riippuen levälajista. Keinoravinteiden käyttö on kallista ja niiden valmistuksella on suuri ympäristövaikutus (Andersson ym. 2014, 115). Tämän vuoksi levän kasvatuksessa pyritään hyödyntämään jätevesiä tai muita ravinnerikkaita vesijakeita, kuten biokaasulaitoksen rejektivettä.

Ilmakehästä saatava hiilidioksidi ei tyydytä mikroleväkasvuston hiilen tarvetta, sillä hiilidioksidin diffuusionopeus ilmakehästä avonaiseen kasvatusaltaaseen on vain n. 10 – 12 g m⁻²vrk⁻¹. Kasvuliuokseen tarvitaan yhteyttäville leville hiilidioksidilisäys, jonka avulla voidaan myös säädellä kasvuliuoksen pH:ta. Levät viihtyvät pH-alueella 7–9 ja optimi pH on välillä 8,2 – 8,7 (Huang, Jiang, Wang & Yang 2017, 321). Levän voimakas kasvu nostaa kasvuliuoksen pH:ta. Hiilidioksidin lisäyksellä saadaan pH:ta laskettua. Karbonaatti- (CO_3^{2-}) ja bikarbonaatti-ioneilla (HCO_3^-) on tärkeä merkitys kasvuliuoksen pH:n säätelyssä. Ne muodostavat puskuriliuoksen, joka pyrkii säilyttämään leville sopivan pH:n. Ne tuottavat hiilidioksidia kasvuliuokseen reaktioyhtälöiden 1, 2 ja 3 mukaisesti. Reaktiot ovat tasapainoreaktioita eli voivat toimia kumpa-

kin suuntaan. Jos kasvuliuksen pH nousee paljon, alkavat reaktiot 2 ja 3 toimia oikealta vasemmalla. Näin saadaan hydroksidi-ionien pitoisuutta pienennettyä ja liuksen pH laskee.



Miksotrofiset levät voivat käyttää hiilen lähteenä hiilidioksidin lisäksi sokereita, karboksyylihappoja ja alkoholeja. Näiden kasvustoissa voidaan pH:n säätöä tehdä esim. etikkahapolla. (Grobbelaar 2013, 126.)

Mikrolevän kasvun kannalta hiilen jälkeen tärkein ravinne on typpi. Typen määrä voi vaihdella 1 – 10 % leväbiomassasta, riippuen levälajista ja typen saatavuudesta. Typpeä käytetään eniten nitraattimuodossa (NO_3^-), mutta usein on käytetty myös ammoniumtyppeä (NH_4^+) ja ureaa. Jos ammoniumtyppeä käytetään pääasiallisena typen lähteenä, saattaa pH merkittävästi laskea, koska H^+ -ioneja vapautuu. Tällöin samalla vapautuu ammoniakkia (NH_3), joka poistuu haihtumalla liuksesta. Fosfori on tärkeä alkuaine kasville ja monille soluprosesseille kuten energia-aineenvaihdunnalle ja nukleiinihappojen biosynteesille. Levät ottavat fosforin mieluiten ortofosfaattimuodossa (PO_4^{2-}). Vaikka leväbiomassa sisältää alle 1 % fosforia, on fosfori yksi tärkeimmistä kasvua rajoittavista tekijöistä leväbioteknologiassa. (Grobbelaar 2013, 127.)

Parkin (2011, 37) mukaan ainoastaan 12,8 – 14,4 % auringon säteilyenergiasta pystytään teoreettisesti muuntamaan fotosynteesissä leväbiomassaksi. Kun valon intensiteetti kasvaa, kasvaa myös fotosynteesissä tuotettu levämäärä. Valon saturatiopisteessä saavutetaan levämäärän maksimikasvunopeus. Jos valon intensiteettiä tästä kasvatetaan, voi se johtaa levän fotoreseptorien vioittumiseen ja tämä vähentää levämäärän tuottoa (fotoinhibitio). Kun leväbiomäärän konsentraatio kasvaa, kasvaa myös biomäärän tuottama varjostusefekti. Kasvuliuos pitää saada turbulentiin liikkeeseen, jotta varmistetaan mikrolevien mahdollisimman hyvä valonsaanti. Avoimissa kasvatusaltaissa tämä saadaan aikaan siipirattaan avulla. Fotobioreaktoreissa kaasukuplat pitävät kasvuliuksen liikkeessä.

2.1.3 Mikrolevän kasvatusjärjestelmät

Mikrolevää voidaan kasvattaa sekä ulkona että sisätiloissa. Ulkona kasvatus on taloudellisempaa, koska pystytään hyödyntämään auringonvaloa. Kasvatusjärjestelmät jaetaan yleensä avoimiin ja suljettuihin järjestelmiin. Biomassan tuottavuus vaihtelee suuresti kasvatusjärjestelmän mukaan: avoimissa systeemeissä $10\text{--}25\text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$, suljetuissa systeemeissä $35\text{--}40\text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ja ohutlevysysteemeissä $80\text{--}100\text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$. (Murphy ym. 2015, 19.) Taulukossa 1 on vertailtu avoimen ja suljetun kasvatusjärjestelmän etuja ja haittoja.

Taulukko 1. Avoimen ja suljetun kasvatusjärjestelmän edut ja haitat (Pulz. 2001, 289).

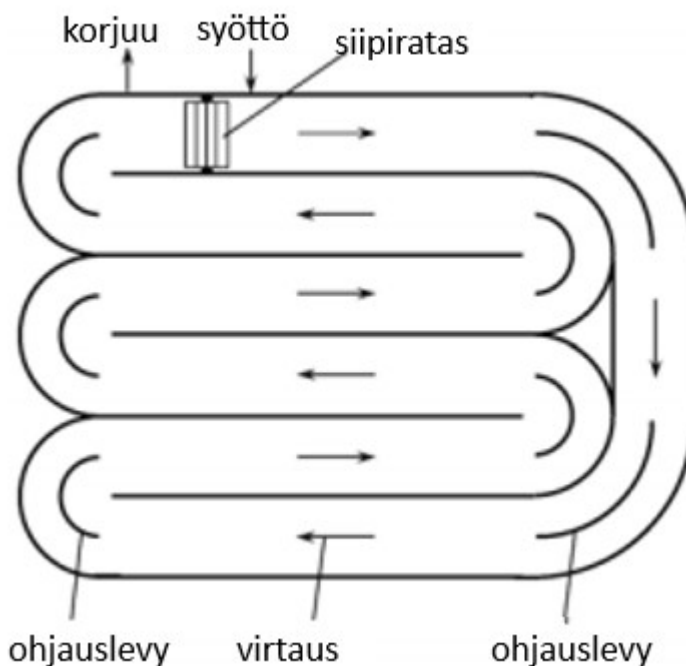
Kasvatus menetelmä	Edut	Haitat
Avoim	<ul style="list-style-type: none"> • halpa • hyvä kaasujen vaihto ilmakehän kanssa • helppo käyttöinen • helppo skaalattavuus 	<ul style="list-style-type: none"> • korkea kontaminaatoriski • suuret haihtumishäviöt • vaatii suuren pinta-alan • valon määrän rajallisuus, jos käytetään paksuja kerroksia
Suljettu	<ul style="list-style-type: none"> • hyvä kasvatusparametrien kontrolli • pieni kontaminoitumisriski • vähemmän CO₂-häviöitä • toistettavat kasvatusolosuhteet 	<ul style="list-style-type: none"> • kallis • skaalaus vaikeaa

Avoimet kasvatusjärjestelmät

Avoimet järjestelmät voidaan jakaa avoimiin sammioihin, luonnon vesiin, kaltevan pinnan laitteisiin ja kilparata-altaisiin. Eniten näistä käytetään kilparata-altaita. Avoimissa kilparata-altaisissa mikrolevän massatuotantoon yleisimmin käytetty levälaji on *Chlorella vulgaris*. (Lardon, Helias, Sialve, Steyer & Bernard 2009; Zaimes ym. 2013; Collet ym. 2011.) *Chlorella vulgaris* on mikсотrofinen levä, joka yhteyttää silloin kun auringonvaloa on saatavilla ja jatkaa kasvuaan pimeässä hyödyntäen kasvuliuoksessa

olevia orgaanisia hiiliyhdisteitä (Rodolfi, Graziella, Zittelli, Bassi, Padovani, Biondi, Bonini & Tredici 2009).

Avoimet kilparata-altaat ovat tyypillisesti rakennettu suljetun silmukan muotoisista takaisinkierrätys kanavista, joiden syvyys on yleensä 0,3 m. Kuviossa 1 on esitetty kaaviokuva kilparata-altaasta. Altaat on rakennettu betoniin tai hyvin tiiviiseen maaperään. (Chisti 2007). Ne voidaan vuorata valkoisella muovilla, jolla saadaan pienennettyä kontaminaatioriskiä ja parannettua altaiden puhdistettavuutta. Altaiden vuoraminen on suurin yksittäinen kuluerä avoimessa kasvatusjärjestelmässä. (Rogers, Rosenberg, Guzman, Oh, Mimbela, Ghassemi, Betenbaugh, Oyler & Donohue 2014, 82.)



Kuvio 1. Kaaviokuva avoimesta kilparata-altaasta (Chisti 2007, 297).

Kasvatusliuos pidetään liikkeessä siipirataan avulla, altaan kaarteissa on ohjauslevyt ohjaamassa virtausta. Jatkuvatoimisella sekoituksella estetään mikrolevän sedimentoituminen. Samalla huolehditaan siitä, että leväkasvusto saa mahdollisimman paljon valoa ja viipymä pimeällä vyöhykkeellä olisi mahdollisimman lyhyt. Kasvuliuoksen ja ravinteiden syöttö tapahtuu siipirataan edestä ja levän korjuu siipirataan takaa.

Kasvuliuksen virtausnopeus on yleensä säädetty 30 cms^{-1} . Sekoitus muodostaa merkittävän käyttökustannuksen, koska se on toiminnassa ympärivuorokauden. (Brennan & Owende 2009, 561.) Valon saannin kannalta on suuri virtausnopeus edullinen. Toisaalta liian suuri virtausnopeus voi vioittaa leväkasvustoa. Käyttökustannusten optimoinnin kannalta on mietitty mahdollisuutta pienentää virtausnopeutta esim. 25 cms^{-1} yöaikaan ja näin saada energiasäästöjä (Rogers ym. 2014, 82).

Avoimen järjestelmän etuina ovat sen edulliset rakennus- ja ylläpitokustannukset. Tämän vuoksi niitä käytetään paljon levän massatuotannossa. Kasvatusjärjestelmän skaalaaminen on myös helppoa, koska se on rakenteeltaan yksinkertainen eikä se sisällä paljoa automaatiota. Avoimilla kasvatusjärjestelmillä on myös monia heikkouksia. Avoin kasvatusjärjestelmä on altis vuodenaikojen vaihtelulle. Leväkannat voivat helposti kontaminoitua, minkä seurauksena tuottavuus pienenee tai leväkanta voi tuhoutua kokonaan. Lämpötilaa eikä valon saatavuutta pystytä säätelemään ja pH:n säätäminenkin on vaikeaa. (Murphy ym. 2015, 20.) Avoimissa altaissa tapahtuu haihduntaa, mikä voi merkittävästi vaikuttaa kasvuliuksen ionikonsentraatioihin ja lämpötilaan (Brennan & Owende 2009, 561).

Suljettu kasvatusjärjestelmä (fotobioreaktorit)

Suljetuissa järjestelmissä käytetään monenlaisia fotobioreaktoreita (PBR photo bio-reactor). Levää voidaan kasvattaa mm. pysty tai vaakaputkissa, levyillä, kalvoilla, paneeleissa ja fermentointisäiliön kaltaisissa reaktoreissa. Viimeksi mainitut tarvitsevat keinovalaistusta. Suljetut järjestelmät ovat monimutkaisempia, mutta ne mahdollistavat mikrolevän kasvun kannalta tärkeiden parametrien tehokkaan säädön. Myös kontaminaatoriski on fotobioreaktoreissa huomattavasti pienempi kuin avoimissa järjestelmissä. Fotobioreaktorien tärkeimmät haasteet ovat: valon tasainen jakautuminen, hiilidioksidin johtaminen systeemiin, hapen poisto ja riittävän sekoituksen aikaansaaminen. Eduistaan huolimatta fotobioreaktorit ovat niin kalliita, että mieluummin suositaan avoimia järjestelmiä mikrolevän massatuotannossa, jos vapaata maapinta-alaa on käytettävissä. (Murphy ym. 2015, 21.)

Kiinnostus fotobioreaktoreita kohtaan on tällä vuosikymmenellä ollut merkittävää ja paljon laadukasta tutkimusta on tehty. Huang ja muut ovat tutkineet laajasti massatuotantoon soveltuvien fotobioreaktorien suunnittelunäkökohtia. Tärkeimpänä teki-

jänä esiin nousee valon riittävyys mikroleväsolujen kasvuun. Tehokkaan fotobioreaktorin toiminnan edellytyksenä on hyvä teoreettinen tietämys solun kasvusta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Valon penetraatio ja jakautuminen reaktorissa ovat suunnittelun keskiössä. Koska auringonvaloa on saatavilla runsaasti ja se on ilmaista, pyritään sitä hyödyntämään mikrolevän kasvatuksessa mahdollisimman paljon ja näin säästetään kustannuksissa. Auringon säteilystä aallonpituusalue 400-700 nm on fotosynteettisesti aktiivista, tämä vastaa karkeasti näkyvän valon aluetta. On hyvin tunnettua, että valon intensiteetti vähenee melkein eksponentiaalisesti, kun etäisyys fotobioreaktorin säteilyä vastaanottavasta seinästä kasvaa. Joissain tilanteissa valon penetraatio voi olla vain joitakin millimetrejä, kun mikrolevän konsentraatio ylittää arvon 10 g/l. Jos valon intensiteetti ylittää kriittisen arvon, alkaa leväkasvusto kärsiä fotoinhibitiosta, joka vähentää levän kasvua. Valostressin pituus vaikuttaa siihen onko fotoinhibitiio reversiibeli vai irreversiibeli. Fotobioreaktorien maantieteellisellä sijoittelulla on myös merkitystä. Reaktorit kannattaa sijoittaa länsi/itäsuuntaan, sillä on havaittu, että tällä sijoitustavalla on saavutettu 1,4-kertainen biomassantuotto verrattuna etelä/pohjoissuuntaan. Jotta fotobioreaktorissa saavutettaisiin suuri biomassan tiheys, tulee reaktorin paksuus olla mahdollisimman pieni. (Huang ym. 2017, 319.) Tutkimuksissa on havaittu, että biomassan tuotto 2,5-kertaistuu, kun valon kulukema matka kasvuliuksessa pienenee 30 mm:stä 15 millimetriin (Degen, Uebele, Retze, Schmid-Staiger & Trösch 2001, 89).

Kasvuliuksen sekoitus on monella tapaa tärkeä mikrolevän kasvatuksessa. Se tasoittaa ravinteiden jakautumista, lämpötilaa ja pH:ta. Sekoituksen avulla estetään levämäärän sedimentoituminen ja tarttuminen reaktorin seinämiin. Sekoitus takaa sen, että kaikki mikrolevät saavat tasaisesti valoa ja se helpottaa aineensiirtoa eri faasien välillä. Sekoitus ei kuitenkaan saa olla niin voimakasta, että se aiheuttaisi vaurioita mikroleväsoluille. Kasvuliuksen suositeltava virtausnopeus on 20-50 cm/s. Fotobioreaktorissa sekoitus voidaan järjestää pumppauksella, staattisilla sekoittimilla tai syöttämällä suuttimien avulla hiilidioksidilla rikastettua ilmaa, jolloin kasvuliukseen syntyy kaasukuplia, jotka saavat aikaan virtauksen. (Huang ym. 2017, 319.)

Putkimaiset fotobioreaktorit (Tubular PBR) ovat sopivimpia mikrolevän massakasvatukseen ulkotiloissa, koska niissä saavutetaan suhteellisen suuri pinta-ala auringon

säteilylle. Rakennemateriaalina käytetään lasia tai muovia. Reaktoriputkien halkaisijat ovat yleensä 10-60 mm ja pituus saattaa olla satoja metrejä. Putkimaiset reaktorit on usein sijoitettu aitamaiseksi rakenteeksi, jotta maankäyttöä saadaan minimoitua. Putkimainen fotobioreaktori on esitetty kuviossa 2. Vaikka putkimaiset fotobioreaktorit ovat suosittuja, niillä on paljon epäkohtia. Jos reaktorin halkaisija on kovin suuri, jäävät reaktorin keskellä olevat levät helposti ilman valoa. Aineensiirto pitkissä reaktoriputkissa voi olla haasteellista. Hiilidioksidin tasainen saanti on tärkeää levän fotosynteesin vuoksi. Happi inhiboi levän kasvua ja pitkissä putkissa hapen riittävä poisto voi olla vaikeaa. Myös pH:n säätö on haasteellista tällaisessa järjestelmässä. Kesällä reaktorin jäähdyttäminen voi olla tarpeen, mutta sitä on vaikea järjestää. Reaktorin puhdistaminen on vaikeaa ja likaantuminen vaikuttaa suoraan valon läpäisevyyteen reaktorin seinässä. (Huang ym. 2017, 322.) Brasilialaiset tutkijat ovat tehneet vertailevaa elinkaariarviointia mikroleväbiomassan kasvatukselle avoimissa altaissa ja fotobioreaktoreissa. He tulivat siihen johtopäätökseen, että putkimaisissa fotobioreaktoreissa ei päästä nettoenergiasuhteessa (NER) yli yhden eli energian kuluu enemmän kuin pystytään tuottamaan. (Jorguera, Kiperstok, Sales, Embirucu & Ghirardi 2010, 1406.) Nettoenergiasuhteen määritelmä on esitetty yhtälössä 4.

$$NER = \frac{\sum \text{Tuotettu energia}}{\sum \text{Tuotantoon tarvittava energia}} \quad (4)$$



Kuvio 2. Putkimallinen fotobioreaktori (Fotobioreaktori 2018)

Viime vuosina on markkinoille tullut muovisia säkkimäisiä reaktoreita (Plastic bag PBR). Nämä ovat herättäneet kiinnostusta erityisesti halvan hintansa vuoksi. Niiden käytössä mikrolevän massatuotannossa on kuitenkin lukuisia ongelmia. Valon saanti ei ole tasaista, kasvuliuoksen sekoitus on vaikeaa, säkkien puhdistus on vaikeaa ja niissä on usein vuotoja. Säkkien elinikä on lyhyt, niinpä mikrolevän tuotanto pitkällä aikavälillä näissä reaktoreissa ei ole taloudellisesti järkevää. Lisäksi säkeistä syntyy suuri määrä muovijätettä. (Huang ym. 2017, 323.) Kuviossa 3 on esitetty säkkimäinen fotobioreaktori.



Kuvio 3. Säkkimäinen fotobioreaktori (Huang ym. 2017)

Kolonnimaisissa reaktoreissa (column airlift PBR) kasvuliuksen sekoitus tapahtuu ilmakuplien avulla. Hiilidioksidilla rikastettua ilmaa syötetään kolonnin pohjasta tai keskeltä, tällöin leväsoluihin kohdistuu pienempiä leikkausjännityksiä kuin esim. mekaanisessa kasvuliuksen pumppauksessa. Tällaisissa reaktoreissa kaasu/neste-ai-neensiirto toimii paremmin kuin putkimaisissa reaktoreissa. Kolonnin maksimihalkaisija on 0,2 m, muutoin kolonnin keskiosassa levien valonsaanti heikkenee merkittävästi. Rakenteellisten seikkojen takia kolonnien maksimikorkeus on n. 4 m. Kolonnimaisten fotobioreaktorien käyttökustannukset ovat alhaiset, mutta investointi kustannukset ovat korkeat. Kolonnien puhdistus on melko haasteellista. Rajoituksistaan huolimatta tämä reaktorityyppi on tällä hetkellä lupaavin mikrolevän teolliseen kasvatukseen. (Huang ym. 2017.) Mikrolevän kasvatusta kosmetiikkateollisuuden tarpeisiin kolonnimaisessa fotobioreaktorissa on esitelty kuviossa 4.



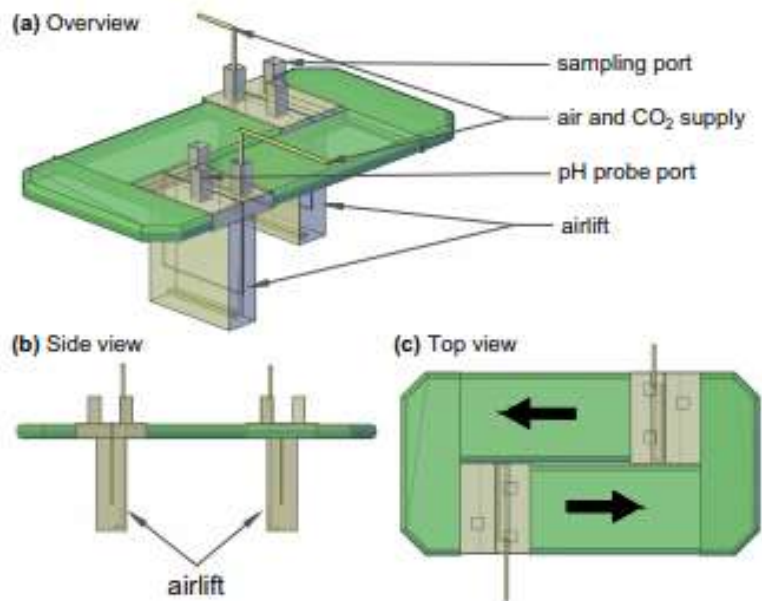
Kuvio 4. Kolonnimainen fotobioreaktori (Yeomans 2013)

Huang ja muut ovat patentoineet ohuen paneelimaisen fotobioreaktorin (flat-panel airlift PBR). He pitävät tätä reaktorityyppiä yhtenä kaikkein lupaavimmista mikrolevän massatuotantoon. Tämän reaktorityypin etuja ovat: hyvä pinta-ala/tilavuussuhde, helppo lämpötilan säätely ruiskuttamalla vettä paneelin pintaan, leväsoluihin kohdistuu vain vähän mekaanisia voimia, aineensiirto ja sekoitus toimivat hyvin. Paneelireaktorin käyttökustannukset ovat alhaiset ja se on helppo puhdistaa. Paneelireaktorit ovat pitkäikäisiä, sillä ne voidaan valmistaa lasista ja betonista. (Huang ym. 2017, 323.) Kuviossa 5 on esitetty Subitecin paneelimainen fotobioreaktori, joka sijaitsee biokaasulaitoksen yhteydessä Eutingen-Weitingenissä Saksassa.



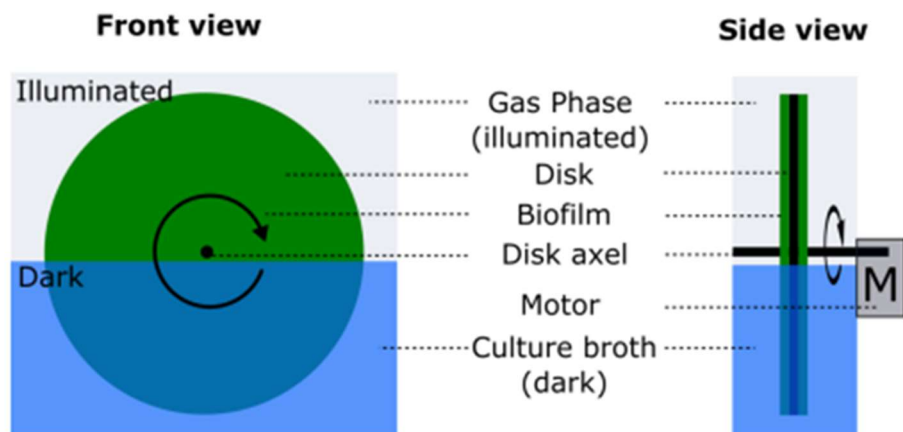
Kuvio 5. Paneelimainen fotobioreaktori (Pilot- and production plants for algae cultivation 2018)

Amerikkalaistutkijat ovat kehittäneet pilot-mittakaavaisen kelluvan horisontaalisen fotobioreaktorin, joka pyrkii yhdistämään avoimen kilparata-altaan ja fotobioreaktorin hyvät puolet. Horisontaali fotobioreaktori (HBR) muodostuu kahdesta läpinäkyvästä polyeteeni muovikalvosta, jonka paksuus on 0,15 mm. Koelaitteiston koko oli 133,5 x 68 cm, syvyys 5 cm. Kasvuliuoksen sekoitus tapahtui hiilidioksidilla rikastetulla ilmalla, jonka virtausnopeus oli 10 Lmin⁻¹. Tällä laitteistolla päästiin *Nannochloris atomus* levällä 4,0 gL⁻¹ konsentraatioon. Kasvatusta tehtiin sekä ulkona Floridassa, että sisätiloissa keinovalaistuksessa. Sisätiloissa päästiin 12,9 gm⁻²d⁻¹ tuotantoon ja ulkona 18,2 9 gm⁻²d⁻¹. (Dogaris, Welch, Meiser, Walmsley & Philippidis 2015, 316.) Horisontaalin fotobioreaktorin kaaviokuva on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Horisontaali fotobioreaktori, HBR (Dogaris ym. 2015).

Blanken (2016) on tutkinut väitöskirjassaan biofilmillä tapahtuvaa kasvatusta, tästä kaaviokuva on esitetty kuviossa 7. Biofilmifotobioreaktorissa hiilidioksidin kuplitusta ei tarvita, koska hiilidioksidi siirtyy biofilmiin suoraan kaasufaasista.



Kuvio 7. Biofilmifotobioraktorin toimintaperiaate (Blanken 2016.)

2.1.4 Mikrolevän korjuumenetelmät ja vedenpoisto

Mikrolevän korjuumenetelmiä on kehitetty paljon viimeisten vuosikymmenten aikana, mutta ainoastaan joitakin niistä voidaan pitää tehokkaina ja kustannuksiltaan järkevinä. Mikrolevän korjuu kasvatusliuoksesta on monellakin tapaa hankalaa. Levän konsentraatio on hyvin alhainen, ne ovat pienikokoisia (usein halkaisijaltaan alle 30 µm) ja levän tiheys on lähellä veden tiheyttä. Tämä tarkoittaa sitä, että levämassan erottaminen kasvuliuoksesta vaatii paljon energiaa.

Kemikaalipohjaisissa korjuumenetelmissä käytetään elektrolyyttejä tai synteettisiä polymeerejä, joiden avulla mikrolevien negatiivinen pintavaraus saadaan poistettua ja leväpartikkelit pystyvät muodostamaan suurempia flokkeja. Tällä menetelmällä päästään 3–8 % kuiva-ainepitoisuuteen. Mekaanisia korjuumenetelmiä ovat: sentrifugointi, suodatus, sedimentaatio ja liuenneen ilman avulla tapahtuva flotaatio. Sentrifugointi perustuu keskipakoisuusvoiman käyttöön erilaisen tiheyden omaaville partikkeleille. Se on todennäköisesti luotettavin ja nopein tapa erottaa levämassaa kasvuliuoksesta. Se on myös helppokäyttöinen, mutta investointikustannukset ovat korkeat ja käyttö on kallista. Sentrifugoinnilla päästään 10–22 % kuiva-ainepitoisuuteen. Suodatusta käytetään yleensä rihmamaisille lajikkeille. Tällöin käytetään yleensä tangentialivirtaussuodatusta. Suodatus on kallis ja paljon tehoa vaativa erotusmenetelmä. Sillä päästään 2–27 % kuiva-ainepitoisuuteen riippuen menetelmästä. Sedimentaatioissa levämassa painuu painovoiman vaikutuksesta kasvatusaltaan pohjaan. Menetelmä on erittäin hidas, johtuen levämassan alhaisesta tiheydestä. Sedimentaatio on halpa, mutta epäluotettava menetelmä. Sillä päästään 0,5–3 % kuiva-ainepitoisuuteen. Flotaatioissa korkeapaineista ilmaa vapautetaan kolonnissa levän kasvatusliuokseen. Tällöin muodostuu ilmakuplia, joiden pinnalle leväflokkit tarttuvat. Ilmakuplat nostavat flokkautuneen levän kasvatusliuoksen pintaan. Tätä menetelmää on kokeiltu myös laajassa mittakaavassa. Flotaatioissa käytetään usein apuaineita, jotka saattavat häiritä levämassan jatkoprosesointia. Levän korjuuseen on kokeiltu myös sähköisiä menetelmiä. Elektroforeesi on menetelmä, jossa sähköisesti varautuneita hiukkasia erotetaan sähkökentän avulla. Elektroforeesissa ei tarvita kemikaleja, mutta sähkövirran tarve on suuri ja laitteistoissa käytettävät elektrodit ovat kalliita. Biologisia menetelmiä on myös kehitteillä. Autoflokkulaatioissa kasvuliuoksen korkean pH:n ja liuenneen hiilidioksidin avulla saadaan levämassa flokkuloitumaan

yhdessä kalsiumfosfaatin kanssa. Joissain biologisissa menetelmissä käytetään mikro-
beja flokkauksen apuaineina. (Murphy ym. 2015.)

Hollannissa on äskettäin tehty teknistaloudellinen tutkimus, jossa arvioidaan mikrolevän korjuusta ja vedenpoistosta aiheutuvia kuluja ja energian kulutusta. Tässä tutkimuksessa saatiin mikrolevän korjuukustannuksiksi $0,5\text{--}2 \text{ €kg}^{-1}$ ja energiankulutukseksi $0,2\text{--}5 \text{ kWhkg}^{-1}$ leväbiomassaa, kun levää kasvatetaan avoimissa altaissa. Suljetuissa järjestelmissä vastaavat arvot olivat $0,1\text{--}0,6 \text{ €kg}^{-1}$ ja $0,1\text{--}0,7 \text{ kWhkg}^{-1}$ leväbiomassaa. Tutkimuksessa todetaan, että työvoimakustannukset ovat merkittävät. Kustannuksia voitaisiin karsia panostamalla prosessin automaatioon. Alhaisimmat kustannukset ja pienin energian kulutus saavutettiin, kun korjuumenetelmänä käytettiin painesuodatusta ja vedenpoistoon käytettiin sentrifugia. (Fasaei, Bitter, Slegers & van Boxtel 2018, 347.)

2.2 Biokaasu

Biokaasua syntyy biologisen hajoamisprosessin tuloksena. Biokaasun pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi. Luonnossa biokaasua syntyy hapettomissa olosuhteissa esim. järvien ja soiden pohjasedimenteissä ja märehitijöiden pötsseissä. Biokaasun raaka-aineena voidaan käyttää biojätteitä, lantaa, jätevesilietteitä, maatalouden ja teollisuuden orgaanisia sivuvirtoja. Lähes kaikki orgaaninen aines voidaan mädättää, mutta tekniikka sopii parhaiten helposti hajoavalle materiaalille, joka ei sisällä paljoa kuitua ja ligniiniä. Biokaasua voidaan käyttää lämmön ja sähkön tuotantoon polttamalla sitä kaasukattiloissa tai kaasumootoreissa. (Biokaasun tuotanto maatalalla 2013, 3.)

2.2.1 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasulaitoksen toiminta perustuu orgaanisen aineen anaerobiseen hajoamiseen mikrobien avulla (anaerobic digestion, AD). Prosessiin syötetyn biomassan hajoaminen tapahtuu neljässä päävaiheessa. Hydrolyysissä suuret orgaaniset molekyylit (hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat) pilkkoutuvat pienemmiksi yksiköiksi ja muuttuvat liukoiseen muotoon. Asidogeneesissä fermentoivat mikrobit muuttavat sokereita, ami-

nohappoja ja alkoholeja haihtuviksi rasvahapoiksi (volatile fatty acids VFA) ja alkoholeiksi, samalla syntyy myös ammoniakkia, hiilidioksidia ja vetyä. Anaerobisessa hapettumisessa eli asetogeneesissä haihtuvat rasvahapot muutetaan edelleen asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Viimeisessä vaiheessa eli metanogeneesissä metanogeenibakteerit tuottavat metaania ja hiilidioksidia edellisen vaiheen tuotteista. (Biokaasuteknologia 2016, 59.)

Anaerobisessa hajoamisprosessissa syntyvä biokaasu sisältää syöttestä ja olosuhteista riippuen 20-55% hiilidioksidia. Edellä esitetystä havaitaan, että anaerobisen hajoamisen kolme päävaiheista tuottaa hiilidioksidia. Biokaasuprosessissa vapautuvaa hiilidioksidia voidaan käyttää hiilenlähteenä mikrolevän kasvatuksessa.

Biokaasulaitoksen mädätysprosessissa syntyy nestejäte (rejekti), joka periaatteessa kelpaa suoraan lannoitteeksi. Suomen ilmasto-olosuhteissa nestejäte yleensä kuitenkin jatko käsitellään strippaamalla (ammoniakin poisto), haihduttamalla, biologisella käsittelyllä tai kalvotekniikalla. (Paavola & Kapuinen 2016, 102.) Nämä jatkokäsittelymenetelmät vaativat mittavia investointeja ja niiden käyttö kuluttaa energiaa.

2.2.2 Biokaasun jalostus

Biokaasun jalostuksessa kaasun energiatiheyttä nostetaan poistamalla inerttejä kaasuja kuten hiilidioksidia ja typpeä. Näin saadaan varastointi- ja kuljetuskustannuksia pienennettyä merkittävästi. Jalostuksessa käytettäviä tekniikoita ovat: fysikaalinen absorptio, kemiallinen adsorptio, kryo- ja kalvojalostus. (Lampinen 2016, 146.)

Mustankorkean biokaasulaitoksella käytetään biokaasun jalostukseen fysikaalista adsorptiota. Adsorptiossa kaasumolekyylit tarttuvat kiinteän adsorbentin pintaan, mutta eivät reagoi sen kanssa kemiallisesti. Yleisimmin käytetty adsorbentti on aktiivihiili. Desorptiossa kaasumolekyylit irtoavat adsorbentin pinnasta, kun painetta alennetaan. Näin saadaan hiilidioksidirikas kaasujäte erotettua. Menetelmää, jossa adsorbenttia regeneroidaan painevaihteluiden avulla, kutsutaan PSA-menetelmäksi (Pressure Swing Adsorption). Tämä menetelmä on käytössä Mustankorkealla (Sormunen 2018).

2.2.3 Mikrolevän biokaasun tuotantopotentiaali

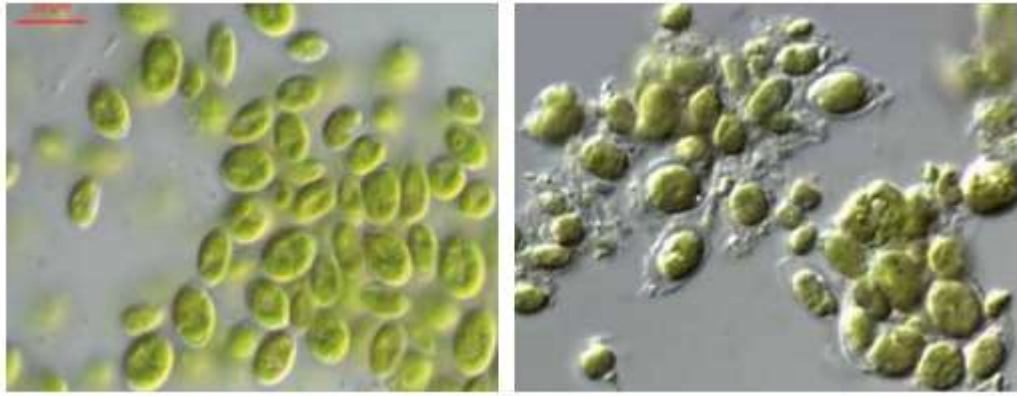
Mikrolevän biokaasun tuottoa on mitattu ja se on vaihdellut välillä 287-611 L/kg VS. VS tarkoittaa orgaanisen aineen määrää. Biometaanin saanto on ollut välillä 100-450 L/kg VS. Näin suuri vaihteluväli johtuu eri levälajien erilaisesta kaasuntuotantopotentiaalista. Kaasuntuotantopotentiaali riippuu levän solurakenteesta, erityisesti soluseinän rakenne on merkittävä tekijä. Levät, joiden soluseinä ei sisällä lainkaan selluloosaa tai hemiselluloosaa, hajoavat helpommin biokaasuprosessissa ja ne tuottavat enemmän biokaasua. Kirjallisuudessa esiintyvät suuret erot biokaasun tuotantopotentiaalissa voivat johtua myös erilaisista mittausmenetelmistä. (Murphy ym. 2015, 24.)

Lämpötilalla on tärkeä merkitys biokaasuprosessissa. Termofiilinen prosessi (lämpötila 50-55°C) johtaa biokaasun korkeampaan saantoon verrattuna mesofiiliseen prosessiin (lämpötila 35-43°C). Kokeissa on osoitettu, että esimerkiksi *Scenedesmus obliquus* levälajin biokaasun tuotanto oli 1,3-kertainen termofiilisellä prosessilla verrattuna mesofiiliseen. Levämässan kuivaamisen on todettu alentavan biokaasun tuotantopotentiaalia. (Murphy ym. 2015, 24.)

2.2.4 Mikrolevän esikäsitely

Joillakin mikrolevälajeilla on hyvin paksu soluseinä, jota on vaikea hajottaa. Tällainen levälaji on esimerkiksi *Chlorella pyrenoidosa*, jonka soluseinän paksuus vaihtelee 0,1-0,3 µm. Joillakin tällaisilla levälajeilla on kuitenkin niin suuri kasvunopeus, että niiden käyttö biokaasuprosessissa on perusteltua. Tällöin levämässä esikäsitely on paikallaan, jotta mädätysprosessia saadaan tehostettua.

Mikrolevää voidaan esikäsitellä termisesti, mekaanisesti, kemiallisesti ja biologisesti. Termisellä hydrolyysillä on saatu suurin lisäys biometaanin tuotantoon (46-62%). Mekaanisia esikäsitelymenetelmiä ovat esimerkiksi ultraäänikäsitely ja jauhatus. Ultraäänen avulla biometaanisaantoa on pystytty nostamaan 24%. Kuviossa 8 nähdään miten ultraäänikäsitely vaikuttaa *Chlorella vulgaris* levälajiin. Kemiallisia menetelmiä ovat hapetus ja alkalikäsitely. Biologisissa menetelmissä käytetään apuna entsyymejä tai mikrobeja, jotka hajottavat levän soluseinää. (Murphy ym. 2015.)



Kuvio 8. *Chlorella vulgaris* levää ennen (vasemmalla) ja jälkeen (oikealla) ultraääniesikäsittelyn (Gruber 2014).

3 Tutkimusasetelma ja -menetelmät

Mustankorkean biokaasulaitos Jyväskylässä on otettu käyttöön 2017. Se on suurin Keski-Suomessa toimiva kuivatekniikkaan perustuva biokaasulaitos. Mustankorkean biokaasulaitoksen maksimikapasiteetti on 30 000 tonnia biomassaa. Tällä hetkellä biojätteitä käsitellään 13 000 tonnia, puhdistamolietteitä 5 000 tonnia ja lantaa n. 1 000 tonnia. Biokaasulaitos tuottaa vuodessa n. 2,7 miljoonaa normaalikuutiometriä (Nm³) biokaasua, n. 1,7 miljoonaa kuutiometriä metaania (CH₄) ja n. 17 000 megawattituntia (MWh) energiaa. Ravinnerikasta rejektivettä syntyy biokaasuprosessissa n. 10 000 kuutiometriä vuodessa. Rejektivedet johdetaan joko varastosäiliöihin kaasuväestöjen alle tai jätevedenpuhdistamolle. Mustankorkealla pyritään jatkuvasti kehittämään rejektiveden hyväksikäyttöä, jotta tärkeät ravinteet saataisiin takaisin kiertoon. (Mustankorkea 2019.)

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan mahdollisuutta kasvattaa mikrolevää biokaasulaitoksen rejektivedessä. Syntyvä leväbiomassa ajatellaan ohjattavaksi biokaasulaitoksen syötteeksi. Leväkasvattamo on mitoitettu niin, että rejektivedestä saatava typpi tulee hyödynnettyä kokonaan. Opinnäytetyössä vertaillaan elinkaariarvioinnin (LCA) avulla avointa kasvatusjärjestelmää ja suljettua fotobioreaktoria (PBR) energiataseen ja kasvihuonekaasupäästöjen suhteen.

3.1 Elinkaariarviointi (Life cycle assessment, LCA)

Elinkaariarviointi on työkalu, jolla voidaan arvioida tuotteen ympäristövaikutuksia ja resurssien kulutusta koko sen elinkaaren ajalta, mukaan lukien materiaalin hankinnan, valmistuksen, käytön ja jätteiden käsittelyn (ISO, 2006). Tuote-termi pitää sisällään sekä tavarat, että palvelut. Täydellisen elinkaariarvioinnin LCA toteuttaminen on kallista ja aikaa vievää. Yritykset ovat pyrkineet ottamaan käyttöön yksinkertaisia elinkaari menetelmiä, joiden toivotaan kuitenkin antavan riittävästi luotettavaa tietoa päätöksenteon pohjaksi. Tällaisia yksinkertaistettuja menetelmiä ovat mm. yksinkertaistettu LCA, hiilijalanjälki (carbon footprint), vesijalanjälki (water footprint), ekologinen jalanjälki (ecological footprint), materiaalivirta-analyysi (material flow analysis) ja sen sovellutus MIPS-menetelmä (material input per service unit), ainevirta-analyysi (substance flow analysis, SFA) sekä termodynaamiset menetelmät kuten exergia ja emergia. (Elinkaari menetelmät yrityksen päätöksenteon tukena 2012, 18.)

Elinkaariarvioinnin LCA ohjeistusta löytyy ISO 14040-sarjan standardeista:

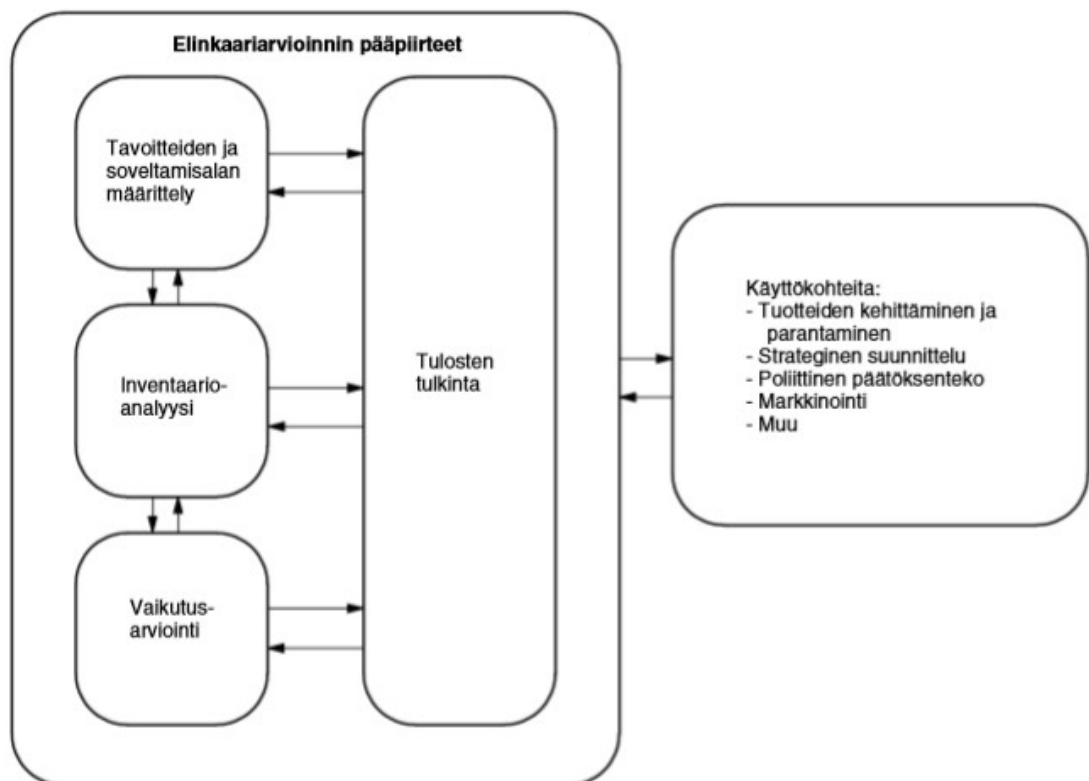
1. *ISO 14040:2006 Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.*
2. *ISO 14044:2006 Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja.*
3. *ISO /TR 14047 Environmental management. Life cycle impact assessment.*
4. *ISO/TS 14048 2002 Environmental management. Life cycle assessment. Data documentation format.*
5. *ISO/TR 14049:2000: Environmental management. Life cycle assessment. Examples of application of ISO 140414 to goal and scope definition and inventory. (Koskela, Sokka, Korhonen, Mattila & Soimakallio 2010.)*

Näissä standardeissa vertaillaan ja arvioidaan tuotantoketjun syötteitä (input), tuotoksia (output), materiaali- ja energiavirtoja sekä ympäristövaikutuksia tuotteen elinkaaren ajalta. Elinkaariarviointia voidaan soveltaa hyvin monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Elinkaariajattelun tavoitteena on välttää tilanne, jossa haitallisten vaikutusten

pieneneminen yhtäällä johtaa energian ja materiaalitarpeen lisääntymiseen toisaalla tuotantoketjussa. Ympäristövaikutusten vähentämisen myötä voidaan saavuttaa myös taloudellista etua. Teollisuudessa elinkaariarviointia hyödynnetään niin prosessi- kuin strategisessa suunnittelussa, päätöksenteon tukena ja tuotteiden markkinoinnissa. (Guinee 2002, 8.)

Elinkaariarvioinnin vaiheet

Elinkaariarvioinnin vaiheet on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. Elinkaariarvioinnin vaiheet (ISO 14040, 2006).

Tavotteiden ja soveltamisalan määrittely toimii työsuunnitelmana koko LCA-prosessille. Tavotteissa määritellään miksi tämä tutkimus tehdään, kenelle se on tarkoitettu ja miten tuloksia hyödynnetään. Soveltamisalan määrittely pitää sisällään: toiminnallisen yksikön määrittelyn, syteemin rajaukset, ympäristövaikutusluokkien valinnan ja mahdolliset oletukset/rajoitukset. (Guinee 2002, 31.)

Inventaarioanalyysissä määritellään tuotantojärjestelmä ja tehdään virtauskaaviot kaikille yksikköprosesseille ja kerätään tiedot materiaalien ja energian syötteistä (input) ja tuotoksesta (output). Jos prosessissa syntyy sivutuotteita, tehdään

mahdollinen allokointi. Inventaarioanalyysissä suoritetaan lopulliset laskelmat, joiden tuloksena saadaan syötteiden ja tuotosten ympäristövaikutukset valittua toiminnallista yksikköä kohden. Laskelmien tulokset esitetään yleensä inventaariotaulukkona. (Mts. 41.)

Vaikutusten arvioinnissa määritetään vaikutusluokat, joita ovat: ilmastonmuutos, otsonikato, humaanitoksisuus, hengitysvaikutukset, ionisoiva säteily, melu, onnettomuudet, fotokemiallisen otsonin muodostuminen, happamoituminen, rehevöityminen, ekotoksisuus, maankäyttö, luonnonvarojen ehtyminen, kuivuminen ja suolaantuminen (ILCD-handbook 2010). Vaikutukset suhteutetaan toisiinsa karakterisointikertoimien avulla. Jos saatuja tuloksia halutaan tarkastella maailmanlaajuisesti tai suhteuttaa vaikkapa kansallisella tasolla, suoritetaan vielä normalisointi. Tuosten tarkastelussa arvioidaan ja analysoidaan saadut tulokset, tehdään johtopäätökset ja annetaan suositukset jatkotoimenpiteille. (Mts. 63.)

Elinkaariarviointitutkimusten tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään, koska yleensä toiminnalliset yksiköt poikkeavat toisistaan, dataa on kerätty eri lähteistä, systeemirajat ovat erilaiset, allokointimenetelmät ovat erilaiset jne. Elinkaariarviointi huolellisesti toteutettuna antaa kuitenkin tärkeää informaatiota esim. tuotteiden vertailuun ja tuotantoprosessien ympäristön kannalta kriittisten vaiheiden tunnistamiseen. (Tuomisto 2018.)

3.2 Leväkasvattamon mitoitus

Tässä tutkimuksessa leväkasvatuksen mitoituksen lähtökohdaksi otettiin rejektiveden sisältämä kokonaistyyppi, jotta mahdollisimman paljon ravinteita saataisiin talteen ja toisaalta vältyttäisiin keinoravinteiden aiheuttamilta kustannuksilta. Mustankorkealta saadun rejektiveden analyysituloksen mukaan rejektivesi sisältää tyyppiä 1240 g/m^3 (liite 1). Rejektiveden arvioitu määrä vuosittain on $10\,000 \text{ m}^3$. Tästä saadaan lasketua typen määräksi 34 kg/vrk .

Mikrolevän kemiallinen koostumus esitetään yleisesti kaavalla $\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$ (Grobbehaar 2013). Tästä voidaan laskea eri alkuaineiden massaosuudet mikrolevän massasta. Tarkemmat laskelmat on esitetty opinnäytetyön liitteessä 2. Hiilen massaosuudeksi saadaan $51,4 \%$, typen osuudeksi $6,6 \%$ ja fosforin osuudeksi $1,3 \%$

Tässä tutkimuksessa oletetaan, että mikrolevät hyödyntävät rejektiveden ravinteet 100 %:sti. Käytännössä häviöitä tulee, mutta ne korvautuvat osittain kasvatusliuoksen takaisinkierrätyksellä prosessin eri vaiheissa. Levän tuotantopotentiaaliksi vuorokaudessa saadaan 34 kg typpimäärällä

$$m_{levä} = \frac{34 \text{ kg}}{0,066} = 515 \text{ kg}.$$

Mustankorkealla syntyy hiilidioksidia n. 1 miljoona normaalikuutiometriä (Nm³) vuodessa (Sormunen 2018). Hiilidioksidin (CO₂) tiheys NTP-olosuhteissa voidaan laskea yhtälöstä 5.

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad (5)$$

missä ρ kaasun tiheys, g/dm³

M kaasun moolimassa, g/mol

V_m kaasun moolitilavuus 22,4 dm³/mol

Tästä saadaan hiilidioksidin tiheydeksi 1,96 g/dm³. Tiheyden ja tilavuuden avulla voidaan laskea hiilidioksidin massa, joka on 1,96 · 10⁶ kg vuodessa. Hiilen massaosuus hiilidioksidin massasta on 27,3 %. Hiilidioksidista saadaan hiiltä levien käyttöön 0,535 · 10⁶ kg vuodessa. Rejektiveden analyysitulosten mukaan orgaanista hiiltä on rejektivedessä 1350 g/m³. Rejektivedestä saadaan näin ollen hiiltä levien käyttöön 13,5 · 10³ kg vuodessa. Hiiltä on yhteensä levien käytettävissä 0,548 · 10⁶ kg vuodessa, mikä tekee 1500 kg/vrk. Levät kuluttavat hiiltä vuorokaudessa n. 265 kg, jos levän tuotantopotentiaali mitoitetaan rejektivedestä saatavalla typen määrällä.

Mikrolevän kasvunopeudelle on esitetty tieteellisessä kirjallisuudessa erilaisia arvoja riippuen käytetystä levälajikkeesta. Tässä tutkimuksessa levälajiksi valittiin yleisesti käytetty *Chlorella Vulgaris*, jonka kasvunopeus on 25 gm⁻²vrk⁻¹ (Collet ym. 2011). Tämän kasvunopeuden avulla voidaan laskea yhtälöllä (6) karkeasti, kuinka suuri kasvatuspinta-ala tarvitaan 515 kg vuorokautisella levämäärällä tuotannolla

$$\frac{515 \cdot 10^3 \text{ g}}{25 \text{ gm}^{-2}} = 20\,600 \text{ m}^2 \approx 2 \text{ ha} \quad (6)$$

3.3 Leväkasvattamon elinkaariarviointi

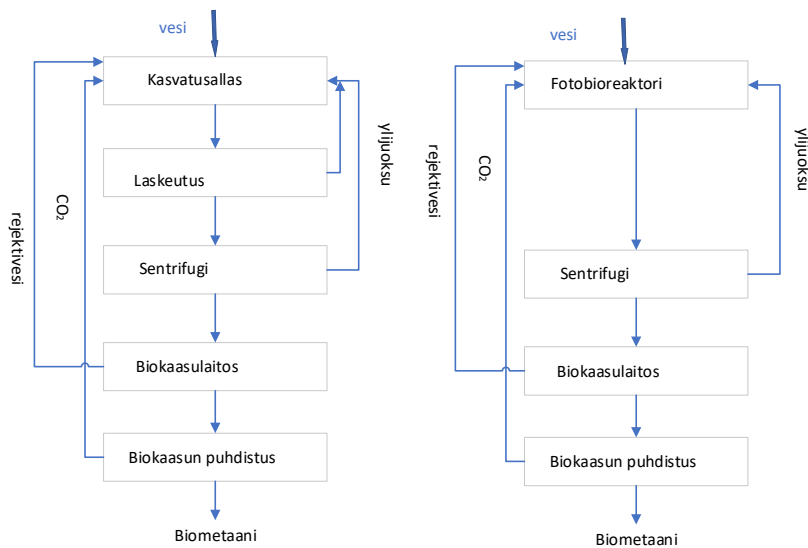
Tämän opinnäytetyön puitteissa ei ollut mahdollista lähteä teoreettisesti mitoittamaan eri prosessivaiheissa kuluva energiaa. Elinkaariarvioinnin pohjana on avoimelle kasvatusjärjestelmälle käytetty Colletin ja muiden (2011) artikkelia, jossa on tehty elinkaariarvio biokaasulaitoksen yhteydessä toimivalle leväkasvattamolle. He ovat omassa arvioinnissaan käyttäneet Leidenin yliopiston menetelmää, joka pohjautuu Guineen (2002) teokseen. Opinnäytetyössä käytetyt arvot energiankulutukselle eri prosessivaiheissa on saatu kertomalla artikkelin arvot 100, koska opinnäytetyössä tarkastellaan 100 kg leväbiomassaa ja artikkelissa 1 kg (Collet ym. 2011, 210). Lisäksi artikkelin energiankulutusarvot on muutettu GJ:ksi. Infrastruktuurin osalta on aluksi laskettu, kuinka paljon kuluu materiaalia (betonia ja PVC-muovia) yhteen kasvatusal- taaseen, jonka pinta-ala on 0,1 ha. Näitä altaita tarvitaan 4 kpl, koska 100 kg levä- massan tuottamiseen tarvitaan 0,4 ha kasvatuspinta-alaa. Tämän jälkeen saadut massat on kerrottu materiaalin valmistukseen kuluvalle energialla. Italian Toscanassa on pilot-kokoluokan fotoreaktori, joka on rakennettu BIOFAT EU-projektissa (Tredici, Bassi, Prussi, Biondi, Rodolfi, Zittelli & Sampietro 2015, 1108). Koneiden ja putkisto- jen osalta on käytetty Tredicin ja muiden artikkelissa ilmoitettuja arvoja. Nämä arvot on ilmoitettu 1 hehtaarille kasvatuspinta-alaa. Opinnäytetyössä on käytetty kerrointa 0,4, jotta saadaan arvot vastaamaan 0,4 ha kasvatuspinta-alaa. Infrastruktuurin las- kelmissa saadut energiankulutukset on jaettu materiaalien eliniällä ja tämä vielä kas- vatusvuorokausien lukumäärällä 180 vrk.

Fotobioreaktorin osalta opinnäytetyössä on käytetty elinkaariarvioinnin pohjana Tre- dicin ja muiden artikkelia (Tredici ym. 2015, 1108). Artikkelissa fotobioreaktoriin ku- luva rakennusmateriaalien määrä on ilmoitettu 1 ha laitokselle. Opinnäytetyössä on käytetty kerrointa 0,4, jotta on saatu laskettua materiaalin kulutus 0,4 ha kasvatus- pinta-alalle. Eliniän ja kasvatusvuorokausien huomiointi on tapahtunut samoin kuin avoimessa järjestelmässä. Levän kasvatukseen ja korjuuseen kuluva energia on ilmoi- tettu artikkelissa 36 t levämassaa kohti. Opinnäytetyössä nämä arvot on jaettu 360, jotta on saatu energian kulutus 100 kg levämassaa kohden. Biokaasuprosessissa ku- luva energia on käsitelty samoin kuin avoimessa kasvatusjärjestelmässä.

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

LCA on toteutettu ”kehdosta tehtaan portille” eli rajaus on tehty niin, että se kattaa pääosan leväkasvattamon infrastruktuurista, levän kasvatuksen, korjuun, vedenpoiston, biokaasun valmistuksen ja puhdistuksen. Rakennusmateriaalit ovat neutseellisiä eikä niiden kierrätystä elinkaaren lopussa ole huomioitu. Rakennusmateriaalien arviointi elinikä näkyy taulukoissa 2 ja 4. Massavirtauksia ei ole tässä työssä määritelty ja elinkaariarviointiin on otettu mukaan vain energiatase ja kasvihuonekaasupäästöt.

LCA on tehty sekä avoimelle kasvatusjärjestelmälle että ohutpaneelibioreaktorille. Mikrolevän kasvatusalaksi on aikaisempien laskelmien perusteella valittu 2 ha. Kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa on käytetty Motivan (2019) antamia päästökertoimia: sähkö 158 kg CO₂/MWh ja kaukolämpö 164 kg CO₂/MWh. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella avoimen ja suljetun leväkasvattamon nettoenergia suhdetta (NER), kun mikroleväbiomassasta tuotetaan biokaasua. Nettoenergiasuhde on määritelty opinnäytetyön yhtälössä 4 sivulla 13. Samalla tarkastellaan myös mikroleväbiokaasun hiilijalanjälkeä. Kuviossa 10 on esitetty toimintakaaviot avoimelle ja suljetulle järjestelmälle. Rejektivesi laimennetaan vedellä, tällöin laimennussuhteeksi avoimessa järjestelmässä tulee n. 1:40. Elinkaariarvioinnin toiminnalliseksi yksiköksi on valittu biometaanilla tuotettu 1 GJ energiaa. Metaanin alempi lämpöarvo on 50 MJ/kg. Näin ollen 1 GJ tuottamiseen tarvitaan metaania 20 kg. Mikrolevän biometaanin tuotantopotentiaaliksi on todettu 100-450 l/kg VS (Murphy ym. 2015, 24). Tässä tutkimuksessa on mikrolevän biometaanin tuotantopotentiaaliksi arvioitu 280 l/kg VS. Metaanin tiheydeksi saadaan yhtälön 5 avulla 0,716 g/dm³ ja tiheyden avulla saadaan laskettua, että yhdestä kg leväbiomassaa saadaan 200 g biometaania. Kun tuotetaan biometaanilla 1 GJ energiaa, tarvitaan leväbiomassaa 100 kg. Tämän levämäärän kasvattamiseen tarvitaan 0,4 ha kasvatuspinta-alaa, kun oletetaan levän kasvunopeudeksi 25 gm⁻²vrk⁻¹. Inventaarioanalyysissä artikkeleista kerätyt lähtöarvot on muunnettu vastaamaan 100 kg leväbiomassaa tai 0,4 ha:n kasvatuspinta-alaa. Rakennusmateriaalien kuljetuksia ei ole otettu mukaan elinkaariarviointiin. Laskennassa on käytetty apuna Excel-tilukkolaskentaohjelmaa. Leväkasvattamon on ajateltu toimivan 180 vrk vuodessa.



Kuvio 10. Biometaanin valmistuksen vaiheet avoimessa kasvatusaltaassa ja fotobioreaktorissa.

Inventaarioanalyysi

Avoin ja suljettu kasvatusjärjestelmä poikkeavat niin paljon toisistaan, että elinkaarivaihtoihin on syytä ottaa mukaan myös infrastruktuuri. Avoimessa kasvatusjärjestelmässä levät kasvavat avoimissa altaissa (pituus 100 m, leveys 10 m), joiden syvyys on 30 cm. Altaan seinämät on muodostettu betoniharkoista, joiden paksuus on 10 cm. Laskelmissa on käytetty betonin tiheydelle arvoa 2400 kg/m^3 ja betonin valmistukseen käytetylle energialle $0,85 \text{ MJ/kg}$ (Betoni 2019). Altaat on vuorattu PVC-kalvolla, jonka paksuus on $0,75 \text{ mm}$. PVC:n tiheytenä on käytetty arvoa 1220 kg/m^3 . Kasvatusaltaita on 20. Kasvatettava levälajike on *Chlorella vulgaris*, jonka kasvunopeuden on arvioitu olevan $25 \text{ gm}^{-2}\text{vrk}^{-1}$ (Lardon ym. 2009). Kasvuliuksen konsentraatio on $0,5 \text{ kg/m}^3$. Inventaarioanalyysi avoimen kasvatusaltaan infrastruktuurin osalta on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Infrastruktuuriin sitoutunut energia ja kasvihuonekaasupäästöt avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa. Käyttöaika vuodessa 180 vrk.

Materiaali	MJ/kg	määrä, ton	elinikä	GJ	KHK, kg CO ₂
Betoni	0,85	63,6	30	0,010	0,439
PVC-vuoraus	67,5	3,9	5	0,293	12,841
PVC-putket ¹	67,5	0,76	9	0,032	1,390
Koneet					
sentrifugi ¹	56,7	0,85	25	0,011	0,470
puhaltimet ¹	56,7	0,42	20	0,007	0,290
pumput ¹	56,7	0,08	5	0,005	0,221
kokonaismäärä				0,357	15,7
¹ Tredici ym(2015)					

Typpeä ja hiiltä saadaan levien käyttöön riittävästi, mutta fosforia tarvittaisiin lisää, sillä rejktiveden analyysituloksen mukaan sitä saadaan vain 84 g/vrk, kun tarve olisi 6,7 kg. Tätä fosforilisäystä ei ole huomioitu elinkaariarvioinnissa. Typen poistuminen haihtuvana ammoniakkinä (NH₃) voidaan estää pitämällä kasvuliuksen pH alle 7. Hiilidioksidista osa injektoidaan paineistettuna kaasuna kasvuliukseen PVC-putkistoja pitkin, osa hiilidioksidista liukenee biokaasun puhdistusvaiheessa veteen, joka kierrätetään kasvuliukseen. Kadam (2002) on arvioinut hiilidioksidin injektoinnin energiankulutukseksi 22,2 Wh/kg CO₂. Kasvuliuos pidetään liikkeessä siipirattaiden avulla (virtausnopeus 25 cm/s). Kasvuliuksen luonnollinen laskeutus tapahtuu kartionmuotoisessa betonisäiliössä, jonka korkeus on 4 m ja halkaisija 11,7 m (Collet ym. 2011, 209.) Laskeutussäiliöitä ei ole huomioitu LCA-laskelmissa. Kasvuliuksen leväpitoisuus saadaan tässä vaiheessa nostettua 10 kg/m³. Laskeutuksessa ei käytetä kemiallisia apuaineita.

Laskeutuksen jälkeen kasvuliuos johdetaan sentrifugille. Tämän vaiheen konsentraatiotekijä on 5 eli konsentraatio kasvaa tässä vaiheessa viisinkertaiseksi 50 kg/m³. Collet ym. (2011) arvioivat tämän vaiheen energiankulutukseksi 0,15 MJ/kg. Tähän energiankulutukseen on laskettu mukaan myös leväbiomassan johtaminen biokaasulaitokseen.

Leväbiomassan viipymääjaksi biokaasureaktorissa on arvioitu 46 vrk Colletin ym. (2011) kokeellisten tulosten perusteella. Biokaasun puhdistus- ja jalostusvaiheen

energian kulutukseksi on arvioitu 0,301 kWh/m³ biokaasua. Tämän vaiheen jälkeen biokaasun metaanipitoisuus on 96%. Veteen liennut hiilidioksidi kierrätetään takaisin kasvatusliuokseen. Taulukossa 3 on esitetty energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt avoimen kasvatusjärjestelmän tapauksessa. Opinnäytetyön liitteessä 4 on esitetty laskelmat sille, kuinka paljon hiilidioksidia sitoutuu, kun tuotetaan 100 kg mikroleväbiomassaa.

Taulukko 3. Biometaanin tuotantoon kuluva energia ja kasvihuonepäästöt avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla (Collet ym. 2011).

Prosessivaihe	GJ	KHK, kg CO ₂
Kasvatus ja korjuu		
hiilidioksidin kulutus, biogeeninen		-188,28
energia CO ₂ injektio	0,010	0,46
energia siipiratas	0,072	3,16
Luonnollinen laskeutus		
energia pumput	0,055	2,42
Sentrifugointi		
energia sentrifugit	0,015	0,66
Anaerobinen mädätys		
biokaasulaitos energia reaktorien sekoitus	0,039	1,71
biokaasulaitos energia sentrifugit	0,009	0,40
biokaasulaitos lämmönkulutus	0,245	11,16
Biokaasun puhdistus		
biokaasun puhdistus	0,030	1,31
Biometaanin tuottama CO ₂ , biogeeninen		54,90
	0,475	-112,10

Avoimessa kasvatusjärjestelmässä on mukana kaikki vaiheet: kasvatus, korjuu, laskeutus, anaerobinen hajoaminen ja biokaasun jalostus. Fotobioreaktorissa päästään kasvatuksessa korkeampaan leväkonsentraatioon 1,9 kg/m³ (Tredici ym. 2015). Tämän vuoksi fotobioreaktorille ei ole otettu luonnollista laskeutusta tarkasteluihin mukaan, vaan ajatellaan, että kasvatusliuos menee suoraan sentrifugille. Koska kasvatusliuoksen konsentraatio on tällöin alahaisempi sentrifugille saavuttaessa kuin avoimessa järjestelmässä laskeutuksen jälkeen, on fotobioreaktorin tapauksessa sentrifugilla suurempi energian tarve (ks. taulukko 5).

Fotobioreaktori on valmistettu 0,7 m korkeista paneeleista, joiden paksuus on 4,5 cm. Paneelien seinämät muodostuvat 0,3 mm paksusta PE-kalvosta, joka on yläpuolelta tuettu teräksisellä ja alapuolelta puisella kehyksellä. Paneeleissa on teräksisiä välitukia. Paneelin rakenne näkyy kuviossa 11. Fotobioreaktori rakentuu 16 samanlaisesta moduulista. Kussakin moduulissa on metrin välein 25 kpl 50 m pitkiä pystysuoria paneeleita. Paneelit varaavat maapinta-alaa 2 ha. Paneelien yhteispituus 20 000 m ja pinta-ala 14 000 m². Levien fotosynteesiä ajatellen paneelin molemmat pinnat voidaan ajatella kasvatuspinta-alaksi. Kasvatuspinta-ala on näin ollen n. 2,8 ha. (Tredici ym. 2015.)



Kuvio 11. BIOFAT EU-projektissa rakennettu ohutpaneelifotobioreaktori Toscanassa Italiassa (Tredici 2015).

Inventaarioanalyysi fotobioreaktorin infrastruktuurin osalta on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Infrastruktuuriin sitoutunut energia ja kasvihuonekaasupäästöt ohutpaneelifotobioreaktorissa, kun tuotetaan 1 GJ energiaa. Käyttöaika vuodessa 180 vrk (Tredici ym. 2015).

Materiaali	MJ/kg	määrä, ton	elinikä	GJ	KHK, kg CO ₂
Puupalkit	8,5	14,4	10	0,068	2,985
Teräsraamit	56,7	31,2	20	0,491	21,572
PVC putket reaktorissa	67,5	1,2	5	0,090	3,951
LDPE kalvo	89,3	1,2	1	0,595	26,135
PVC-putket	67,5	0,72	9	0,030	1,317
Koneet					
sentrifugi	56,7	0,8	25	0,010	0,443
puhaltimet	56,7	0,4	20	0,006	0,277
pumput	56,7	0,08	5	0,005	0,221
kokonaismäärä				1,296	56,9

Taulukossa 5 on esitetty energian kulutus ja kasvihuonekaasupäästöt fotobioreaktorin tapauksessa.

Taulukko 5. Biometaanin tuotantoon kuluva energia ja kasvihuonepäästöt ohutpaanelibioreaktorissa, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla (Terdici ym. 2015).

Prosessivaihe	GJ	KHK, kg CO ₂
Kasvatus ja korjuu		
hiilidioksidin kulutus, biogeeninen		-188,28
energia, kasvuliuksen kuupitus	0,881	38,67
energia, jäähdytysvesi	0,146	6,39
energia, kasvatusliuos valmistelu	0,015	0,65
energia pumput	0,022	0,96
Sentrifugointi		
energia sentrifugit	0,023	1,00
Anaerobinen mädätys		
biokaasulaitos energia reaktorien sekoitus	0,039	1,71
biokaasulaitos energia sentrifugit	0,009	0,40
biokaasulaitos lämmönkulutus	0,245	11,16
Biokaasun puhdistus		
biokaasun puhdistus	0,030	1,31
Biometaanin tuottama CO ₂ , biogeeninen		54,90
kokonaismäärä	1,408	-71,14

4 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu

4.1 Kasvatusjärjestelmän mitoitus

Ravinteiden saaminen takaisin kiertoon on yksi biokiertoalouden tärkeä tavoite. Biokaasulaitoksen rejektivesi sisältää runsaasti ravinteita. Näiden ravinteiden talteenotossa voitaisiin hyödyntää mikroleviä. Mustankorkean biokaasulaitoksella Jyväskylässä rejektivettä syntyy n. 10 000 m³/a. Rejektiveden analyysituloksen avulla saadaan laskettua, että rejektivedestä on 34 kg/vrk typpeä. Tällä ravinnemäärällä voitaisiin kasvattaa 515 kg/vrk *Chlorella Vulgaris* mikrolevää. Tosin tällöin pitäisi fosforia lisätä kasvatusliuokseen. *Chlorella Vulgaris* on miksotrofinen levä, se yhteyttää silloin, kun auringon valoa on saatavilla ja pimeässä jatkaa kasvuaan kasvulioksessa olevien orgaanisten hiiliyhdisteiden avulla. Yhteyttämiseen tarvitaan hiilidioksidia, jota vapautuu Mustankorkean biokaasulaitoksella 1·10⁶ Nm³/a. Lisäksi

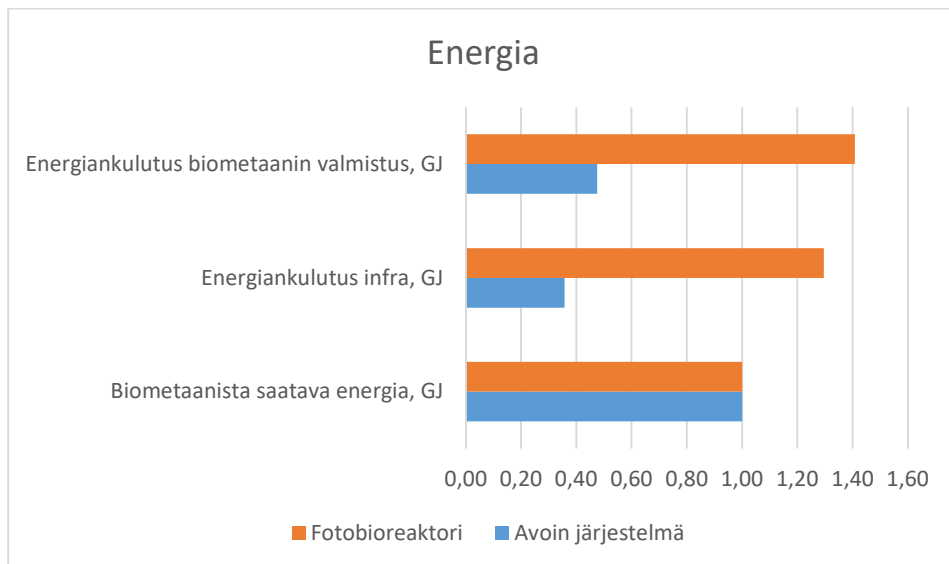
rejektivesi sisältää niin paljon orgaanisia hiiliyhdisteitä, että mikrolevien hiilen tarve tyydyttyy. Biometaania saadaan n. 100 kg, kun 515 kg mikroleväbiomassaa käsitellään biokaasulaitoksessa.

Mikrolevän kasvatusjärjestelmän mitoituksen lähtökohtana pidettiin 515 kg leväbiomassaa. *Chlorella Vulgarikselle* on arvioitu kasvunopeus $25 \text{ gm}^{-2}\text{vrk}^{-1}$. Tällä kasvunopeudella kasvatuspinta-alaa tarvitaan n. 2 ha. Avoin kasvatusjärjestelmä mitoitettiin niin, että se käsittää 20 avointa kasvatusallasta, jonka pituus 100 m, leveys 10 m ja syvyys 0,30 m. Altaiden reunat on tehty 10 cm paksuisista betoniharkoista ja altaat on vuorattu 0,75 mm paksulla PVC-muovilla. Kasvuliuos pidetään liikkeessä siipirattaan avulla.

Fotobioreaktorissa on 16 samanlaista moduulia. Moduuli koostuu pystysuorista paneeleista, joiden korkeus 0,7 m, pituus 50 m syvyys 4,5 cm. Paneelien kehyksissä on käytetty sekä puuta että terästä. Paneelin seinämät ovat PE-kalvoa. Yhdessä moduulissa näitä paneeleja on 25 kpl metrin välein. Paneelit varaavat maapinta-alaa 2 ha ja kasvatuspinta-alaa muodostuu n. 2,8 ha. Kasvuliuos pidetään liikkeellä hiilidioksidin muodostamalla kuplilla.

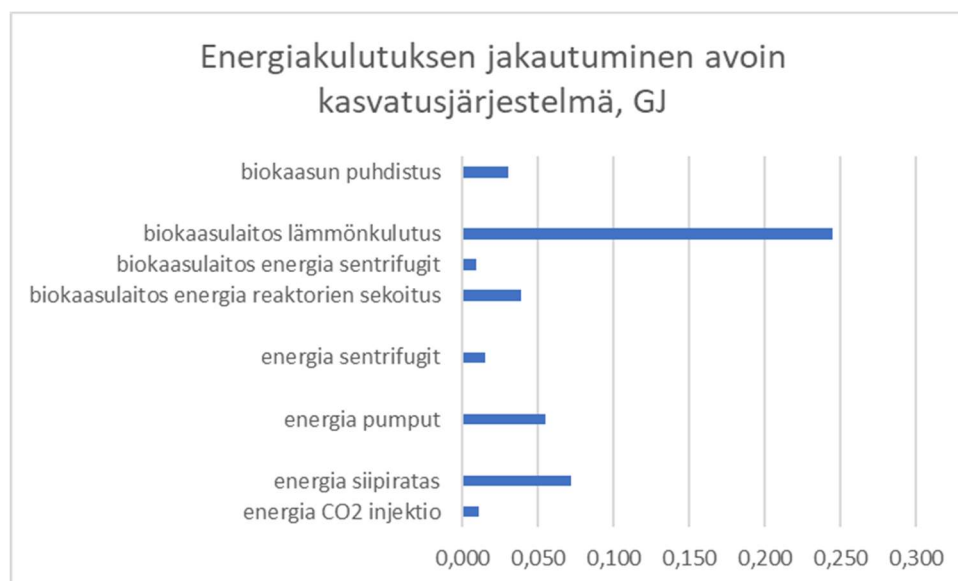
4.2 Kasvatusjärjestelmien elinkaariarviointi

Kuviossa 12 on esitetty energiavertailua eri kasvatusjärjestelmille. Histogrammista havaitaan, että fotobioreaktorin tapauksessa nettoenergiasuhde jää alle 0,40. Sekä infrastruktuuriin sitoutunut energia että biometaanin tuotanto vaativat enemmän energiaa kuin mitä biometaanista saadaan. Infrastruktuuriin sitoutunut energia on 48% kokonaisenergiasta. Avoimella kasvatusjärjestelmällä päästään nettoenergiasuhteeseen 1,20. Infrastruktuuriin sitoutunut energia on 43% kokonaisenergiasta. Avoimessa kasvatusjärjestelmässä infrastruktuuriin sitoutuu 72% vähemmän energiaa kuin fotobioreaktorissa. Biometaanin valmistukseen kuluu avoimessa järjestelmässä 66% vähemmän energiaa kuin fotobioreaktorissa. Tämä selittää hyvin sen, että mikrolevän massatuotantoon käytetään yleisesti avoimia kilparata-altaita.

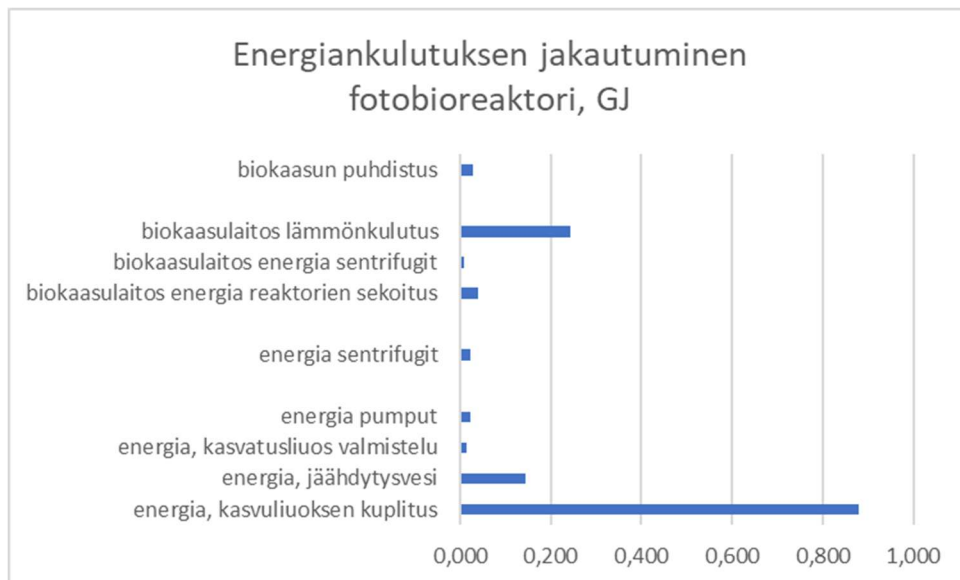


Kuvio 12. Energiavertailu, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla fotobioreaktorissa ja avoimessa kasvatusjärjestelmässä.

Kuvioissa 13 ja 14 on tarkasteltu tarkemmin eri prosessivaiheissa kuluva energiaa. Jos biokaasulaitoksen tarvitsema lämpöenergia jätetään huomiotta, näyttäisi avoimessa kasvatusjärjestelmässä energiaintensiivisimmäksi prosessivaiheeksi nousevan siipirattan käyttö ja fotobioreaktorissa kasvatusliuoksen kuplitus eli hiilidioksidin johtaminen liuokseen. Kasvuliuoksen pitäminen liikkeessä on erittäin tärkeää, jotta mikrolevät saavat riittävästi auringon säteilyenergiaa yhteyttämiseen.

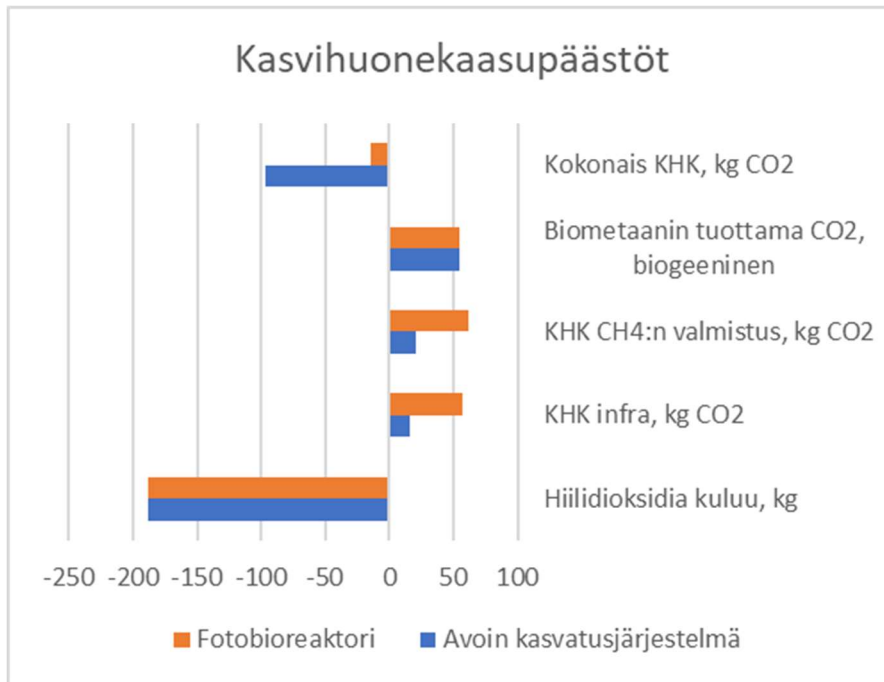


Kuvio 13. Energiakulutuksen jakautuminen eri prosessivaiheissa avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla.



Kuvio 14. Energiankulutuksen jakautuminen eri prosessivaiheissa avoimessa kasvatusjärjestelmässä, kun tuotetaan 1 GJ energiaa biometaanilla.

Kuviossa 15 on tarkasteltu kasvihuonekaasupäästöjen jakautumista infrastruktuurin ja tuotantoprosessin välillä. Lisäksi mukaan tarkasteluun on otettu mikrolevien sitoman hiilidioksidin määrä sekä biometaanin poltosta syntyvä hiilidioksidi. Nämä biogeeniset hiilidioksidimäärät on taulukossa eroteltu fossiilisesta hiilidioksidista, kuten hiililaskennassa ohjeistetaan. Tällä tarkastelulla on kummassakin kasvatusjärjestelmässä päästy negatiivisiin päästölukemiin. Tämä tarkoittaa sitä, että osa sitoutuneesta hiilestä poistuu biokaasuprosessin mädätteeseen sitoutuneena. Biokaasuprosessin yhteydessä syntyy hiilidioksidia n. 23 kg, kun tuotetaan 20 kg biometaanina. Leväkasvattamoa voitaisiin näin ollen pitää lyhytaikaisena hiilinieluna.



Kuvio 15. Kasvihuonekaasupäästöjen jakautuminen infrastruktuuriin ja tuotantoon, kun tuotetaan 1 GJ energiaa, biometaanilla.

5 Johtopäätökset

Biokaasulaitoksissa syntyvä rejektivesi sisältää runsaasti ravinteita, erityisesti typpeä. Nämä ravinteet olisi hyvä saada takaisin kiertoön. Mustankorkean tyyppisessä biokaasulaitoksessa rejektiveden sisältämä typpimäärä on n. 34 kg/vrk. Tämä typpimäärä voitaisiin hyödyntää mikrolevän *Chlorella Vulgarisin* kasvatuksessa. Tällöin tarvittaisiin levän kasvatuspinta-alaa n. 2 ha. Kasvatusaltaan pinta-ala olisi 10 m·100 m = 0,1 ha ja syvyys 0,30 m. Näitä kasvatusaltauksia tarvitaan 20 kappaletta. Mikrolevää syntyisi n. 500 kg/vrk ja tästä leväbiomassasta saataisiin tuotettua biokaasulaitoksessa n. 100 kg biometaania. Hiilidioksidia sitoutuisi tällöin levämassaan n. 940 kg/vrk.

Mikrolevän kasvatusta kannattaisi suorittaa avoimissa kilparata altaissa, koska tällöin päästäisiin tilanteeseen, jossa nettoenergiasuhde $NER > 1$. Elinaarianalyysin perusteella saatiin avoimessa kasvatusjärjestelmässä nettoenergiasuhteeksi 1,20 ja fotobioreaktorilla vain 0,38. Avoimessa kasvatusjärjestelmässä energiaintensiivisimmäksi

prosessivaiheeksi osoittautui kasvatusliuoksen virtauksen aikaansaavan siipirataan energian kulutus. Siipirataan energian kulutusta voidaan pienentää, jos virtausnopeusta pienennetään silloin, kun auringon säteilyenergiaa ei ole saatavilla. Tällöin mikrosotrofinen *Chlorella Vulgaris* käyttää kasvatusliuoksen orgaanisia hiiliyhdisteitä kasvuunsa yhteyttämisen sijaan. Valon määrän vähentyessä voitaisiin virtausnopeus puottaa 25 cm^{-1} nopeuteen 15 cm^{-1} .

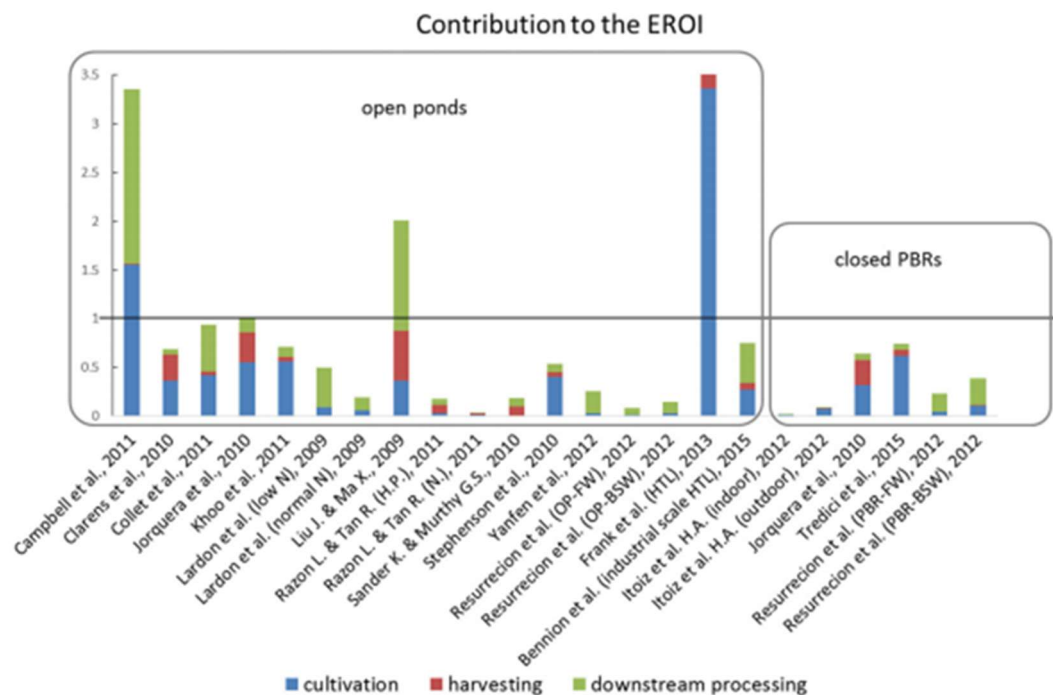
Kasvihuonekaasupäästöjen osalta näyttää siltä, että leväkavattamo toimii lyhytaikaisena hiilinieluna. Laskelmien yksinkertaistamiseksi on oletettu, että levät ottavat kaiken sitomansa hiilen hiilidioksidista eikä orgaanisista hiiliyhdisteistä. Toisaalta taas avoimen kasvatusjärjestelmän rakentamisessa käytetään betoniharkkoja. Betoni sitoo itseensä hiilidioksidia elinkaarensa aikana. Tällöin puhutaan betonin karbonatisoitumisesta (Pitkälä 2020). Tätä betoniin mahdollisesti sitoutuvaa hiilidioksidia ei ole huomioitu laskelmissa.

Nettoenergiasuhteen sijaan voidaan tarkasteluissa käyttää energiantuotannon hyötysuhdetta EROI (energy returned on energy invested). Jos EROI on yli yhden, energiaa tuotetaan enemmän kuin mitä sitä kuluu energiantuotannossa. Tämä vastaa hyvin nettoenergia suhdetta NER. Zaines & Khanna (2013) ovat omassa tutkimuksessaan tutkineet mikrolevän kasvatusta avoimissa altaissa eri puolilla USA:ta. Kasvatuskauden pituudeksi on valittu 8 kuukautta ja he ovat laskelmissaan käyttäneet keinoravinteita ja flokkauksen apuaineita. Lisäksi levämassa on kuivattu korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen. Heidän tuloksensa EROI:n osalta ovat vaihdelleet välillä 0,38–1,08 ja kasvihuonekaasupäästöt $-46,2$ – $48,9 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$.

Tredici ja muut (2015) saivat omassa tutkimuksessaan paneelimaiselle fotobiorektorille nettoenergiasuhteeksi 0,59, kun käyttöpäiviä oli 240 vrk ja kasvatettavana levälajina oli *Tetraselmis suecica*. Tuotettu energia oli tässä tapauksessa laskettu biomassan energiasisällön avulla. Toiminnallisena yksikkönä oli 1 ha kasvatuspinta-alaa. Opinnäytetyössä saatu alhaisempi nettoenergiasuhde 0,38 selittyy sillä, että biomassaa prosessoitiin edelleen biometaaniksi, jolloin energiaa kuluu enemmän erityisesti biokaasulaitoksen lämmitykseen. Lisäksi opinnäytetyössä käyttöpäivien lukumäärä oli

alhaisempi 180 vrk. Opinnäytetyössä toiminnallisena yksikkönä oli biometaanilla tuotettu 1 GJ energiaa. Opinnäytetyössä saadut tulokset vastaavat hyvin tieteellisissä artikkeleissa esitettyjä arvoja.

Mikrolevän käytöstä energiantuotannossa on tehty paljon LCA-tutkimuksia, mutta niiden vertailu on erittäin haastavaa. Ketzer, Skarka ja Rösh (2018) ovat tehneet meta-analyysin 16 viimeaikaisesta mikroleviin liittyvästä tutkimuksesta. Kuviossa 16 on esitetty näin aikaansaatu vertailu EROI:n suhteen.



Kuvio 16. Meta-analyysillä saadut EROI-arvot mikrolevätutkimuksista (Ketzer ym. 2018, 101).

Kuviosta 16 havaitaan, että avoimessa kasvatusjärjestelmässä päästää EROI-arvossa lähelle 1:tä ja muutamissa tapauksissa yli 1:n, mutta kaikki fotobioreaktorit jäävät selkeästi alle 1:n.

Opinnäytetyön puitteissa ei ole ollut mahdollista lähteä tarkastelemaan leväkasvattamon taloudellista kannattavuutta. Leväkasvattamon rakennusmateriaalit eivät ole kalliita eikä siihen tarvita paljoa instrumentointia, mutta se tarvitaanko esimerkiksi

maansiirtotöitä, ratkaisee paljon, olisiko kasvattamon rakentaminen järkevää. Joissain tutkimuksissa korostettiin myös työvoimakustannusten vaikutusta kannattavuuteen.

6 Pohdintaa

Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen. Voisiko biokaasulaitoksen rejektivedessä kasvattaa mikrolevää niin, että toiminta olisi sekä teknisesti että taloudellisesti järkevää. Aihe osoittautui niin laajaksi, että taloudellinen puoli rajautui pois jo alkuvaiheessa. Kasvatusjärjestelmän mitoituksen lähtökohtana pidettiin biokaasulaitoksen rejektivedessä olevaa typen määrää. Typen määrä perustuu yhteen analyysitulokseen ja oletettavasti rejktiveden koostumus vaihtelee laajasti. Opinnäytetyön ajatuksena oli saada ravinteet pysymään kierrossa. Toisaalta lähtökohdaksi voisi ottaa biokaasulaitoksessa vapautuvan hiilidioksidin määrän ja mitoittaa leväkasvattamon niin, että kaikki hiilidioksidi hyödynnettäisiin. Tällöin tarvittaisiin lisää ravinteita ja tämä nostaa kustannuksia sekä vaikuttaa negatiivisesti energiataseeseen.

Elinkaarianalyysjä on tehty runsaasti mikrolevän käytöstä biodieselin raaka-aineena. Näissä tutkimuksissa on yleensä energiaintensiivisimmäksi prosessivaiheeksi noussut veden poisto mikroleväbiomassasta. Vedenpoiston tarve on huomattavasti vähäisempi, jos mikroleväbiomassa käytetään biokaasulaitoksen syötteenä biometaanin tuotantoon. Tämän vuoksi tässä opinnäytetyössä päädyttiin tarkastelemaan biometaanin tuotantoa. LCA-tutkimuksissa on huomattava, että ne eivät ole suoraan vertailukelpoisia sillä systeemirajaukset ja toiminnallisen yksikön määrittely vaihtelee todella paljon. Samoin lähtöarvot esim. päästökertoimet voivat vaihdella maakohtaisesti. Lähtötiedot kannattaa, jos mahdollista, kerätä jostain luotettavasta tietokannasta (esim. ECOINVENT). Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus alun perin käyttää GaBi-elinkaariohjelmaa, mutta tämä ei valitettavasti toteutunut. Jos lähtöarvoja ei löydy tietokannoista, kerätään ne tieteellisistä artikkeleista.

Opinnäytetyön tässä luvussa arvioidaan vielä työn tuloksia ekologisesta, teknisestä, taloudellisesta ja yhteiskunnallisesta näkökulmasta.

Ekologinen näkökulma

Ilmastonmuutoksen kannalta kaikki kestävä tavat sitoa hiilidioksidia ilmakehästä kannatta hyödyntää. Elinkaariarvion pohjalta näyttäisi siltä, että leväkasvattamo toimii hiilinieluna silloin, kun syntyvä leväbiomassa käytetään biokaasulaitoksen syötteenä. Ympäristön kannalta erityisen merkittävää on se, että mikrolevät saavat tarvitsemansa ravinteet pääasiallisesti rejektivedestä. Yara ilmoittaa typpilannoitteiden hiilidioksidipäästöiksi 3,6 kg CO₂ typpikiloa kohti (Yara 2020). Mikäli rejektivedessä kasvatettua levää voidaan käyttää eläinten rehuna, pystyttäisiin tällä valkuaisrehulla korvaamaan tuontisoijaa, jonka tuotanto vaatii paljon enemmän maapinta-alaa, vettä ja lannoitteita.

Tekninen näkökulma

Tutkimustulosten perusteella näyttäisi siltä, että avoimissa altaissa tuotetun levän käyttö biokaasulaitoksen syötteenä olisi kestävä, koska $NER > 1$. Avoimissa altaissa kasvatus on kuitenkin huonosti hallittavissa, ollaan täysin sään armoilla ja kontaminaatoriski on suuri. Tutkimustulosten perusteella levän kasvatus fotobioreaktorissa ei ole järkevää, koska energiaa kuluu runsaasti sekä infrastruktuuriin että levänkasvatukseen. Fotobioreaktorissa pullonkaulana näyttää olevan kasvatusliuoksen kuplitus. Jos mikrolevästä halutaan valmistaa korkeamman jalostusasteen tuotteita, on myös vedenpoisto levämassasta hyvin energiaintensiivinen vaihe. Näistä prosessivaiheista päästäisiin eroon, jos biofilmillä tapahtuvaa kasvatusta pystytään kehittämään ja skaalaamaan (Ozkan, Kinny, Katz & Berberolug. 2012).

Taloudellinen näkökulma

Mustankorkean biokaasulaitoksella syntyy rejektivettä n. 10 000 m³ vuodessa. Rejektivesi johdetaan jäteveden puhdistamolle. Viemärointimaksu rejektivedelle on n. 4 €/m³ (Sormunen 2018). Jos rejektivesi käytettäisiin mikrolevän kasvatukseen, saataisiin viemärointimaksuja pienennettyä. Useissa tutkimuksissa on todettu, että keinotekoiset ravinteet muodostavat suuren kustannuserän mikrolevän kasvatuksessa. Rejektivesi sisältää niin paljon ravinteita, että tarvittavien lisäravinteiden määrä on marginaalinen n. 500 kg vuorokautisella mikrolevän tuotantomäärällä. Avoimien kasvatusaltaiden rakentaminen ei vaadi suuria investointeja. Jos saatavilla

olisi hukkalämpöä, voitaisiin fotobioreaktorit sijoittaa kasvihuoneeseen ja näin saataisiin tuotantokauden pituutta kasvatettua (Wang, Nordlander, Thorin & Yan 2012). Opinnäytetyössä tuotantokaudeksi oli valittu 180 vrk.

Yhteiskunnallinen näkökulma

Eurooppaan tarvitaan kymmenen seuraavan vuoden aikana yhdeksän miljoonaa tonnia biopolttoaineiden uutta tuotantokapasiteettia (Joutsen 2020). Tämän kovan tavoitteen takana on EU-direktiivi RED II. Tällä direktiivillä pyritään varmistamaan, että EU:n alueella vuoteen 2030 mennessä 32 prosenttia energiankäytöstä perustuu uusiutuviin lähteisiin. Tähän tavoitteeseen voisi mikrolevästä jalostetut biopolttoaineet osaltaan vastata. Toki se vaatii vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä. Toisaalta mikrolevän käyttö valkuaisrehuna voisi tuoda maaseudulle liitännäiselinkeinoja biokaasulaitosten yhteyteen.

Jatkotutkimuksia

Biokaasulaitoksen rejektivesi on väriltään hyvin tummaa ja se sisältää paljon kiintoainesta. Olisi hyvä tutkia miten rejektiveden laimennus vaikuttaa levän kasvunopeuteen eri laimennussuhteilla. Tätä voisi tutkia pienissä altaissa. Tässä opinnäytetyössä laskennalliseksi laimennussuhteeksi tuli n. 1:40. Jos mikrolevä kasvaa hyvin rejektivedessä, olisi mielenkiintoista tutkia täyttääkö se rehuaineille asetetut vaatimukset vai sisältääkö mahdollisesti haitta-aineita. Miltei kaikki elinkaariarviot, joita on tehty liittyen levän käyttöön biopolttoaineena, perustuvat teoreettiseen tarkasteluun. Olisi hienoa, jos saataisiin aikaan tutkimus, jossa pystyttäisiin mittaamaan todellista energiankulutusta tuotantoprosessin eri vaiheissa. Tämä vaatisi jonkinlaisen pilot-mittakaavan leväkasvattamon rakentamista. Vedenpoisto levämassasta on prosessivaihe, joka kuluttaa paljon energiaa. Tämä on ongelmana erityisesti, jos halutaan valmistaa korkeamman jalostusasteen tuotteita. Sähkökemiallisten menetelmien (elektroforesi, elektroflotaatio) tarkempi tutkiminen voisi tuoda ratkaisun vedenpoisto-ongelmaan.

Lähteet

- Andersson, V., Broberg, S., Hackl, R., Karlsson, M. & Berntsson, T. 2014. Algae-based biofuel production as part of an industrial cluster. *Biomass and Bioenergy* 71, 113-124. Viitattu 20.10.2018.
<https://pdfs.semanticscholar.org/b1b4/ac6beefc255f9d142a8abaccb217752293da.pdf>
- Betoni. 2019. Betoniyhdistyksen kotisivu. Viitattu 19.8.2019. <https://betoni.com/>
- Biokaasun tuotanto maatilalla. 2013. Motivan julkaisu. Viitattu 20.10.2018.
https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf
- Biokaasuteknologia –Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. 2016. Toim. M. Kymäläinen & O. Pakarinen. Suomen Biokaasuyhdistys. E-kirja. Viitattu 15.11.2018. https://issuu.com/hamkuas/docs/hamk_biokaasun_tuotanto_2015_ekirja/62
- Blanken, W. 2016. Microalgae production in a biofilm photobioreactor. Väitöskirja Wageningen University. Viitattu 10.2.2020. <https://edepot.wur.nl/384908#page=47>
- Brennan, L. & Owende, P. 2010. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 557-577. Viitattu 20.10.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109002408>
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294-306. Viitattu 15.11.2018.
<https://pdfs.semanticscholar.org/ce69/980068751d551204776abaa99c5e0cf8d535.pdf>
- Chojnacka, K., Marquez-Rocha, F-J. 2004. Kinetic and Stoichiometric Relationships of the Energy and Carbon Metabolism in the Culture of Microalgae. *Biotechnology* 3, 21–34. Viitattu 23.10.2018. <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/biotech/2004/21-34.pdf>
- Collet, P., Helias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R-A. & Steyer, J-P. 2011. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production, *Biosource Technology* 102, 207-214. Viitattu 20.10.2018.
<http://pathway.soe.uq.edu.au/mediawiki/images/8/82/Collet.pdf>
- Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schmid-Staiger, U. & Trösch, W. 2001. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of Biotechnology* 92, 89-94. Viitattu 20.11.2018.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165601003509>
- Direktiivi 2009/28/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä olevan energian käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti. 5.6.2009. Viitattu 18.10.2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=FI>

Direktiivi (EU) 2015/1513. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi bensiinin ja dieselpolttoaineen laadusta. Euroopan unionin virallinen lehti. 15.9.2015. Viitattu 18.10.2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513&from=en>

Dogaris, I., Welch, M., Meiser, A., Walmsley, L. & Philippidis, G. 2015, A novel horizontal photobioreactor for high density cultivation of microalgae. *Biorecourse Technology* 198, 316-324. Viitattu 21.11.2018. <https://static1.squarespace.com/static/51cd87b3e4b0814177bbb793/t/56133181e4b097682dbbb417/1444098433569/Elsevier+HBR+Publication+Sept+2015.pdf>

Elinkaarimenetelmät yrityksen päätöksenteon tukena 2012. FINLCA hankkeenloppuraportti. Toim. Antikainen, R. & Seppälä, J. SUOMEN YMPÄRISTÖ 10. Viitattu 21.11.2018. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38711/SY_10_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Elinkaaritarkastelu. Yara yrityksen www-sivut 2020. Viitattu 10.2.2020. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/ymparisto/hiilijalanjalki/elinkaaritarkastelu/>

Fasaei, F., Bitter, J., Slegers, P. & van Boxtel, A. 2018. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research* 31, 347-362. Viitattu 21.11.2018. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2211926417306677?token=A7E3D64EAE815B275EF340BF5F2F51BD9D>

Grobbelaar, J. 2013. Inorganic Algal Nutrition. E-kirjassa *Handbook of Microalgal Culture, Applied Phycology and Biotechnology*. Toim. Richmond, A. 123-134. Viitattu 30.10.2018. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=1163674&query>

Gruber, M. 2014. Anaerobic digestion of microalgal biomass. *Bioenergy 2020+ GmbH*. Viitattu 4.5.2018. https://www.researchgate.net/profile/Markus_Gruber-Brunhumer/publication/263352003_Anaerobic_digestion_of_microalgal_biomass/links/0046353aa6f1882

Guinee, J. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Huang, Q., Jiang, F., Wang, L. & Yang, C. 2017. Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. *Engineering* 3, 318-329. Viitattu 22.11.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917304241>

ILCD-handbook 2010. General guide on LCA – Detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Viitattu 20.11.2018. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>

ISO 14040 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.

Jorguera, O., Kiperstok, A., Sales, E., Embricu, M., & Ghirardi, M. 2010. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology* 101, 1406-1413. Viitattu 19.8.2019. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/46768336/Embiruu_M_and

[Ghirardi ML Comparative en20160624-18356-1ou53dx.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=154271](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544202000257#!)

Joutsen, L. 2020. Suomi ja Ruotsi edelläkävijöitä kehittyneissä biopolttoaineissa, *KemiaKemi* 1, 21.

Kadam, K. 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy* 27, 905-922. Viitattu 19.8.2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544202000257#!>

Kinnunen, V. 2016. Anaerobic digestion of microalgae and pulp and paper biosludge. Väitöskirja. Tampere University of Technology. Viitattu 30.11.2017. https://tutcris.tut.fi/portal/files/8820683/kinnunen_1434.pdf

Koskela, S., Sokka, L., Korhonen, M-R, Mattila, T. & Soimakallio, S. 2010. Elinkaarimetodiikkujen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Toim. Antikainen, R. SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 7. Viitattu 20.11.2018. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39822/SYKEra_7_2010.pdf?sequence=1

Lampinen, A. 2016, Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen BIOKAASUTEKNOLOGIA – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys.

Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J-P. & Bernard, O. 2009. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental Science & Technology* 17, 6475-6481. Viitattu 22.11.2018. ftp://138.96.0.43/biocore/OBERNARD/MyPublications/2009_Lardon_LCA%20microalgae-EnvSciTech.pdf

Lunkka-Hytönen, M., Lohtander-Buckbee, K. & Ruohonen-Lehto, M. 2016. Levät ja biotalous biotekniikan näkökulmasta. SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 4.

Motiva 2019. Hiilidioksidin päästökertoimet. Viitattu 19.8.2019. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet

Murphy, J., Drosig, B., Allen, E., Jerney, J., Xia, A & Herrmann, C. 2015. A perspective on algal biogas. E-kirja. Viitattu 4.5.2018. http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/AD_of_Algae_ebook_end.pdf

Mustankorkea, verkkosivut. Viitattu 20.8.2019. <https://mustankorkea.fi/tuotteet/biokaasu/biokaasulaitos/>

Norsker, N-H., Barbosa, M., Vermue, M. & Wijffels, R. 2011. Microalgae production – A close look at the economics. *Biotechnology Advances* 29, 24-27. Viitattu 18.10.2018. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41872002/Microalgal_production_-_a_close_look_at_20160201-30232-15022tl.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1542382272&Signature=yU2BIna%2B6eKPCpButIjyqtLbCiE%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMicroalgal_production_A_close_look_at_th.pdf

- Ozkan, A., Kinny, K., Katz, L. & Berberolug, H. 2012. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. *Bioresource Technology* 114, 542-548. Viitattu 10.2.2020.
- Paavola, T & Kapuinen, P. 2016. Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. BIOKAASUTEKNOLOGIA – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Toim. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. Suomen Biokaasuyhdistys.
- Park, j., Craggs, R. & Shilton, A. 2011. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* 102, 35-42. Viitattu 15.11.2018.
- Pilot- and production plants for algae cultivation 2018. Kuva Subitec yrityksen www-sivuilla. Viitattu 21.11.2018. <https://subitec.com/en/pilot-and-production-plants-for-algae-cultivation>
- Pitkälä, E. 2020. Betoni on myös hiilinielu. *KemiaKemi* 1, 9.
- Pulz, O. 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57, 287-293. Viitattu 14.2.2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s002530100702>
- Rodolfi, L., Zittelli, G., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G. & Tredici, M. 2009. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* 102, 100-112. Viitattu 18.11.2018.
- Rogers, J., Rosenberg, J., Guzman, B., Oh, V., Mimbela, L., Ghassemi, A., Betenbaugh, M., Oyler, G. & Donohue, M. 2014. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research* 4, 76-88. viitattu 15.11.2018.
- Sormunen, K. 2018. Tuote- ja kehityspäällikkö. Mustankorkea Oy. Haastattelu huhtikuu 2018.
- Tredici, M., Bassi, N., Prussi, M., Biondi, N., Rodolfi, L., Zittelli, G. & Sampietro 2015. Energy balance of algal biomass production in a 1-ha "Green Wall Panel" plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high Net Energy Ratio. *Applied Energy* 154, 1103-1111. Viitattu 20.11.2018 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915001221>
- Tuomisto, H. 2018. Elinkaariarviointi. Elinkaariasiatuntijan luento 17.8.2018 Biotalousinstituutissa. Järjestäjänä Kataja, J. Biotalousinstituutti.
- Uusi biotalousstrategia kestäväälle Euroopalle. Lehdistöiedote 11.10.2018. Viitattu 18.10.2018. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6067_fi.htm
- Uusiutuva energia: neuvosto sopimukseen parlamentin kanssa. 2018. Lehdistöiedote 27.6.2018. Viitattu 18.10.2018. <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2018/06/27/renewable-energy-council-confirms-deal-reached-with-the-european-parliament/>
- Wang, B., Li, Y., Wu, N & Lan, C. 2008. CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 79, 707-718. Viitattu 29.10.2018. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-008-1518-y>

Wang, X., Norlander, E., Thorin, E. & Yan, J. 2012. Microalgal biomethane production integrated with an existing biogas plant: A case study in Sweden, International Conference on Applied Energy ICAE, Suzhou, China. Viitattu 10.2.2020.

Yeomans, M. 2013. New photobioreactor makes microalgae cultivation easier for the industry. Cosmetics design-europe -sivusto. Viitattu 21.11.2018.

<https://www.cosmeticsdesign-europe.com/Article/2013/06/05/New-photobioreactor-makes-microalgae-cultivation-easier-for-the-industry>

Zaimes, G. & Khanna, V. 2013. Microalgal biomass production pathways: evaluation of life cycle environmental impacts. Biotechnology for Biofuels 6, 1-11. Viitattu 18.10.2018[https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-6-](https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-6-54)

Liitteet

Liite 1. Mustankorkean biokaasulaitoksen rejektiveden analyysitulokset.

Nickel (Ni)	0,1
Copper (Cu)	0,13
Arsenic (As)	< 0,01
Cadmium (Cd)	< 0,002
Lead (Pb)	< 0,01
Zinc (Zn)	0,15
Manganese (Mn)	0,031
Chromium (Cr)	< 0,01
Total Nitrogen (N)	1 240
Evaporation residue (TDS)*	4 885
%	0,49
Filterable Solids (TSS)**	600
%	0,06
Ammonium (NH ₄ -N)	1 359
Ammonium (NH ₄)	1 750
Total Phosphorus (P)	3,08
5 day BOD (O ₂)	2 000
Sulphide (S)	< 1
Nitrite (NO ₂)***	< 1
Nitrite (NO ₂ -N)	< 0,3
Nitrite (NO ₂)****	< 1
Nitrate (NO ₃)	< 10
Nitrate (NO ₃ -N)	< 2,26
Phosphate (PO ₄)	< 10
Phosphate (PO ₄ -P)	< 3,26
Sulphate (SO ₄)	10,49
Potassium (K)	971
Magnesium (Mg)	5,11
Calcium (Ca)	136
Total organic carbon (TOC)	1 350
Boron (B)	< 0,5
Mercury (Hg)	< 0,002

Liite 2. Eri alkuaineiden massaosuudet mikrolevän massasta

Hiilen massaosuus mikrolevän ($\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$) massasta

$$m(\text{C}) = \frac{12,01 \cdot 100\%}{12,01 + 0,48 \cdot 16,0 + 1,83 \cdot 1,008 + 0,11 \cdot 14,01 + 0,01 \cdot 30,97} = 51,4\%$$

Typen massaosuus mikrolevän massasta

$$m(\text{N}) = \frac{0,11 \cdot 14,01 \cdot 100\%}{12,01 + 0,48 \cdot 16,0 + 1,83 \cdot 1,008 + 0,11 \cdot 14,01 + 0,01 \cdot 30,97} = 6,6\%$$

Fosforin massaosuus mikrolevän massasta

$$m(\text{P}) = \frac{0,01 \cdot 30,97 \cdot 100\%}{12,01 + 0,48 \cdot 16,0 + 1,83 \cdot 1,008 + 0,11 \cdot 14,01 + 0,01 \cdot 30,97} = 1,3\%$$

Liite 3. Biometaanin poltossa vapautuvan hiilidioksidin määrä.

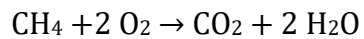
Biometaanin massa

$$m(\text{CH}_4) = 20 \text{ kg}$$

Biometaanin ainemäärä

$$n(\text{CH}_4) = \frac{m}{M} = \frac{20 \cdot 10^3 \text{ g}}{(12,01 + 4 \cdot 1,008) \text{ g/mol}} = 1247 \text{ mol}$$

Biometaanin palamisreaktio



Palamisreaktiosta nähdään, että $n(\text{CO}_2) = n(\text{CH}_4)$

Hiilidioksidin massa

$$m(\text{CO}_2) = n \cdot M = 1247 \text{ mol} \cdot (12,01 + 2 \cdot 16,0) \text{ g/mol} = 54,9 \text{ kg}$$

Liite 4. Sitoutuvan hiilidioksidin määrä, kun kasvatetaan 100 kg levää.

$$m(\text{levä}) = 100 \text{ kg}$$

Levä sisältää 51,4 % hiiltä (katso liite 1). Voidaan laskea tarvittava hiilen massa.

$$m(\text{C}) = 0,514 \cdot 100 \text{ kg} = 51,4 \text{ kg}$$

Hiilen massaosuus hiilidioksidin massasta voidaan laskea seuraavasti

$$\frac{12,01}{12,01 + 2 \cdot 16,00} \cdot 100 \% = 27,3 \%$$

Lasketaan, paljonko tarvitaan hiilidioksidia, että saadaan 51,4 kg hiiltä.

$$m(\text{CO}_2) = \frac{51,4 \text{ kg}}{0,273} = \mathbf{188 \text{ kg}}$$