

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**LEVÄBIOMASSAN TUOTANTO
ENERGIATARKOITUKSIIN: TEKNOLOGIAN
NYKYTILA, HAASTEET JA MAHDOLLISUUDET
SUOMEN OLOSUHTEISSA**

**Production of Algal Biomass for Energy Purposes: Current
Technology, Challenges and Potential in Finland**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka

Työn ohjaaja: Projektipäällikkö, DI Jussi Heinimö

Lappeenrannassa 7.1.2009

Heli Rimppi

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| LYHENTEET JA YKSIKÖT..... | 2 |
| 1 JOHDANTO..... | 3 |
| 2 LEVÄBIOMASSAN MAHDOLLISUUDET GLOBAALISSA ENERGIAHUOLLOSSA | 4 |
| 2.1 Biomassan globaali merkitys ja mahdollisuudet energiantuotannossa | 4 |
| 2.2 Leväbiomassan mahdollisuudet | 6 |
| 2.2.1 Energiantuotantoon käytettävät levälajit | 7 |
| 2.2.2 Levä ja muut energiakasvit | 8 |
| 3 LEVÄBIOMASSAN TUOTANNON TEKNOLOGIA | 8 |
| 3.1 Avoimet altaat..... | 9 |
| 3.1.1 Rengasallas..... | 11 |
| 3.1.2 Esimerkkinä Earthrise..... | 13 |
| 3.2 Suljetut fotobioreaktorit..... | 14 |
| 3.2.1 Putkifotobioreaktori..... | 15 |
| 3.2.2 Paneelifotobioreaktori..... | 17 |
| 3.2.3 Muut fotobioreaktorit | 19 |
| 3.3 Tuotantotapojen vertailu..... | 19 |
| 3.4 Teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hyödyntäminen levän kasvatuksessa..... | 22 |
| 4 LEVÄBIOMASSAN KORJUUMENETELMÄT | 24 |
| 4.1 Flokkulaatio | 24 |
| 4.2 Sedimentointi | 25 |
| 4.3 Suodatus..... | 25 |
| 4.4 Sentrifugointi | 26 |
| 4.5 Kuivaus..... | 26 |
| 4.5.1 Aurinkokuivaus | 27 |
| 5 POLTTOAINEEN VALMISTUS | 28 |
| 5.1 Nestemäisten biopolttoaineiden tuotanto kaasutusprosessilla | 29 |
| 5.2 Biodiesel | 30 |
| 5.3 Vety | 34 |
| 5.3.1 Viherlevän vedyntuotannon mekanismi | 34 |
| 5.3.2 Vetytalous | 35 |
| 6 LEVÄBIOMASSAN HYÖDYNTÄMISEN HAASTEET JA MAHDOLLISUUDET SUOMEN OLOSUHTEISSA | 37 |
| 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 39 |
| LÄHTEET..... | 43 |

LYHENTEET JA YKSIKÖT

| | |
|-------|--|
| EU | Euroopan unioni |
| FT | Fischer-Tropsch |
| IEA | International Energy Agency |
| KTM | Kauppa- ja teollisuusministeriö (TEM 1.1.2008 lähtien) |
| RME | Rypsiöljyn metyyliesteri |
| SYKE | Suomen ympäristökeskus |
| TAG | Tri(asyyli)glyseridi |
| Tekes | Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus |
| TEM | Työ- ja elinkeinoministeriö |
| VTT | Valtion teknillinen tutkimuskeskus |

Energiayksiköt

| | |
|-----|---------------------------|
| J | joule |
| toe | ekvivalenttinen öljytonni |
| k | kilo 10^3 |
| M | mega 10^6 |
| G | giga 10^9 |
| T | tera 10^{12} |
| E | eksa 10^{18} |

$$1 \text{ Mtoe} = 4,1868 \cdot 10^4 \text{ TJ}$$

1 JOHDANTO

Leväbiomassan käyttöä energianlähteenä on tutkittu jo vuosikymmenten ajan. 1950-luvulla esitettiin idea tuottaa metaanikaasua levästä (Sheehan et al 1998, 3). Levän tiedetään pystyvän muuntamaan fotosynteesissä auringonvalon energian käyttökelpoiseen muotoon paremmalla hyötysuhteella kuin mikään kuivalla maalla kasvava energiakasvi. Teoriassa kuivaa leväbiomassaa voidaan vuodessa saada hehtaarilta jopa 3 - 5 kertaa enemmän kuin sokeriruokoa (Chisti 2007, 299; Boyle (toim.) 2004, 114) ja levä kykenee tuottamaan öljyä vuodessa 2 – 20 kertaa öljypalmun tuottaman litramäärän viljelyalaa kohti (Chisti 2007, 296; Pienkos 2007).

Levän tehokkaan massatuotantotavan luomiseksi on kehitetty monenlaista teknologiaa levien kasvatusta varten ja tutkittu, miten kasvuolosuhteiden säätely vaikuttaa leväviljelmän menestykseen. Energianlähteenä on tutkittu sekä makro- että mikroleviä. Levän kasvatukseen on jo olemassa kaupallisia sovelluksia, sillä leviä on jo kauan käytetty esimerkiksi ravintona, kosmetiikassa, lääkkeiden ja luontaistuotteiden ainesosina ja rehuna. Mikrolevän massatuotantokonsepti on peräisin 1950-luvulta (Benemann 1995, 199). Energiantuotantoon leviä ei kuitenkaan vielä ole laajamittaisesti kasvatettu.

Paineet ilmastonmuutoksen hillitsemiseen kasvihuonekaasupäästöjä vähentämällä ja fossiilisten energianlähteiden varojen väheneminen kannustavat uusiutuvan energian käytön lisäämiseen ja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen uusiutuvilla energianlähteillä, muun muassa biomassalla. Tämän myötä myös leväbiomassa vaihtoehtoisena energiamuotona on alkanut herättää yhä laajempaa kansainvälistä kiinnostusta ja aiheeseen liittyvä tutkimus- ja kehitystoiminta on voimakkaassa kasvussa.

Kansainväliset ilmastopöytäkirjat ja Euroopan unionin tavoitteet velvoittavat myös Suomea vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään ja lisäämään uusiutuvan energian käyttöä. EU:n komission tammikuussa 2008 antaman energia- ja ilmastopaketin mukaan

Suomen tulee vuoteen 2020 mennessä lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta energian loppukysynnästä 38 %:iin nykyisestä 28 %:sta. Suomen on lisäksi vähennettävä päästökaupan ulkopuolella olevien toimialojen päästöjä 16 %:lla vuoden 2005 päästömääristä. Eurooppa-neuvosto puolestaan vahvisti huippukokouksessaan keväällä 2007 komission esittämän uuden tavoitteen liikenteen biopolttoaineiden osuuden lisäämisestä jäsenmaissa 10 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Energiasektorilla vaaditaan muutoksia, jotta asetettuihin tavoitteisiin päästään ja näin ollen leväbiomassan käyttö energiantuotannossa voi olla Suomessakin kiinnostava mahdollisuus.

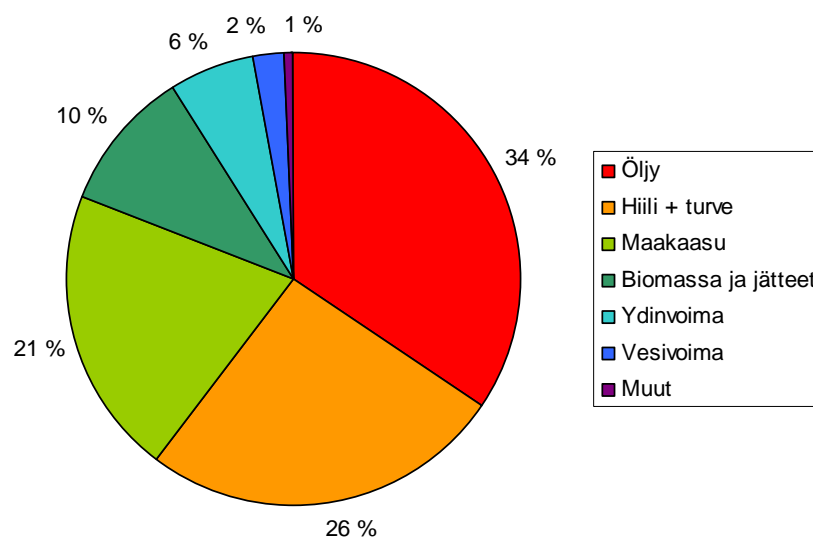
Tässä työssä luodaan katsaus tuloksiin, joita on saatu leväbiomassan energiakäyttöön liittyvästä tutkimus- ja kehitystyöstä maailmanlaajuisesti. Tarkoituksena on selvittää, mikä on leväbiomassan tuottamiseen ja levästä saatavan energian hyödyntämiseen tarvittavan teknologian nykytila: miten leväbiomassaa tuotetaan, käsitellään ja mitä polttoaineita siitä on mahdollista jalostaa. Lisäksi selvitetään, millaisia kaupallisia sovelluksia teknologiasta on olemassa. Työn tavoitteena on saatujen tietojen perusteella arvioida, millä edellytyksin leväbiomassaa voitaisiin Suomen olosuhteissa alkaa tuottaa energiakäyttöön ja millaista jatkotutkimusta aiheesta tarvitaan, jotta voitaisiin tehdä päätöksiä levän energiakäytön käynnistämisestä.

2 LEVÄBIOMASSAN MAHDOLLISUUDET GLOBAALISSA ENERGIAHUOLLOSSA

2.1 Biomassan globaali merkitys ja mahdollisuudet energiantuotannossa

Vuonna 2005 maailman primäärienergian kulutus oli 479 EJ (11 429 Mtoe). Vuonna 2030 kulutus voi olla 742 EJ (17 721 Mtoe) eli kulutus kasvaa 55 %, mikä vastaa 1,8 %:n keskimääräistä vuosikasvua. Oletus perustuu skenaarioon, jonka mukaan valtioiden toimintatavat pysyvät muuttumattomina vuoteen 2007 nähden. (IEA 2007, 74.)

Seuraavassa kuvassa on esitetty maailman primäärienergian hankinnassa vuonna 2006 käytetyt energianlähteet.



Kuva 1. Maailman primäärienergian hankinta energialähteittäin 2006 (IEA 2008, 6)

Voidaan todeta, että fossiilisten polttoaineiden 81 %:n osuus primäärienergian hankinnasta on hyvin merkittävä. Kymmenesosa energiasta (48 EJ) saadaan biomassasta ja jätebiomassajakeesta. Biomassa on koko maailman mittakaavassa tärkein uusiutuvan energian lähde energiantuotannon ollessa noin 45 EJ vuodessa, mikä on noin 9 % globaalista primäärienergian hankinnasta (IEA Bioenergy 2007, 2). Kuvassa mainitut muut energianlähteet sisältävät muun muassa geotermisen energian ja aurinko- ja tuulivoiman.

IEA ennustaa, että biomassan käyttö energiantuotannossa lisääntyy noin 1,4 % vuodessa vuosien 2005 ja 2030 välillä, mikä on hieman vähemmän kuin energiantarpeen 1,8 % vuosittainen kasvunopeus (IEA 2007, 92). Maailmanlaajuisesti valtaosa eli noin 2/3 biomassasta käytetään kehitysmaissa eli puuta poltetaan ruoan valmistuksessa ja rakennusten lämmityksessä. Teollinen energiantuotanto biomassasta eli sähkön, lämmön ja liikennepolttoaineiden tuotanto oli yhteensä 7 EJ, mikä oli 1/3 biomassan käytöstä vuonna 2000 ja osuus on kasvamassa. Biomassan käytölle liikenteen

biopolttoaineiden tuotannossa ennustetaan voimakasta kasvua 0,8 EJ:sta vuonna 2005 4,3 EJ:een vuonna 2030. Lisäksi erityisesti OECD-maissa biomassan käyttö sähkön- ja lämmöntuotannossa lisääntyy. (IEA Bioenergy 2007, 2.)

Kioton pöytäkirjan velvoitteet ja päästökauppa ovat saaneet monet maat asettamaan kunnianhimoisia tavoitteita biomassan käytön lisäämisestä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. EU:ssa maakohtaiset uusiutuvan energian tavoitteet vaihtelevat 10:stä 49 %:iin energian loppukäytöstä vuoteen 2020 mennessä, ja useissa maissa, kuten myös Suomessa, biomassa on tärkein uusiutuvan energian lähde. Myös öljyn hinnan nousu on herättänyt kiinnostusta bioenergiaan. (IEA Bioenergy 2007, 3.)

Nykyiset globaalit biomassan tuotantomahdollisuudet muodostuvat lähinnä metsä- ja maatalouden jätteistä, muista orgaanisista jätteistä ja energiakäyttöä varten viljeltävistä kasveista. IEA arvioi, että tulevaisuudessa, vuonna 2050–2100, globaalit biomassan tuotantomahdollisuudet ovat 200–400 EJ/v. Potentiaalinen arviossa on otettu huomioon biomassan käyttötarve ruoaksi, rehuksi ja raaka-aineiksi. Tätä voidaan verrata nykyisiin fossiilisten polttoaineista vuosittain saatavan energian määrään (388 EJ). (IEA Bioenergy 2007, 2.)

2.2 Leväbiomassan mahdollisuudet

Biomassan globaaleista tuotantomahdollisuuksista ja energiapotentiaalista on tehty paljon tutkimuksia, esimerkiksi IEA Bioenergy 2007, Smeets et al. 2007 ja Berndes et al. 2003. Leväbiomassan globaaleista tuotantomahdollisuuksista ei ole kuitenkaan esitetty arvioita usein aiheen tuntemuksen puutteeseen vedoten, vaikka levä saatetaan mainita potentiaalisena energianlähteenä. Esimerkiksi Smeets ja muut (2007) tuovat esille, että levän potentiaali voi olla huomattava perinteisiin energiakasveihin verrattuna ja täten kasvattaa edellä esitettyjä biomassan globaaleja tuotantomahdollisuuksia energiakäyttöä varten.

2.2.1 Energiantuotantoon käytettävät levälajit

Levän energiakäyttöön liittyvissä tutkimuksissa on sovellettu sekä makro- eli suurleviä (esimerkiksi Vergara-Fernández et al. 2007, Bastianoni et al. 2008) että mikro- eli planktonleviä (esimerkiksi Benemann 1995, Sawayama et al. 1999, Ghirardi et al. 2000 ja Chisti 2007). Tutkimus kuitenkin keskittyy lähinnä yksisoluisiin mikroleviin, joilla on erinomainen kyky muuntaa auringon energiaa käyttökelpoiseen muotoon. On arvioitu, että maailmanlaajuisesti 40 % fotosynteesistä on mikrolevien aikaansaamaa (Moreno-Garrido 2007, 3949). Myös tässä työssä käsitellään mikrolevien käyttöä energiataroituksiin.

Energiantuotannon kannalta tärkeät mikrolevät voidaan jakaa esimerkiksi seuraavasti kolmeen pääryhmään:

- Alkeistumallisiin, joihin kuuluvat virukset, bakteerit ja syanobakteerit eli sinilevät
- Alkueliöihin, joihin kuuluvat nielulevät, panssarisiimalevät, tarttumalevät, kultalevät, keltalevät, piilevät, limalevät, silmälevät ja alkueläimet
- Korkeampaa kehitystasoa edustaviin kasveihin, esimerkiksi viherleviin

(SYKE 2007c.)

Tutkimuksissa paljon esiintyviin ja nykyisin kaupallisesti kasvatettaviin mikrolevälajeihin kuuluvat esimerkiksi *Chlorella*, *Dunaliella* ja *Spirulina*.

Vertailun vuoksi makro- eli suurlevät ovat monisoluisia, niillä on lehtimäisiä osia ja ne saattavat kiinnittyä kasvualustaansa juurimaisilla lisäkkeillä. Makrolevät jaetaan viherleviin (*Chlorophyta*), ruskoleviin (*Phaeophyta*) ja punaleviin (*Rhodophyta*). (SYKE 2007b.)

2.2.2 Levä ja muut energiakasvit

Nykyään energiakäyttöön viljeltävän biomassan tuotantomahdollisuuksiin liittyy rajoittavia tekijöitä, jotka voivat haitata bioenergiapotentiaalin käyttöönottoa:

- Kilpailu vesivaroista, erityisesti niukkojen vesivarantojen maissa.
- Lannoitteet, tuholaismyrkyt ja niistä aiheutuvat ympäristöhaitat
- Maankäytöltään intensiivinen energiakasvien viljely voi aiheuttaa biodiversiteetin vähenemistä.
- Laidunmaana käytettäviä alueita on mahdollisesti vapautettava energiakasvien viljelykäyttöön.
- Kilpailu viljelymaasta ruoan ja rehun tuotannon kanssa voi aiheuttaa viljelymaan ja ruoan hinnan nousua.

(IEA Bioenergy 2007, 3.)

Levän etuna on, että sen massatuotanto energiataroituksiin ei heikennä muiden energiakasvien kasvatusmahdollisuuksia, koska levä ei kilpaile niiden kanssa viljelymaa-alasta. Osa levistä pystyy kasvamaan jopa runsassuolaisessa vedessä, jolloin ne eivät kilpaile myöskään makeista kasteluvesivaroista muiden energiakasvien kanssa. (Sheehan et al. 1998, 10.) Lisäksi levän viljelyyn tarvitaan vähemmän vettä kuin maalla kasvavien energiakasvien viljelyyn (Rodolfi et al. 2008, 1). Toisaalta energiakasvien viljely on toistaiseksi edullisempaa kuin leväbiomassan tuottaminen (Chisti 2007, 297).

3 LEVÄBIOMASSAN TUOTANNON TEKNOLOGIA

Leväbiomassan tuotanto perustuu fotosynteesiin: levät yhteyttävät auringon valon avulla hiilidioksidista, vedestä ja ravinteista orgaanista ainetta (öljyä) ja tuottavat happea. Suurimmalle osalle levistä valo on elintärkeää, mutta osa on sopeutunut elämään vähäisessä valossa tai muuten haastavissa olosuhteissa. Esimerkiksi sinileviä on tavattu hiekkaerämaissa, kivenhalkeamissa, valottomissa hautakammioissa ja kuumissa lähteissä. (SYKE 2007a.) Tuotantoteknologioiden sovelluksissa pyritään

optimoimaan valon absorptio levässä. Kokonaisabsorptiota vähentävät valon sironta leväsolujen pinnasta ja leväsolun sisäisten pigmenttien absorboima valo, johon vaikuttaa muun muassa valon spektri. Lisäksi biomassassa varjostaa kauempana valonlähteestä olevia leväsoluja. (Rosello Sastre et al. 2007, 128.)

Mikroleväbiomassan arvioitu molekyylikaava on $\text{CO}_{0,48}\text{H}_{183}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$. Tämän perusteella voidaan arvioida ravintoaineiden minimitarve levän kasvatuksessa. Mikroleväbiomassa sisältää hiiltä noin 50 % kuivapainosta ja hiilidioksidia on syötettävä kasvatusjärjestelmiin. Muita levälle tärkeitä ravinteita ovat typpi (nitraatit), fosfori, rauta ja pii. (Chisti 2007, 297.)

Vuosikymmenten tutkimustyön aikana levän kasvatuksessa on ehditty soveltaa lukuisia erilaisia kasvatusteknologioita. Levät sisältävät paljon ihmiselle hyödyllisiä ravinteita, joten nykyisin käytössä olevat suuren mittakaavan sovellukset liittyvät ravinnontuotantoon: tuotetusta leväbiomassasta otetaan talteen esimerkiksi karotenoideja ja rasvahappoja (Molina Grima et al. 2003, 502) tai levä käytetään sellaisenaan lisäravinteiden tuotannossa (Earthrise 2004).

Mikrolevän laajamittaiseen kasvatukseen käytetään kolmentyyppisiä systeemejä: olosuhteiltaan säädeltyjä ja säätelemättömiä avoimia altaita ja bioreaktoreja (Benemann 1995, 200). Tärkeimmät ja Chistin (2007, 297) mukaan leväbiomassan ainoat käyttökelpoiset, massatuotantosysteemit ovat rengasaltaat ja putkifotobioreaktorit, mutta potentiaalia levän kasvatukseen voi olla myös paneelimallisissa fotobioreaktoreissa (Sierra et al. 2008, 137). Seuraavassa käsitellään pääasiassa näitä kasvatustekniikoita, mutta esitellään myös muuta teknologiaa.

3.1 Avoimet altaat

Yleisimmin mikrolevien viljelyssä käytetään avoimia altaita. Avoimet viljelyjärjestelmät, altaat ja kanavat, sijaitsevat lähes poikkeuksetta ulkotiloissa, jotta levän kasvatuksessa voidaan hyödyntää auringonvaloa (Molina Grima et al. 2003, 492). Suurin osa

nykyisistä kaupallisista sovelluksista on rengasaltaita, joiden olosuhteita säädelään erilaisin keinoin leväbiomassatuotannon maksimoimiseksi. Avoimet kasvatusallassysteemit eroavat toisistaan koon, muodon, rakennusmateriaalien, sekoitustavan ja kaltevuuden suhteen. (Moheimani 2005, 43-44, 47.)

Kaupallisiin tarkoituksiin suunnattu allasviljely keskittyy vain muutamaan levälajiin, koska harvat lajit menestyvät ulkoaltaiden kasvuolosuhteissa. Yleisimmin viljeltyt levälajit ovat Dunaliella, Spirulina ja Chlorella. Mikrolevän kannattava kasvatusta on rajoittunut suhteellisen pieneen määrään kasvatuslaitoksia, joista suurin osa sijaitsee Aasiassa, Australiassa ja Yhdysvalloissa ja jotka viljelevät levää lähinnä kalliiden terveystuotteiden valmistusta varten. (Moheimani 2005, 44.)

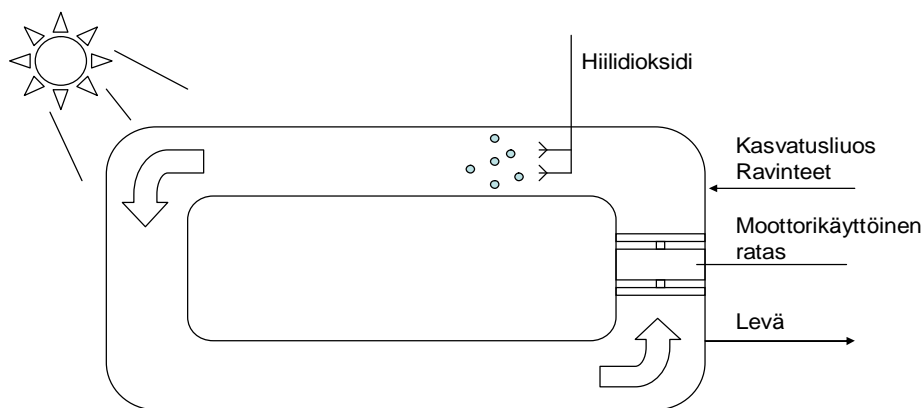
Suuret allassysteemit ovat tyypillisesti pinta-alaltaan yhdestä sataan hehtaaria ja syvyydeltään noin puolimetrisiä altaita, joiden olosuhteita ei kontrolloida eli niistä puuttuu esimerkiksi mekaaninen sekoitus ja hiilidioksidin syöttö. Tällaisia allassysteemeitä käytetään esimerkiksi Spirulinan ja Dunaliellan tuotantoon. Lajien viljelyn kontrolloimattomassa kasvuympäristössä mahdollistaa se, että lajit kasvavat erittäin valikoivissa olosuhteissa: Spirulinaa kasvatetaan korkeamäksisessä ja Dunaliella salinaa runsassuolaisessa vedessä. Tällöin leväviljelmä pysyy lähes yksilajisena. (Benemann 1995, 200; Borowitzka 1999, 315.)

Intensiiviset allassysteemit ovat matalia altaita, joiden syvyys on alle 0,3 metriä. Niissä on mekaaninen sekoitus, niihin syötetään hiilidioksidia ja kasvatusliuosta laimennetaan optimaalisten kasvuolosuhteiden ylläpitämiseksi. Matalamman altaan kasvuympäristöä pystytään kontrolloimaan paremmin, minkä vuoksi tuottavuus on moninkertainen verrattuna suuriin allassysteemeihin. Lisäksi pystytään periaatteessa kasvattamaan vain yhtä haluttua levälajia. (Benemann 1995, 200.) Seuraava luku käsittelee tarkemmin tällaista allassysteemiä.

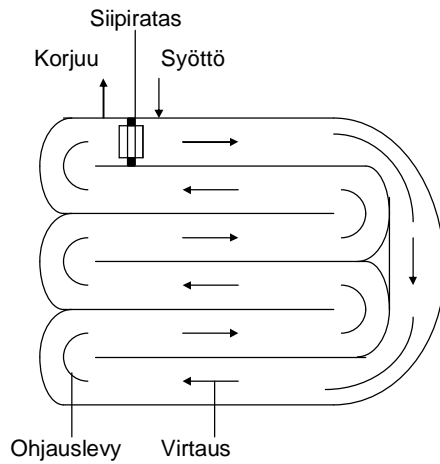
3.1.1 Rengasallas

Rengasallas on nykyisin yleisimmin käytössä oleva kasvatusallastyyppejä ja sen eri muotoja, erityisesti siipiratasmallia, on käytetty kaupallisesti levän tuotannossa yli 30 vuoden ajan. Allasta käytetään pääasiassa neljän levälajin kaupalliseen kasvatukseen: *Chlorella*, *Spirulina*, *Haematococcus* ja *Dunaliella*. (Moheimani 2005, 47-48.)

Rengasaltaat ovat matalia, syvyydeltään 0,15 – 0,25 metriä ja pinta-alaltaan tyypillisesti 0,5 – 0,6 hehtaaria. Sekoitus ja kasvatusliemen kierto altaassa saadaan aikaan siipirattaan avulla, jota pyöritetään koko ajan levän kerrostumisen ehkäisemiseksi. Altaan mutkiin asetetaan ohjauslevyjä virtauksen ohjaamiseksi kanavassa. Altaat voidaan rakentaa yksittäisiksi (kuva 2) tai liittää useampi virtauskanava yhteen (kuva 3). (Moheimani 2005, 47.) Virtauskanava valetaan betonista ja voidaan vuorata valkoisella muovilla (Chisti 2007, 297). Muovivuorausta käytetään suurimmassa osassa rengasaltaita (Benemann 1995, 201). Päivänvalolla viljelmään syötetään jatkuvasti hiilidioksidia ja ravinteita siipirattaan etupuolelta virtaussuuntaan ja rattaan takaa korjataan leväbiomassasatoa (Chisti 2007, 297).



Kuva 2. Yksinkertainen rengasallas (Sheehan et al. 1998, 4)



Kuva 3. Rengasallas, monta virtauskanavaa (Chisti 2007, 297)

Seuraavat valokuvat (4-6) rengasaltaista ja siipirattaista ovat havaijilaisen HR BioPetroleumin rengasaltaita ja fotobioreaktoritekniikkaa yhdistävältä pilottilaitokselta ja HR BioPetroleumin ja öljy-yhtiö Shellin yhteisestä mikrolevän kasvatukseen tarkoitettulta koelaitokselta (katso kappale 5.2). (HR BioPetroleum 2008b.)



Kuva 4. HR Biopetroleumin pilottilaitoksen rengasaltaita Havaijilla (HR BioPetroleum 2008b)



Kuva 5. Rengasallas (HR BioPetroleum 2008b)



Kuva 6. HR BioPetroleumin ja Shellin koelaitoksen siipirattaita tyhjiä rengasaltaissa (HR BioPetroleum 2008b vasen kuva & Shell 2008 oikea kuva)

3.1.2 Esimerkkinä Earthrise

Maailman suurimman rengasaltaita hyödyntävän leväbiomassantuotantolaitoksen omistaa Earthrise Nutritionals. Yhdysvalloissa Kaakkois-Kalifornian aavikolla sijaitsevassa laitoksessa viljellään Spirulinaa ja saatu leväbiomassa jalostetaan lisäravinnetuotteiksi. 30 kasvatusaltaasta koostuvan laitoksen allaspinta-ala on yhteensä 44 hehtaaria. Levän ravinteeksi altaisiin pumpataan puhdasta pulloitettua hiilidioksidia. Altaiden sekoittamiseen ja virtauksen ylläpitämiseen käytettävät siipirattaat ovat pituudeltaan 15-metrisiä. Levän kasvukausi kestää huhtikuusta lokakuuhun ja keskikesällä levää korjataan vuorokauden jokaisena tuntina nopean kasvun vuoksi. (Earthrise 2004.)

Levä erotetaan vedestä ja muusta aineksesta monivaiheisella suodatuksella. Ensin suodatetaan pois jätemateriaali, minkä jälkeen suodatetaan mikrolevä talteen. Ravinnerikas kasvatusvesi palautetaan altaisiin. Kun levä on suodatettu tiiviiksi massaksi, se kuivataan välittömästi. Ennen kuivausta leväsolujen vesipitoisuus on vielä 80 %. Kuivausprosessissa leväbiomassaa ruiskutetaan kuivauskammioon veden haihduttamiseksi nopeasti, jolloin syntyy kuivaa leväjauhetta. Jauhe imetään kammiosta keräilysuppilon ja tuore jauhe kylmäpuristetaan tableteiksi. Kaiken kaikkiaan levän muuntaminen biomassasta valmiiksi tuotteeksi suodatus-, kuivaus- ja puristusprosessissa kestää noin 15 minuuttia. Nopean prosessin tavoitteena on säilyttää levän lämmönarat ravinteet, pigmentit ja entsyymit. (Earthrise 2004.)

3.2 Suljetut fotobioreaktorit

Fotobioreaktoreita on erilaisia malleja: putki-, paneeli-, säkki- ja säiliöreaktori (Moheimani 2005, 50). Suuren mittakaavan sovelluksissa suositaan putkifotobioreaktoreja ja aurinkokeräintyyppisiä paneelifotobioreaktoreja, joiden pääajatuksena on levittää reaktorissa oleva kasvatusliuos suurelle pinta-alalle ja pitää liuos mahdollisimman ohuena kerroksena, jotta auringonvalon absorptio leväviljelmään saadaan maksimoiduksi (Rosello Sastre et al. 2007, 127). Nämä kaksi ovat ainoat fotobioreaktorimallit, joita on rakennettu tilavuudeltaan yli 1000-litraisina (Sierra et al. 2008). Tekniikan soveltamisessa suuressa mittakaavassa on kuitenkin kohdattu haasteita ja hyvin toimiva fotobioreaktorimalli on vielä kehitteillä (Rosello Sastre et al. 2007, 128).

Tärkeitä fotobioreaktorin suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa valon absorptio, systeemissä kiertävän fluidin (kasvatusliuoksen) dynamiikka ja leväsolujen aineenvaihdunta. (Rosello Sastre et al. 2007, 127 -128.)

3.2.1 Putkifotobioreaktori

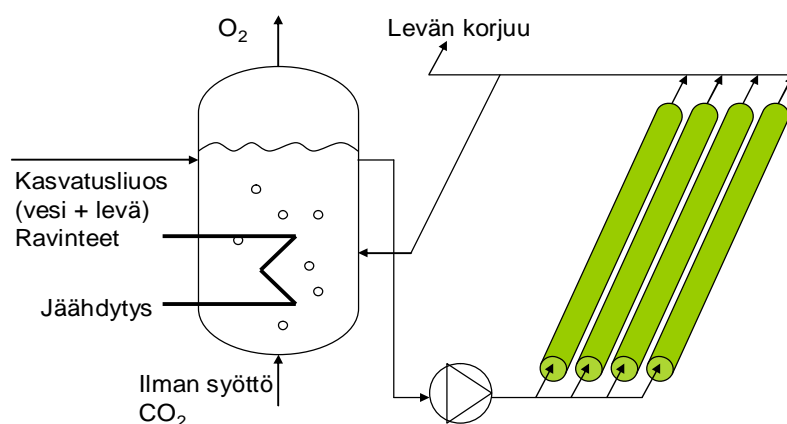
Putkifotobioreaktori koostuu valottomasta säiliöosasta, jossa tapahtuu kaasujen vaihto ja kasvatusliuoksen jäähtytys, ja putkista, joissa systeemissä kiertävään kasvatusliuokseen absorboituu auringon valoa. (Rosello Sastre et al. 2007, 128.)

Fotobioreaktorin putket voidaan valmistaa esimerkiksi läpinäkyvästä muovista tai lasista. Putkien halkaisija on yleensä alle 0,1 metriä ja niiden pituus voi vaihdella kymmenestä sataan metriin. Putkien halkaisija on pienehkö, koska auringonvalo ei pääse absorboitumaan kovin syvälle tiheässä leväbiomassaliuoksessa. Putket voidaan järjestellä erilaisiin muodostelmiin, joiden tavoitteena on ideaalinen virtaus ja valon absorptio. Maa putkien alla maalataan usein valkoiseksi tai peitetään valkoisella muovilla valon heijastumisen lisäämiseksi. (Chisti 2007, 298-299; Moheimani 2005, 51.) Kuvassa 7 on levänkasvatusteknologiaan ja levädieselin jalostamiseen erikoistuneen AlgaeLinkin valmistamia fotobioreaktoriputkia.



Kuva 7. Fotobioreaktoriputkia (AlgaeLink 2008a/Myyntipäällikkö Helen Parkerin luvalla)

Kuvan 8 fotobioreaktorimallissa on rivissä suoria, maan tasolla vaakasuorassa olevia putkia. Liuos kiertää systeemissä aurinkokeräinputkien ja säiliön välillä. Systeemiin syötetään tuoretta leväliuosta, ravinteita ja hiilidioksidia ja leväbiomassaa korjataan jatkuvasti. Vaihtoehtoisesti putket voidaan valmistaa joustavasta läpinäkyvästä muovista ja kiertää säiliön ympärille. (Chisti 2007, 298-299.)



Kuva 8. Putkifotobioreaktori (Chisti 2007, 298)

Biomassan kerrostuminen putkissa ja kiinnittyminen reaktorin seinämiin ehkäistään pitämällä kasvatusliuos jatkuvassa liikkeessä systeemissä. Virtaus myös edistää säiliöosassa tapahtuvaa kaasujen vaihtoa. Kasvatusliuoksen biomassakonsentraatio ja viskositeetti vaikuttavat virtauksen sujuvuuteen systeemissä. Virtaus saadaan aikaan ilmakuplien avulla tai käyttämällä pumppua. (Rosello Sastre et al. 2007, 128-129.) Pumppuna voidaan käyttää mekaanista pumppua tai hellävaraisempaa ilmanostopumppua/mammuttipumppua (airlift pump). Mekaanisten pumppujen suunnittelu, asennus ja käyttö on helpompaa kuin ilmanostopumppujen, mutta ne voivat vahingoittaa leväsoluja. Ilmanostopumput eivät ole yhtä joustavia kuin mekaaniset pumput ja tarvitsevat ilmaa toimiakseen. (Chisti 2007, 299.)

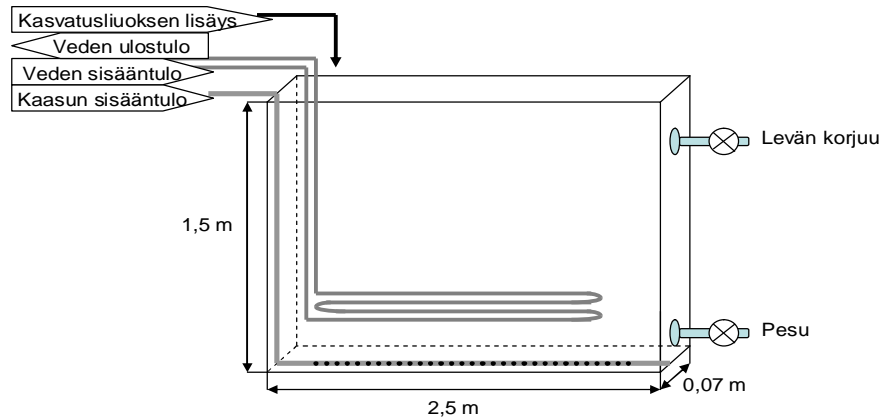
Fotobioreaktori on säännöllisin väliajoin puhdistettava ja desinfioitava. Putkista on käytön aikana poistettava leväbiomassan fotosynteesissä tuottamaa happea, koska liiallinen hapen määrä haittaa fotosynteesiä, joka puolestaan on edellytys biomassan kasvulle. Happea ei voida poistaa suoraan aurinkokeräinputkista, vaan se on ensin johdettava säiliöön, mikä asettaa rajoituksia putkien pituudelle. Maksimipituus riippuu muun muassa leväbiomassan konsentraatiosta kasvatusliuoksessa, valon intensiteetistä, virtausominaisuuksista ja hapen konsentraatiosta putken sisääntulossa. (Chisti 2007, 299-300.)

Valoisaan aikaan ulkotiloissa sijaitsevaa fotobioreaktoria on jäähdytettävä. On edullista rajoittaa lämpötilaa myös pimeään aikaan, koska biomassan häviäminen levässä tapahtuvan kaasujen vaihdon vuoksi voidaan saada vähenemään lämpötilaa alentamalla. Ulkona olevien fotobioreaktorien jäähdytys käy tehokkaasti ja edullisesti lämmönvaihtimien avulla. Lämmönsiirrin voidaan sijoittaa säiliön kaasunpoisto-osaan tai putkiin kiertosysteemissä. Putkiin voidaan myös ulkopuolelta suihkuttaa kylmää vettä, mikä edesauttaa lämmön haihtumista. (Chisti 2007, 300.)

Putkifotobioreaktorissa leväsolut altistuvat jatkuvasti ympäristön olosuhteiden muutoksille, esimerkiksi valaistuksen muutoksille. Valon vaihtelun seurauksia soluissa ei vielä osata täysin ennustaa suurissa fotobioreaktoreissa. Biomassa joutuu lisäksi kestävämpään pumppujen aikaansaamaa leikkausjännitystä ja paineen vaihteluita. Pumpussa kasvatulusuoksen paine nousee noin 1 bar:n verran ja laskee jälleen putkissa kitkan ja paikallisten turbulenssien aiheuttaessa painehäviöitä. Paineen jatkuvan muutoksen vaikutuksesta levän fysiologiaan on toistaiseksi hyvin vähän tietoa. (Rosello Sastre et al. 2007, 128-129.)

3.2.2 Paneelifotobioreaktori

Paneelifotobioreaktori on läpinäkyvä, suorakaiteen muotoinen säiliö (paneeli), jonka paksuus on suuruusluokaltaan 0,01–0,05 m (Moheimani 2005, 52). Kuvassa 9 on esitetty eräässä tutkimuksessa (Sierra et al. 2008) käytetty paneelifotobioreaktorimalli, jonka tilavuus on 250 litraa. Kyseinen paneeli koostuu polyetyleenimuovisäleistä, joka on asetettu kahden rautakehikon väliin. Virtaus saadaan aikaan tuomalla reaktoriin ilmaa putkesta, joka sijaitsee reaktorin pohjassa. Lämpötilaa hallitaan lämmönsiirtimellä, jossa jäähdytysaineena on vesi. Paneeliin on asennettu kaksi palloventtiiliä, joista toisen kautta paneeli voidaan pestä ja toisesta korjataan leväbiomassaa. (Sierra et al. 2008, 138.)



Kuva 9. Paneelifotobioreaktori (Sierra et al. 2008, 138)

Auringon säteilyn perusteella optimoidaan reaktorin sijainti, asento ja suuntaus. Jotta valon absorptio maksimoituu, on mietittävä, asetetaanko reaktori pysty- vai vaakatasoon ja mihin ilmansuuntaan. Paneelifotobioreaktorin suunnittelussa on lisäksi otettava huomioon kasvatusliuoksen dynamiikkaan, massan- ja lämmönsiirtoon ja sekoitukseen liittyviä seikkoja kuten putkifotobioreaktorin tapauksessa. (Sierra et al. 2008, 140-141.) Aiheesta on esitetty yksityiskohtaisia tutkimustuloksia ja laskentayhtälöitä lähteessä Sierra et al. 2008.

Joillakin levälajeilla (*Nanochloropsis* sp., *Chaetoceros mulleri*, *Porphyridium cruentum*) on paneelifotoreaktorissa viljelemällä saavutettu hyviä tuottavuuksia. (Moheimani 2005, 52.) Paneelifotobioreaktorien etu verrattuna putkimalliseen fotobioreaktoreihin on, että niihin tarvitaan vähemmän energiaa, jotta saadaan aikaan tarpeeksi virtausta, sekoitusta ja lämmönsiirtokapasiteettia (Sierra et al. 2008, 146). Sierran ja muiden (2008, 136) tutkimuksessa esiintyneeseen paneelifotobioreaktoriin tarvittava energiamäärä on 53 W m^{-3} , kun putkifotobioreaktoriin tyypillisesti tarvittava energiamäärä on $2000\text{--}3000 \text{ W m}^{-3}$.

3.2.3 Muut fotobioreaktorit

Jatkuvasekoitteisia ilmastettuja säiliöfotobioreaktoreita käytetään lähinnä leväkannan ylläpitoon ja suurentamiseen laajemman mittakaavan viljelyä varten. Lisäksi niitä käytetään kalankasvatuksessa tuottamaan levää kalojen rehuksi. Niissä on sylinterinmuotoinen säiliö, jota sekoitetaan moottorikäyttöisellä aisalla tai magneettien avulla. Valoa voidaan tuoda systeemiin ulkopuolelta tai sisäisesti esimerkiksi kuituoptiikkaa käyttäen. Nämä reaktorit ovat helppohoitaisia, mutta niiden laajamittaisessa hyödyntämisessä on ollut vaikeuksia. (Moheimani 2005, 49.)

Myös säkkimäisiä polyetyleenimuovista valmistettuja fotobioreaktoreita käytetään kalanrehun viljelyyn. Yhden säkin keskimääräinen korkeus on 2 m ja tilavuus 28 m³. Säkki asetetaan kehikkoon tai se voidaan ripustaa roikkumaan. Viljelmää sekoitetaan tuomalla säkkiin ilmaa pohjassa olevasta sisääntuloputkesta. Yleensä säkkejä pidetään sisätiloissa kontrolloidussa lämpötilassa ja keinovalaistuksessa. Säkkimäisillä fotobioreaktoreilla on pystytty tuottamaan levää enemmän kuin rengasaltaissa viljelemällä ja säkkejä onkin käytetty hyväksi eri levälajien (Chaetoceros, Phaeodactylum, Dicroteria, Isochrysis, Pavlova, Tetraselmis, Dunaliella) kaupallisessa tuotannossa. Säkkifotobioreaktorien tärkeimpänä etuna on käytön helppous. (Moheimani 2005, 50-51.)

3.3 Tuotantotapojen vertailu

Taulukossa 1 on vertailtu leväbiomassan tuottamista putkifotobioreaktorissa ja rengasaltaassa halutun vuosittaisen biomassatuotannon ollessa kummassakin tapauksessa 100 tonnia. Taulukossa esitetyt arvot ovat kokemukseräisiä ja suuren mittakaavan tuotantoon sovellettuja. (Chisti 2007, 300.)

Taulukko 1. Fotobioreaktori- ja rengasallasviljelyn vertailu (Chisti 2007, 299 & Kadam 2001, 17)

| | Putkifotobioreaktori | Rengasaltaat |
|---|--|--|
| Tuotettava biomassa [kuivaa t/a] | 100 | 100 |
| Tuottavuus [kg m⁻³ d⁻¹] | 1,535 | 0,117 |
| Biomassan konsentraatio kasvatusliuoksessa [kg m⁻³] | 4,00 | 0,14 |
| Tarvittava pinta-ala [ha] | 0,5681 | 0,7828 |
| Öljyn saanti [m³ ha⁻¹] | | |
| Levän öljypitoisuus 70 % kuivapainosta | 136,9 | 99,4 |
| Levän öljypitoisuus 30 % kuivapainosta | 58,7 | 42,6 |
| Hiilidioksidin kulutus [t/a] | 183 | 183 |
| Systeemin geometria | 132 yhdensuuntaista putkea/yksikkö Putken pituus 80 m Putken halkaisija 0,06 m | Yhden altaan pinta-ala 978 m ² Altaan pituus 82 m Altaan leveys 12 m Altaan syvyys 0,3 m |
| Yksiköiden lukumäärä | 6 | 8 |

Rengasaltaissa viljelemällä saadaan leväbiomassaa hehtaaria kohden vuodessa 128 tonnia (taulukon mukaan) – 137 tonnia (Kadam 2001, 17). Hiilidioksidia tähän tarvitaan vastaavasti 234–250 tonnia. Taulukon mukaan vuoden aikana putkifotobioreaktorista saadaan biomassaa 176 tonnia hehtaarilta, mihin tarvitaan hiilidioksidia 322 tonnia, joten voidaan päätellä fotobioreaktorin olevan biomassan tuotannossa tehokkaampi.

Vertailutulosten mukaan kasvatustilavuuteen suhteutettuna reaktori tuottaa biomassaa 13-kertaisen määrän altaaseen verrattuna, mistä johtuen fotobioreaktoreissa kasvatettavasta levästä saadaan myös enemmän öljyä kuin altaissa kasvatettavasta. Lisäksi fotobioreaktorin kasvatusliuoksessa tyypillinen biomassakonsentraatio on lähes 30 kertaa suurempi kuin rengasaltaiden yleinen konsentraatio, minkä vuoksi fotobioreaktorin kasvatusliuosta on tietyn leväbiomassamäärän korjaamiseksi käsiteltävä huomattavasti pienempi määrä kuin altaan liuosta. Tästä johtuen leväbiomassan korjuu fotobioreaktoreista on edullisempaa kuin altaista. (Chisti 2007, 300.)

Kumpikin tuotantotapa kuluttaa hiilidioksidia saman verran, jos jätetään huomiotta häviöt ilmakehään. Todellisuudessa hiilidioksidihäviöt altaista ilmakehään voivat olla

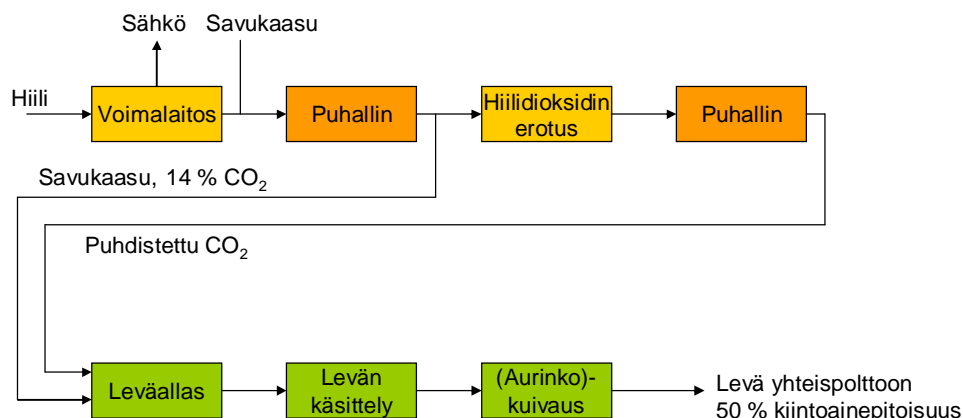
merkittävät, joten fotobioreaktorit hyödyntävät hiilidioksidia altaita huomattavasti tehokkaammin. Altaiden avoimuus aiheuttaa myös muita haasteita. Hiilidioksidin lisäksi ilmakehään voi haihtua merkittäviä määriä vettä, jolloin allas jäähtyy. Toisaalta myös ainoa keino altaan jäähdyttämiseksi on lämmön haihtuminen ilmakehään toisin kuin fotobioreaktoreissa. (Chisti 2007, 298.) Suolaista vettä voidaan käyttää kasvatuksessa edullisesti, mutta myös haihtuva vesi on korvattava ja vaihteleva vesikemia voi vaikuttaa levän saantiin (Pienkos 2007). Lisäksi on huolehdittava siitä, että altaan lämpötila pysyy optimaalisena. Altaan avoimuuden vuoksi kasvatettava levä on myös altista saastumiselle: altaaseen voi joutua epätoivottuja levälajeja ja mikro-organismeja, jotka käyttävät levää ravintonaan (Chisti 2007, 298). Siksi altaissa on pystytty menestyksekkäästi kasvattamaan vain muutamaa levälajia (Moheimani 2005, 44). Suljetussa fotobioreaktoreissa pystytään teoriassa kasvattamaan yhtä levälajia kerrallaan ja optimoimaan kasvatolosuhteet kunkin levälajin tarpeiden mukaan. Se on potentiaalinen kasvuympäristö useille mikrolevälajeille. (Chisti 2007, 298.)

Suljettujen systeemien haasteita ovat korkeat rakennus- ja käyttökustannukset, joita lisäävät muun muassa ajoittaisen puhdistuksen ja steriloinnin tarve ja runsas hapentuohto. Haasteina fotobioreaktoreissa ovat myös lämpötilan hallinta ja tekniikan soveltaminen suuressa mittakaavassa. (Moheimani 2005, 53–54.) Lisäksi ulkotiloissa sijaitsevat auringonvaloa hyödyntävät suljetut systeemit ovat vielä nykyään hyvin harvinaisia; useimmat suljetut systeemit ovat keinovalaistuja, mikä lisää energiakustannuksia. Nykyään suuret kaupalliset kasvatuslaitokset käyttävätkin levän kasvatuksessa lähes yksinomaan avoimia altaita. (Borowitzka 1999, 315.) Jos fotobioreaktorien ongelmat kuitenkin saadaan ratkaistuksi, syntyy uusia mahdollisuuksia levän massatuotantoon, joka ei fotobioreaktorien myötä ole enää sidoksissa ulkoisilta olosuhteiltaan soveltuvan kasvatuspaikan etsintään (Moheimani 2005, 54).

3.4 Teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hyödyntäminen levän kasvatuksessa

Kuten edellä todettiin, mikroleväbiomassa sisältää hiiltä noin 50 % kuivapainosta ja levän tarvitsema hiili saadaan helpoimmin hiilidioksidista (Chisti 2007, 297). On arvioitu, että kuivapainoltaan 100 tonnin leväbiomassamäärän tuottamiseen tarvitaan 183 tonnia hiilidioksidia (Chisti 2007, 299; Rodolfi et al. 2008, 1). Valoisaan aikaan hiilidioksidia on syötettävä viljelmään jatkuvasti. Monissa tutkimuksissa todetaan mahdollisuus hyödyntää fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten hiilidioksidipäästöjä. Esimerkiksi Kadam (2001, 4) ja Sheehan et al. (1998, 4-5) tarkastelevat mahdollisuutta hyödyntää päästöjä levän allasviljelyssä. Kadamin (2001, 17–18) mukaan 1000 hehtaarin laajuinen allasysteemi voi prosessoida hiilidioksidia karkeasti ottaen 250000 tonnia vuodessa. 50 MW:n hiilisähkövoimalaitos tuottaa hiilidioksidipäästöjä noin 414000 tonnia vuodessa, joten 1000 hehtaarin levänkasvatussysteemi kykenee hyödyntämään päästöistä noin 60 %.

Mäen ja Posion (2004, 2) mukaan voimalaitoksen savukaasujen koostumus riippuu lähinnä käytettävästä polttoaineesta ja -tekniikasta. Savukaasujen koostumukseen voidaan vaikuttaa polttoprosessia säätämällä. Tyypillisesti savukaasut sisältävät pääosin typpeä, hiilidioksidia, vesihöyryä ja happea. Lisäksi savukaasuissa on rikin ja typen oksideja sekä pieniä määriä hiukkaspäästöjä ja raskasmetalleja. Jos voimalaitoksen savukaasuja, joiden hiilidioksidipitoisuus on noin 14 %, johdetaan suoraan levänkasvatusaltaaseen, kuten esimerkiksi Kadam (2001, 16) ehdottaa, savukaasun koostumus on tarkasti määritettävä ja tutkittava osakomponenttien vaikutusta kasvatettavaan levälajiin. Vaihtoehtona on erottaa hiilidioksidi savukaasuista ja syöttää puhdas hiilidioksidi leväaltaaseen (Kadam 2001, 16). Prosessin vaiheet on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 10.



Kuva 10. Hiilidioksidin hyödyntäminen levän kasvatuksessa (Kadam 2001, 16)

Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää tehokkaasti korvaamalla fossiilisia polttoaineita kuten hiiltä biomassalla. Esimerkiksi voimalaitoksissa voidaan hiilen ja biomassan yhteispoltolla saavuttaa suurempia päästövähennyksiä kuin korvaamalla dieseliä ja bensiiniä biodieselillä ja etanolilla. (IEA Bioenergy 2007, 9.) Myös leväbiomassan yhteispoltosta hiilen kanssa on tehty elinkaarianalyysi (Kadam 2001), jossa on lisäksi arvioitu yhtäaikaista voimalaitoksen hiilidioksidipäästöjen hyödyntämistä leväbiomassan kasvatuksessa, jolloin hiilidioksidi kiertää systeemissä. Tutkimuksen mukaan hiilidioksidin kierrätyksellä voidaan laskennallisesti saavuttaa merkittäviä vähennyksiä voimalaitoksen päästöissä: jo 25 %:n kierrätysasteella hiilidioksidipäästöt ilmakehään vähenevät 19 %. Laskelmissa on oletettu, että leväbiomassan käsittelyssä ennen polttoa on käytetty aurinkokuivausta. (Kadam 2001, 23.)

Hiilidioksidin talteenottoa ja siihen liittyvää hyötykäyttöä tai loppusijoitusta on tutkittu ja kehitetty jo vuosikymmenten ajan, mutta niihin liittyy vielä merkittäviä teknisiä ja taloudellisia haasteita ja ympäristöhaasteita (Energiateollisuus 2008). Ensimmäinen voimalaitos, jossa on hiilidioksidin talteenotto- ja kuljetusjärjestelmä, otettiin käyttöön syksyllä 2008 Saksassa. Talteenotto ei kuitenkaan ole nykyään taloudellisesti kannattavaa, sillä kustannukset ovat 90 euroa hiilidioksiditonnilta hiilidioksidin päästöluvan maksaessa noin 27 euroa tonnilta. Hiilidioksidin talteenotto käy edullisemmaksi päästölupien hintojen noustessa ja hiilidioksidin talteenoton teknologian tullessa edullisemmaksi kokemusten myötä. (Laatikainen 2008.)

4 LEVÄBIOMASSAN KORJUUMENETELMÄT

Leväbiomassan korjuu voi olla ongelmallista leväsolujen pienen koon takia: leväsolujen halkaisija on noin 3 - 30 μm . Lisäksi kasvatusliemet ovat yleensä suhteellisen laimeita sisältäen kuivaa biomassaa alle 0,5 kg/m^3 , minkä vuoksi on käsiteltävä suuria tilavuuksia kasvatuslientä biomassan talteen saamiseksi. (Molina Grima et al. 2003, 492.) Biomassan korjuu riippuu myös kasvatusliuoksessa olevien levälajien määrästä - monilajisen leväbiomassan korjuu voi olla vaikeaa (Benemann 1009, 204). Korjuukustannukset voivat muodostaa jopa kolmasosan leväbiomassan kustannuksista tuotantoprosessissa (Molina Grima et al. 2003, 492).

Leväbiomassan korjuussa on yksi tai useampia vaiheita, joiden tarkoituksena on erottaa kiinteä biomassa nesteestä. Biomassan korjuun ensimmäinen vaihe on mekaaninen vedenerotus sentrifugoimalla, suodattamalla tai hyödyntämällä painovoiman aiheuttamaa levän kerrostumista (sedimentaatio). Näitä prosesseja voi edeltää flokkulaatiovaihe. Myös flotaatiota on käytetty apuna korjuuprosessissa. Talteen otettu leväbiomassa on korjuun jälkeen usein vielä kuivattava termisesti ennen kuin sitä voidaan hyödyntää. (Molina Grima et al. 2003, 492.)

4.1 Flokkulaatio

Ennen sedimentointia, suodatusta tai sentrifugia voidaan käyttää flokkulaatiota suurentamaan levän partikkelikokoa ja näin helpottamaan jatkokäsittelyä. Mikroleväsoluilla on negatiivinen pintavaraus, joka estää solujen kerääntymisen yhteen. Lisäämällä kasvatusliuokseen flokkulantteja, esimerkiksi kationisia polymeerejä, leväsolujen pintavaraus neutraloituu, jolloin ne voivat kiinnittyä toisiinsa suuremmiksi partikkeleiksi eli flokeiksi. (Molina Grima et al. 2003, 493.)

4.2 Sedimentointi

Painovoimaan perustuva sedimentointi mahdollisesti flokkulaatiota apuna käyttäen tulee kyseeseen sellaisten levätuotteiden valmistuksessa, joiden hinta on erittäin alhainen. Levän annetaan laskeutua sedimentaatio-säiliössä tai -altaassa. Tätä tekniikkaa on kokeiltu jätevedenkäsittelyyn liittyvissä biomassantuotantoprosesseissa. (Molina Grima et al. 2003, 492.)

4.3 Suodatus

Suodatus voidaan toteuttaa paineen avulla, mikä sopii suhteellisen suurille mikrolevälajeille (*Spirulina platensis*), mutta pienten bakteerien kokoisten levien (*Dunaliella*, *Chlorella*) korjuu tällä tavoin ei onnistu. (Molina Grima et al. 2003, 498.)

Mikrolevän korjuussa voidaan käyttää apuna irtopintasuodatusta (precoat-suodatusta), jossa suodatinmateriaali päällystetään jollakin apuaineella, kuten selluloosakuiduilla, ennen biomassaliuoksen laskemista suodattimen läpi. Levä saadaan talteen kaapimalla se suodatinkankaan pinnasta. Tällöin leväbiomassan joukkoon sekoittuu apuainetta, joten tekniikkaa ei käytetä esimerkiksi rehun tuotannossa, jossa levän saastuminen ei ole suotavaa. (Molina Grima et al. 2003, 498.)

Mikroleväbiomassan vaihtoehtoiseksi suodatustavaksi perinteisten suodattimien sijaan voidaan valita mikrosuodatus kalvojen avulla tai ultrasuodatus. Mikrosuodatus sopii helposti vahingoittuville leväsoluille. Leväbiomassan laajamittaisessa tuotannossa kalvosuodatusta ei yleensä käytetä, koska sentrifugointi on taloudellisempi tapa korjata biomassaa. (Molina Grima et al. 2003, 498.)

4.4 Sentrifugointi

Useimmat mikrolevät voidaan korjata talteen sentrifugien avulla eli linkoamalla. Biomassan korjuu sentrifugeilla kannattaa korkeahintaisia tuotteita valmistettaessa. Sentrifugeilla voidaan käsitellä suuria määriä biomassaa kohtalaisen nopeasti, mutta niiden käyttö on energiaintensiivistä. Sentrifugit ovat kuitenkin yleisin tapa erottaa leväbiomassa kasvatusliemestä. (Molina Grima et al. 2003, 493, 497.)

Linkous on keskipakovoimaan perustuva mekaaninen vedenerotusmenetelmä (Ojanen 2001, 21). Se, voidaanko leväbiomassaa korjata sentrifugin avulla, riippuu biomassan lingottavuusominaisuuksista (Ojanen 2001, 21), joihin kuuluvat esimerkiksi leväsolujen laskeutuvuus ja laskeutumissyvyys. Laskeutumissyvyyttä voidaan pienentää sentrifugin suunnittelun avulla. Linkoukseen kuluvaa aikaa voidaan säädellä virtausnopeutta muuttamalla. (Molina Grima et al. 2003, 498.)

4.5 Kuivaus

Jo korjuutavan valinnassa on otettava huomioon lopputuotteen haluttu kosteuspitoisuus. Esimerkiksi sedimenttimassa on yleensä biomassakonsentraatioiltaan laimeampaa kuin sentrifugilla talteen otettu biomassa. (Molina Grima et al. 2003, 493.) Termisen kuivauksen tarkoituksena on vähentää leväbiomassan kosteuspitoisuutta haihuttamalla vettä ilmaan lämmön avulla (Ojanen 2001, 21). Korjattaessa biomassaa mekaanisesti olisikin hyvä pyrkiä eroon liiasta kosteudesta, koska korjuun jälkeisestä termisestä kuivauksesta aiheutuu energiakustannuksia. Korjauksen aikana mikroleväbiomassan konsentraatio kasvaa 50 – 200 -kertaiseksi alkuperäisestä ja korjatun biomassan kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 5 – 15 %. Koska terminen kuivaus on mekaanista kuivausta kalliimpaa, mekaanisen kuivauksen, kuten suodatuksen tai sentrifugin, tulisi aina edeltää termistä prosessia. (Molina Grima et al. 2003, 493, 500.)

Erityisesti lämpimässä ilmastossa talteen korjattu leväbiomassa pilaantuu nopeasti ja kuivauksella voidaan pidentää biomassan säilyvyysaikaa. Mikrolevälle käytettyjä

kuivausmenetelmiä ovat ruisku-, rumpu-, jäädytys- ja aurinkokuivaus. Ruiskukuivausta käytetään levän kuivauksessa yleisesti korkeahintaisten lopputuotteiden valmistuksessa. Ruiskukuivausta käytetään esimerkiksi Earthrise Nutritionalsin laitoksessa (Earthrise 2004) (katso luku 3.1.2). Jäädytyskuivausta puolestaan on käytetty tutkimuslaboratorioissa, mutta laajempaan käyttöön se on liian kallista. (Molina Grima et al. 2003, 500.) Rumpukuivauksessa kuivattava aines syötetään kuivaimen toiselta puolelta rumpuun, josta se rummun pyörimisliikkeen seurauksena siirtyy toiseen päähän. Rummussa on kuumia kaasuja, jotka aiheuttavat kuivumisen. Rummun tukkeutumisen estämiseksi rumpuun syötettävän aineksen tulisi olla kuiva-ainepitoisuudeltaan yli 65-prosenttista. Mekaanisesta vedenerotuksesta tuleva biomassa-aines voidaan sekoittaa kuivattuun ainekseen ennen syöttämistä rumpukuivaimen. (Ojanen 2001, 23.)

4.5.1 Aurinkokuivaus

Aurinkokuivaustekniikkaa on vuosikymmeniä hyödynnetty erityisesti tropiikissa esimerkiksi kahvi- ja kaakaopapujen kuivauksessa. Aurinkokuivaus perustuu auringon lämpöenergian hyödyntämiseen ylimääräisen kosteuden poistamiseksi kuivattavasta aineesta. Auringon energiaa voidaan käyttää kuivauksessa suoraan tai lämmittää kuivausilmaa auringon energian avulla, jolloin kuivattava tuote ei altistu auringon säteilylle. Aurinkokuivaus on taloudellisesti edullista ja ympäristöystävällistä. Kuivausprosessi kestää useita päiviä, sillä auringon energian hyödyntäminen on luonnollisesti mahdollista vain päiväsaikaan, kun auringonvaloa on saatavilla. (Kadam 2001, 43-45.) Eräänlainen levän kuivauksessa käytettävä aurinkokuivainmalli on esitetty kuvassa 11.

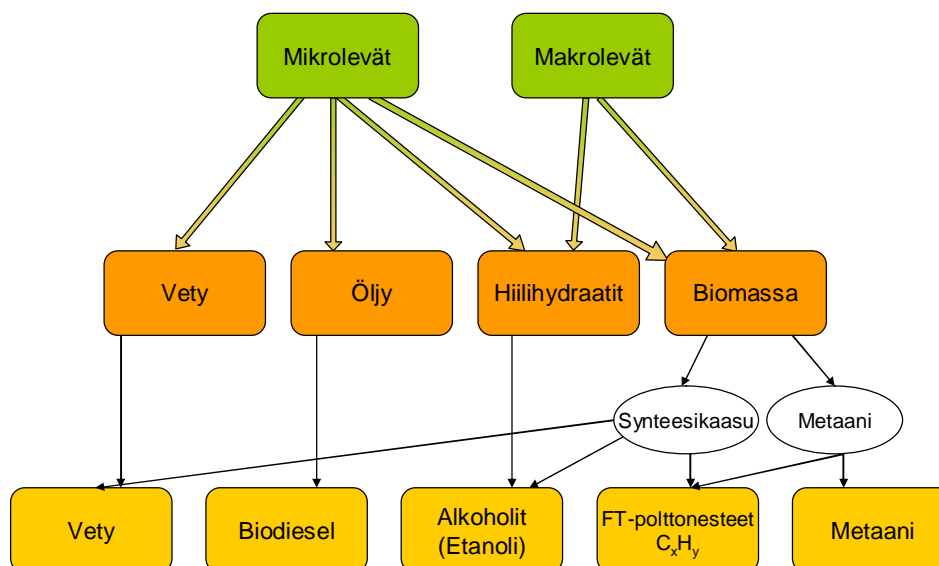


Kuva 11. Aurinkokuivain levälle (AlgaeLink 2008b/Myyntipäällikkö Helen Parkerin luvalla)

Kadam (2001, 47) arvioi, että aurinkokuivaustekniikka on käyttökelpoista myös leväbiomassan kuivauksessa. Leväbiomassan aurinkokuivauksesta on kuitenkin vielä tehtävä kokeita ja määritettävä levälle sopivat aurinkokuivausmenetelmät.

5 POLTTOAINEEN VALMISTUS

Leväbiomassan kolme pääkomponenttia ovat hiilihydraatit, proteiini ja luonnolliset öljyt (Sheehan et al. 1998, 6.) Biomassasta on mahdollista valmistaa useaa eri polttoainetta muun biomassaa-aineksen tavoin. Leväbiomassan jalostamisessa polttoaineeksi voitaneen soveltaa pitkälti samoja periaatteita, jotka nykyään pätevät muun biomassan käsittelyssä. Kuvan 12 kaavio havainnollistaa mikro- ja makrolevistä saatavia polttoaineita.



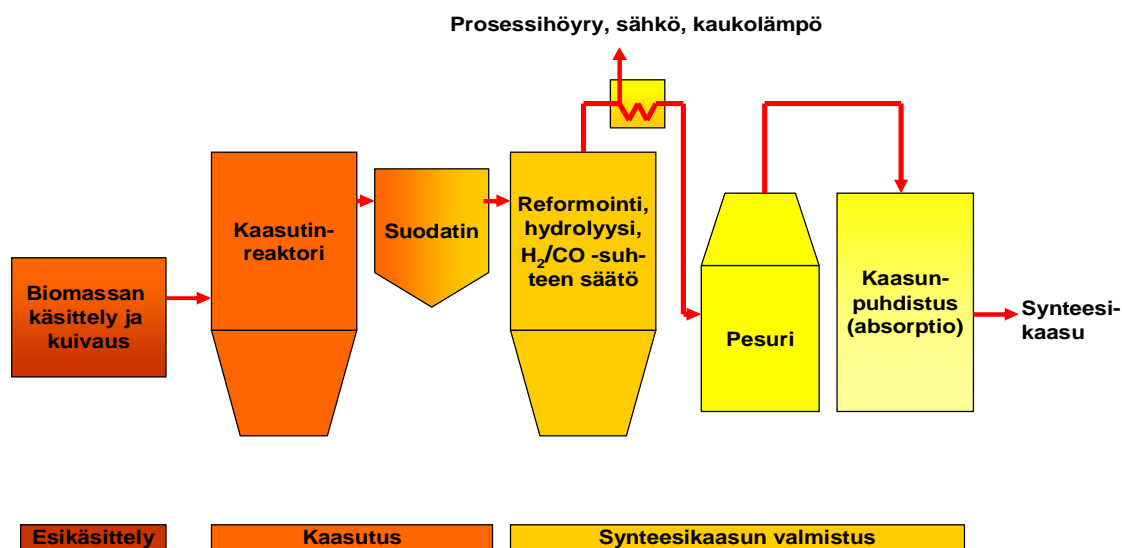
Kuva 12. Levistä saatavia polttoaineita (Pienkos 2007, Hamelinck & Faaij 2006, 3269)

Leväbiomassan tuottamasta öljystä voidaan esteröintiprosessilla valmistaa biodieseliä, jota voidaan käyttää dieselmootoreissa dieselpolttoaineeseen sekoitettuna. (Hamelinck

& Faaij 2005, 3269-3270.) Leväbiomassaa voidaan myös hyödyntää sellaisenaan ja polttaa kuivauksen jälkeen. Yhteispoltolla fossiilisten polttoaineiden kanssa voidaan vähentää voimalaitosten hiilidioksidipäästöjä. (Kadam 2001, 23.) Mikroleväbiomassa voidaan kaasutusprosessilla muuttaa synteetikaasuksi, josta voidaan jalostaa alkoholia, FT- eli Fischer-Tropsch -polttonestettä, vetyä (Hamelinck & Faaij 3269) tai niin kutsuttua ultrapuhdasta synteetikaasua (Vapo Oy 2008b). Biomassasta hydrolyysillä saatavat sokerit (hiilihydraatit) voidaan fermentoinnilla muuntaa alkoholeiksi. Esimerkiksi bioetanolia voidaan käyttää polttoaineena bensiinimoottoreissa. Biomassa voidaan myös mädättää anaerobisesti, jolloin syntyy metaanikaasua (Chisti 2007, 297). Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin biomassan käsittelyä kaasuttamalla ja biodieselin ja vedyn valmistamista mikroleväbiomassasta.

5.1 Nestemäisten biopolttoaineiden tuotanto kaasutusprosessilla

Ennen kaasutusprosessia biomassa on esikäsiteltävä ja kuivattava. Biomassan kuivauksessa pyritään keskimääräiseen 85 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. (Vapo Oy 2008a.) Esikäsittelyn ja kuivauksen jälkeen biomassa kaasutetaan tuotekaasuksi. Tuotekaasu puhdistetaan suodattamalla ja pesemällä, jolloin kaasusta poistuvat kiinteät epäpuhtaudet. Metaani ja raskaammat hiilivedyt kuten tervat reformoidaan krakkaamalla kevyemmiksi yhdisteiksi. Vesipesurissa ja sen jälkeisessä absorptioprosessissa tuotekaasusta poistuvat rikki- ja typpiyhdisteet, hiilidioksidi ja muut mahdolliset kaasumaiset epäpuhtaudet. Tuotteena saadaan puhdasta synteetikaasua, joka sisältää ainoastaan häkää (CO) ja vetyä (H₂). (Vapo Oy 2008c.) Kaasutusprosessin vaiheet on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Kaasutusprosessin vaiheet (Vapo Oy 2007)

Kuten edellä todettiin, synteisikaasu voidaan jatkojalostaa alkoholeiksi, Fischer-Tropsch-polttonesteiksi tai jopa puhtaaksi vedyksi (Hamelinck & Faaij 3269). Synteisikaasu voidaan jalostaa myös katalyyttisellä jatkokäsittelyllä ultrapuhtaaksi synteisikaasuksi, mutta tämä prosessi on vielä kehitysvaiheessa (Vapo Oy 2008b). Synteisikaasun vety-häkä-suhdetta säädetään sen mukaan, mikä haluttu lopputuote on. Esimerkiksi metanolin (CH₃OH) tuottamiseen tarvitaan kaksi H₂-molekyyliä jokaista CO-molekyyliä kohden, joten tarvittava H₂/CO-suhde on 2:1. (Boyle (toim.) 2004, 134.) Kaasutusprosessista saadaan prosessiin syötetystä polttoaineen energiasta tuotekaasun käsittelyvaiheessa noin kolmasosa takaisin jäähdytyslämpönä, koska kaasua on jäähdytettävä useassa vaiheessa. Jäähdytyslämpö voidaan käyttää teollisuuden prosessihöyryn, kaukolämmön tai vastapainesähkön tuottamiseen. (Vapo Oy 2008c.)

5.2 Biodiesel

Nykyään biodieseliä tuotetaan kasviöljyistä ja eläinrasvasta. Leväöljy ei ole vielä kaupallisesti käytössä biodieselin valmistuksessa, mutta useat yhtiöt pyrkivät sen kaupallistamiseen. (Chisti 2007, 295.) Yhdysvalloissa on useita leväpolttoaineesta kiinnostuneita yrityksiä, esimerkiksi GreenFuel Technologies Corporation (Greenfuel

2008) ja Aurora Biofuels (Aurora Biofuels 2007). Suomessa kiinnostuksensa mikroleivistä tuotettavaan biodieseliin on ilmaissut Neste Oil (Neste Oil 2008). Kuten edellä esitettiin, myös Shell on yhdessä leväteknologiayritys HR BioPetroleumin kanssa perustanut koelaitoksen Havaijille mikrolevän kasvatusta varten (Shell 2007). Vuonna 2007 käynnistetyn Cellana-yhteishankkeen tarkoituksena on kasvattaa luonnonmukaista merimikrolevää avoimissa rengasaltaissa biodieselin tuotantoa varten. Alun perin 2,5 hehtaarin koelaitosta on tarkoituksena kahden vuoden käytön jälkeen laajentaa 1000 hehtaarin laajuiseksi ja myöhemmin 20000 hehtaarin kaupalliseksi tuotantolaitokseksi. (HR BioPetroleum 2008a.)

Levät ovat biodieselin tuotannon kannalta kiinnostavia, koska kokoonsa nähden ne kykenevät tuottamaan huomattavasti enemmän energiasisällöltään rikasta öljyä kuin maalla viljeltävät öljykasvit (Sheehan et al. 1998, 3). Öljypitoisuus vaihtelee eri mikrolevälajien välillä ja se voi parhaimmillaan ylittää 80 % kuivapainosta. 20 - 50 %:n öljypitoisuus on mikroleville melko yleinen. Kaikkien levien tuottama öljy ei sovellu biodieselin valmistukseen, mutta sopivia öljyjä tavataan levistä yleisesti. Korkean öljypitoisuuden lisäksi mikrolevät kasvavat erittäin nopeasti. On yleistä, että kasvatettavan mikroleväbiomassan määrä kaksinkertaistuu vuorokaudessa. (Chisti 2007, 3.)

Taulukossa 2 on vertailtu eri mikrolevälajien tuottamaa öljymäärää energiakasvien tuottamiin öljymääriin litroina hehtaaria kohden. Levälajien öljy- eli triglyseridipitoisuus (TAG) vaihtelee taulukossa 15:stä 70 %:iin kuivapainosta. Tiedot on otettu pohjoisamerikkalaisista lähteistä ja niiden on tarkoitus olla vertailupohjana levästä ja energiakasveista saataville öljymäärille. On huomattava, ettei arvojen voida olettaa pätevän Suomen olosuhteissa. Esimerkiksi rypsiöljyn saanto Suomessa vaihtelee puristusmenetelmästä riippuen välillä $0,4\text{--}0,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Malkki 2006, 28), mikä on noin puolet taulukon mukaisesta saannosta.

Taulukko 2. Energiakasvien ja levien tuottama öljy (Pienkos 2007; Chisti 2007, 296 & Energy Farms Network 2007)

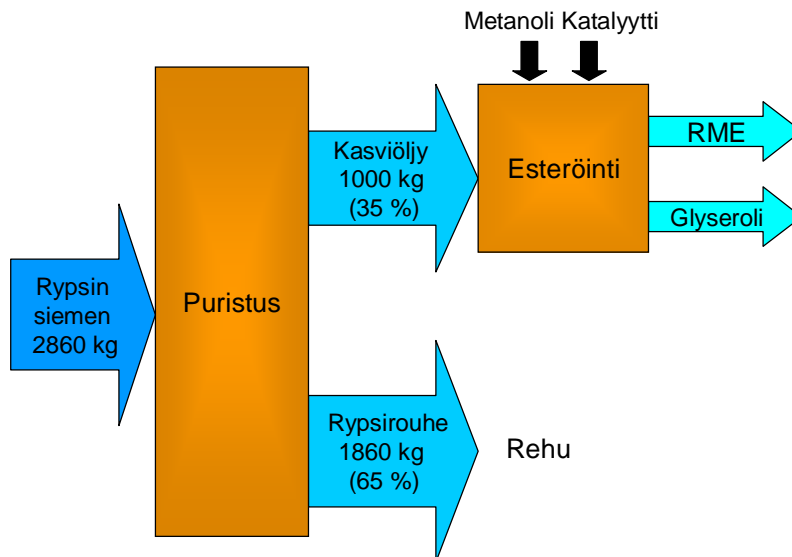
| Energiakasvi | Saatava öljy t ha ⁻¹ a ⁻¹ |
|----------------|---|
| Maissi | 0,1 |
| Puuvilla | 0,3 |
| Soija | 0,4 |
| Sinapinsiemen | 0,5 |
| Auringonkukka | 0,8 |
| Rypsi | 1 |
| Jatropha | 1,6 |
| Kookos | 2,3 |
| Palmu | 5 |
| Levä, 15 % TAG | 9,4 |
| Levä 30 % TAG | 49,3 |
| Levä, 50 % TAG | 78,6 |
| Levä 70 % TAG | 115 |

Levästä saatavat öljymäärät ovat huomattavasti suuremmat kuin energiakasveista saatavat öljymäärät. Esimerkiksi levästä, jonka triglyseridipitoisuus on 30 %, saatava öljymäärä on noin kymmenkertainen verrattuna öljypalmusta saatavan öljyn määrään. Nähdään, että öljysisällöltään 15-prosenttisesta levästä saatava öljymäärä alittaa perinteisistä energiakasveista yhteensä saatavan öljymäärän vain 20 %:lla. Ero öljysisällöltään rikkaampien levälajien ja perinteisten energiakasvien välillä on vielä huomattavampi. Triglyseridipitoisuudeltaan 30-, 50-, ja 70-prosenttisesta levästä saatava öljymäärä ylittää taulukkoarvojen mukaan muiden energiakasvien öljymäärän vastaavasti 314, 560 ja 865 %:lla.

Todellisuudessa levistä saatavan biodieselin valmistuksessa hyödyntämiskelpoisen öljyn määrä riippuu monesta kasvatusteknologiaan, levän korjuuseen ja käsittelyyn liittyvästä tekijästä. Biomassan laajamittaisessa tuotannossa öljyn saannissa voidaan jäädä jälkeen näistä arvoista, mutta levän energiapotentiaalia biodieselin valmistuksessa voidaan siitä huolimatta pitää merkittävänä.

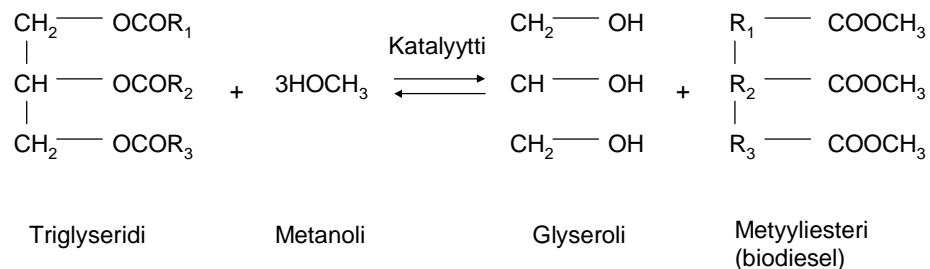
Bioste Oy:n (2006, 11) mukaan öljy irrotetaan nykyään levistä kemikaaliliuotuksella tai mekaanisesti puristamalla. Tulevaisuudessa irrotus voisi olla mahdollista entsyymien avulla. Nykyisin entsyymiliuotus on puristamista 2-3 kertaa kalliimpaa. Kuvassa 14 on esitetty biodieselin perustuotantoprosessi esimerkkinä nykyisin kasviöljylähteenä hyvin

tunnettu rypsi. Prosessi on vastaavanlainen myös esimerkiksi auringonkukalle ja soijalle ja soveltaen myös levälle. (Bioste Oy 2006, 11.)



Kuva 14. Biodieselin tuotanto rypsistä (Bioste Oy 2006, 5)

Puristusprosessissa syntyvä puristusjäte voidaan käyttää esimerkiksi rehuna. Myös levästä jää öljyn erotuksen jälkeen kuivaa ainesta, joka voidaan käyttää rehuna tai esimerkiksi polttaa. Biodieseliä voidaan tuottaa levästä tavanomaisella esteröintiprosessilla (Bioste Oy 2006, 11). Esteröintiprosessia on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Biodieselin valmistus esteröinnillä (Chisti 2007, 295)

Yleiset biodieselin laatuvaatimukset on esitetty eurooppalaisissa standardeissa EN 14214 liikennepolttoaineille ja EN 14213 lämmitysöljylle. Mikrolevien tuottaman öljyn rasvahappokoostumus eroaa monista muista kasviöljyistä siten, että siihen kuuluu runsaasti monityydyttymättömiä rasvahappoja, joissa on yli neljä kaksoissidosta. Rasvahapot ja niiden metyyliesterit, joissa kaksoissidoksia on runsaasti, ovat alttiita hapettumiselle varastoinnin aikana. Kumpikin standardeista rajoittaa kaksoissidosten määrää, minkä vuoksi levädiesel ei todennäköisesti sellaisenaan täytä standardien vaatimuksia. Monityydyttymättömien rasvahappojen ja kaksoissidosten määrää voidaan kuitenkin vähentää öljyn osittaisella katalyyttisellä hydrogenaatiolla. Teknologiaa käytetään nykyisin teollisuudessa yleisesti esimerkiksi elintarvikerasvojen ja -öljyjen kovettamisessa. (Chisti 2007, 300-301.)

5.3 Vety

5.3.1 Viherlevän vedyntuotannon mekanismi

Viherlevät voivat tuottaa anaerobisissa olosuhteissa vetykaasua käyttäen katalyyttinä hydrogenaasientsyymiä. Viherlevän vetymetabolismi-ilmio havaittiin 1940-luvulla ja vedyntuotannossa tutkittuja viherlevälajeja ovat muun muassa *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella fusca* ja *Scenedesmus obliquus*. Viherleväviljelmän on ennen vedyntuotannon aloittamista oltava pimeässä minuuteista muutamaan tuntiin, jotta hydrogenaasientsyymi ja mahdolliset muut vedyntuotantoon vaikuttavat entsyymit aktivoituvat ja vedyn tuottaminen on mahdollista. (Ghirardi et al. 2000, 506.)

Levä tuottaa vetyä fotosynteettisesti eli tarvitsee vedyntuotantoon valoa, hiilidioksidia ja vettä, jota se hajottaa hapeksi ja vedyksi. Hapen tuotanto fotosynteesin aikana kuitenkin vaikeuttaa hydrogenaasientsyymien toimintaa, jolloin vedyn tuotanto saattaa estyä. On havaittu, että levän rikinsaannin rajoittaminen muuttaa leväsolujen aineenvaihduntaa, jolloin hapen tuotanto fotosynteesissä vähenee. Levän toimintaa voidaan siis säädellä rikin määrää muuttamalla – kun rikkiä on saatavilla, levä tuottaa fotosynteesissä normaalisti happea, kun rikkiä ei ole, levä alkaa fotosynteesissä tuottaa

vetyä. Melis & Happe (2001, 740) kuitenkin toteavat, että levän hapen- ja vedyntuotantoa ei pystytä täysin hallitsemaan vielä 60 vuoden tutkimustyön jälkeenkään. (Melis & Happe 2001, 740-742; Ghirardi et al. 2000, 506-507.)

Teoreettinen H₂:n maksimituotanto viherlevästä on noin 200 kg ha⁻¹ d⁻¹. Vedyn lämpöarvo on 120 MJ kg⁻¹ (Boyle (toim.) 2004, 407), jolloin lämpöenergiaa saataisiin hehtaarilta 25 GJ d⁻¹. Laskelmat perustuvat kevätaikaan pilvettömänä päivänä päiväntasaajan seudulla saatavaan maksimisäteilytehoon. Lisäoletus on, että viljelmään tuleva fotosynteesistä aktiivinen säteily absorboituu täydellisesti ja jakautuu tasaisesti. Edellä esitetyt ovat kuitenkin vain teoreettisia arvoja eikä laboratorionkokeilla ole päästy läheskään yhtä hyviin tuloksiin: laskennalliseen kapasiteettiin nähden on saavutettu vain 15–20 %:n vedyntuotto. Todellisuudessa levä ei myöskään pysty hyödyntämään suoran auringonpaisteen säteilytehosta kuin 40 %. Vedyntuotantoa ei myöskään voida pitää yllä jatkuvasti, vaan levä tarvitsee välillä taukoja, jotta voi yhteyttää. Tämän perusteella on arvioitu, että todellisuudessa vetyä saataneen vain noin 10 % teoreettisesta laskennallisesta maksimista. (Melis & Happe 2001, 746-747.)

Levän mahdollisuudet vedyntuotannossa ovat vielä epävarmat ja lisätutkimusta tarvitaan siitä, kuinka levän solutason aineenvaihdunta ja sitä edesauttava perusbiokemia toimivat. Vedyntuotannon mekanismeja ei myöskään vielä täysin tunneta, ja perusteellista tutkimusta tarvitaan siitä mekaniismista, jolla levä tuottaa vetyä, kun sen rikinsaantia rajoitetaan. (Melis & Happe 2001, 747.) Lisäksi vedyn tuotantomäärää on lisättävä vähintään kymmenkertaiseksi nykyisestä ja hydrogenaasientsyymien hapensietokykyä on parannettava, jotta voitaisiin luoda kannattavia kaupallisia sovelluksia. Mahdollisuuksina on tutkia muiden mikrolevälajien käyttämistä vedyntuotannossa tai hyödyntää geenitekniikkaa. (Ghirardi et al. 2000, 510.)

5.3.2 Vetytalous

Nykyisin vetytaloudella tarkoitetaan järjestelmää, jossa uusiutuvilla energianlähteillä, kuten aurinko- tai vesivoimalla tuotettua energiaa varastoidaan vetykaasuun. Vetyä voidaan kehittää elektrolyysillä eli hajottamalla vettä sähkövirran avulla, veden termisellä

hajottamisella tai biomassaa kaasuttamalla. Näin saatu vetykaasu voidaan varastoida esimerkiksi:

- kaasuna painesäiliöissä (noin 300 ilmakehän paineessa)
- absorboimalla se metalliin, jolloin muodostuu metallihybridiä, josta vety voidaan vapauttaa lämmittämällä
- nesteyttämällä (vaatii $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaa ja hyvää eristystä)

Vety voidaan muuttaa sähköksi polttokennon avulla, jonka hyötysuhde on tyypillisesti 40–60 %. Vedyn palamistuotteena syntyy vesihöyryä, joten se on ympäristön kannalta edullinen polttoaine. (Boyle (toim.) 2004, 406-408.)

Vety viedään kuluttajille putkilinjoilla ja sillä on monta käyttötapaa: lentokoneiden ja autojen polttoaineina, sähköntuotannossa ja kotitalouksien energianlähteenä (Boyle (toim.) 2004, 409). Yksittäisissä taloissa vetytaloutta voitaisiin hyödyntää päällystämällä talon katto aurinkopaneeleilla ja hankkimalla tarvittavat laitteistot vedyn kehittämiseen (elektrolyysi), varastointiin (metallihybridi) ja sähkön tuottoon (polttokenno) (Larjola 2008). Uppsalan yliopiston mukaan yksittäisten talojen energiantarve voitaisiin kattaa myös katolla kasvavien leväviljelmien tuottaman vetykaasun avulla (Yle Uutiset 2008).

Vetytalous on mielenkiintoinen tulevaisuuden haaste, johon siirtymiseen levä voi myötävaikuttaa. Jotta vetyä kuitenkin voitaisiin hyödyntää, teknologian on kehityttävä vielä monilla aloilla mukaan lukien sähköntuotanto, maatalous ja autoteollisuus (Melis & Happe 2001, 747). Suomen työ- ja elinkeinoministeriön mukaan vetytalouteen siirtyminen vaatii suuria investointeja. Suurimpana haasteena pidetään laajamittaista vedyn hankintaa ja vetyyn liittyvän infrastruktuurin luomista. TEM ennustaa, että Suomessa voi vuonna 2010 olla muutamia polttokenno- ja vetyautojen koekappaleita, mutta ei ennusta vedyn olevan vielä 2010-luvulla merkittävä polttoainevaihtoehto. (KTM 2006, 49–50.) Vedyn käyttöönotolla on kuitenkin myönteisiä vaikutuksia erityisesti ympäristöön hiilipäästöjen vähentyessä (Melis & Happe 2001, 747).

6 LEVÄBIOMASSAN HYÖDYNTÄMISEN HAASTEET JA MAHDOLLISUUDET SUOMEN OLOSUHTEISSA

Suomessa uusiutuvan energian osuus energian hankinnasta oli 25 % vuonna 2007 (Tilastokeskus 2008), mistä bioenergian osuus oli 84 % vuonna 2006 (Motiva 2008b). Suomi on biomassan käytön edelläkävijä teollisuusmaiden joukossa metsäteollisuuden ansiosta: puun ja puunjalostusteollisuudessa syntyvien puupohjaisten jäteliemien osuus on noin 97,5 % bioenergian koko tuotannosta. Toistaiseksi muiden biomassapohjaisten energianlähteiden eli peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden, biopoltonesteiden ja biokaasun merkitys on ollut Suomessa varsin vähäinen. Merkitys kuitenkin kasvaa jouduttaessa sopeutumaan energia- ja ilmastopolitiikan sopimusten ehtoihin ja väheneviin fossiilisten polttoaineiden varoihin. (Motiva 2008a.)

Suomessa on herännyt kiinnostus myös levään uutena bioenergianlähteenä. Esimerkiksi Suomen ympäristökeskus ja VTT osallistuvat käynnissä olevaan Tekesin BioRefine-hankkeeseen tutkimusprojekteilla aiheesta ”Microbes and algae for biodiesel production” – Mikrobit ja levät biodieselin tuotannossa (Tekes 2008). Bioenergian käyttöön Suomea kannustaa erityisesti sisäinen ilmasto- ja energiapolitiikka, EU:n komission energia- ja ilmastopaketti, kuten aikaisemmin mainittiin, sekä EU:n päästökauppa ja direktiivi biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä (2003/30/EY).

VTT:n raportissa ”CO₂ capture, storage and utilisation in Finland” (Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja hyötykäyttö Suomessa) vuodelta 2002 (Koljonen et al. 2002, 49) todetaan leväviljelmien hyödyllisyys hiilidioksidin sitoijina ja mahdollisuus voimalaitosten häviölämmön käyttäjinä. Raportissa epäillään vahvasti kykyä tuottaa levää suuressa mittakaavassa EU:n lauhkeissa ilmasto-olosuhteissa. Raportissa kuitenkin kannatetaan tutkimusta levän viljelyn yhdistämisestä kasvihuoneisiin – näin leväviljelmät voisivat hyödyntää voimalaitosten häviölämpövirtoja sekä kasvihuoneiden jäteravinteita.

Suomen ilmasto voi asettaa haasteita levän kasvatukselle. Vuodenaikojen vaihtelu aiheuttaa voimakkaita lämpötilan muutoksia. Lisäksi vuoden keskilämpötilassa on eroa Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä. Vuoden keskilämpötila on vuosien 1971-2000 välillä ollut Helsingissä 5,6 °C ja Oulussa 2,4 °C (Ilmatieteen laitos 2008a). Levän kasvatuksessa veden optimilämpötila on noin 15 – 30 °C (Bioste Oy 2006, 11; Chisti 2007, 297). Kuten edellä esitettiin, on tärkeää huolehtia kasvatuslämpötilan säilymisestä kasvatettavalle levälajille optimaalisena, mikä koskee erityisesti avoimia altaita, joista lämpöä haihtuu ilmakehään. Suomessa leviä voitaisiin mahdollisesti viljellä sellu- ja paperitehtaiden yhteydessä, koska tehtaiden jäteveden lämpötila pysyy helposti suuressakin altaassa yli 20 celsiusasteessa. Muita mahdollisia kasvatuspaikkoja voisivat olla esimerkiksi bio-kaasulaitosten mädätealtaat, kaatopaikkojen suotovesialtaat tai kunnallisten jätevedenpuhdistamojen altaat. (Bioste Oy 2006, 11.) Lisäetuna olisi, että levä saa tarvitsemiansa ravinteita, erityisesti typpeä ja fosforia, suoraan jätevedestä (Rodolfi et al. 2008, 2).

Valon saanti on yksi merkittävimmistä leväbiomassan tuotantoon vaikuttavista tekijöistä. Auringon säteilyteho vaihtelee sekä päivittäisen sään (pilvisyyden) että vuodenajan mukaan. Suomessa auringon säteilyteho vaihtelee voimakkaasti kesän ja talven välillä ja on selvää, että esimerkiksi päiväntasaajan seudulla auringonvaloa saadaan huomattavasti enemmän kuin Suomen leveysasteilla. Helsingissä koko vuoden aikana saatava auringon säteilyenergia on noin 1000 kWh m⁻² vastaavan luvun ollessa 2500 kWh m⁻² autiomaassa päiväntasaajan seudulla (Larjola 2008). Lisäksi valon aallonpituus vaikuttaa leväbiomassan tuotantoon. Mikäli luonnonvaloa ei ole saatavilla tarpeeksi, valaistuskustannukset voivat levän laajamittaisessa viljelyssä muodostua merkittäviksi, jolloin levän tuotannon kustannustehokkuutta on luultavasti muilta osin parannettava huomattavasti, jotta viljely kannattaisi. (Rosello Sastre et al. 2007, 128.)

Auringonvalon saatavuus vaikuttaa Suomessa myös levän kuivaustekniikan valintaan. Yleensä levän aurinkokuivaus on edullista (Kadam 2001, 47), mutta Suomen olosuhteissa saatetaan joutua turvautumaan muuhun kuivaustekniikkaan.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Energia- ja ilmastopoliitiikan asettamat tavoitteet ja ilmastonmuutoksen hillitseminen luovat haasteen tuottaa puhtaampaa energiaa entistä tehokkaammin. Leväbiomassan energiakäytön vuosikymmeniä kestänyt tutkimustyö jatkuu eri puolilla maailmaa tavoitteena kehittää energiantuotannossa toimivaa levän massatuotantoteknologiaa ja korjuu- ja jalostustekniikkaa. Levän viljelytekniikan kehittämisessä voidaan käyttää hyväksi kokemusta levän viljelystä kaupallisessa ravinnontuotannossa.

Leväenergian edut innostavat jatkamaan uusien sovellusten kehittämistä ja vanhojen parantamista. Maalla kasvaviin energiakasveihin verrattuna leväbiomassa kasvaa nopeammin ja tuottaa enemmän öljyä. Etuna on lisäksi, että levän viljelyssä voidaan hyödyntää muihin tarkoituksiin käyttökeltontonta maata, jätehiilidioksidivirtoja ja suolaista vettä, mahdollisesti jopa jätevettä. Levän tuotanto energiatarkoituksiin ei myöskään vähennä maapallon ravintovaroja.

Leväbiomassan viljelytekniikkana rengasallas on tällä hetkellä ylivoimainen, mutta fotobioreaktorien, erityisesti putki- ja paneelimallisten jatkuva nopea kehitys voi luoda mahdollisuuksia yhä useampien levälajien tuotantoon tarkasti optimoiduissa olosuhteissa.

Leväenergiatuotannon edellytyksenä on levän kilpailukyvyn parantaminen eli leväpolttoaineen tuottaminen nykyistä edullisemmin. Parannettavaa on polttoainetuotannon jokaisessa vaiheessa: kasvatus- ja korjuutekniikassa ja polttoaineen valmistustekniikoissa. Erityisesti korjuun tehokkuuden kehittäminen on tärkeää, koska levän korjuukustannukset saattavat nykyään muodostaa jopa kolmasosan biomassan tuotannon kustannuksista. Tarkka taloudellinen analyysi on tarpeen ennen kuin voidaan tehdä päätöksiä levän käyttöönotosta energiantuotannossa.

Seuraavassa on listattu leväenergian tuotantoprosessissa erityisesti huomioon otettavia seikkoja ja kasvatusteknologiaan liittyviä haasteita:

- Fotobioreaktorien suunnittelu
- Pääoma- ja käyttökustannukset
- Lämpötilan hallinta
- Valaistusolosuhteiden hallinta ja valon absorptio levään
- Vesikemia, suolainen vesi ja altaista haihtuvan veden korvaaminen
- Hiilidioksidin saatavuus ja kuljetus
- Vaadittavat ravinteet, niiden hankinta ja syöttö kasvatussystemiin
- Lajit, joilla viljely aloitetaan ja mahdollinen geenimuuntelu
- Kasvunopeus
- Öljypitoisuus
- Kilpailevien lajien vastustuskyky
- Ympäristövaikutukset ja niiden hallinta

Nykyään eniten mielenkiintoa herättävä levästä tuotettava polttoaine on biodiesel ja monet tutkimuslaitokset ja yritykset tekevät aihepiiriin liittyvää tutkimustyötä. Levän paremmuus öljyntuotannossa verrattuna perinteisiin öljykasveihin on kiistaton pienilläkin TAG-pitoisuuksilla. Levän triglyseridit muunnetaan polttoaineeksi esteröintiprosessilla, jossa on kiinnitettävä huomiota muun muassa katalysaattorin optimointiin. Leväpolttoaineen jälkikäsitteilyä on myös kehitettävä - leväpolttoaineen ominaisuudet ja erityisesti rasvahappokoostumus on määritettävä ja muokattava standardien mukaisiksi. Lisäksi polttoainetta on käytännössä testattava. (Pienkos 2007.)

Levään liittyy paljon tulevaisuuden teknologiaa, jonka käyttöä tutkitaan ja kehitetään aktiivisesti, mutta jota ei vielä pystytä tehokkaasti soveltamaan käytännössä. Tällaista tekniikkaa on esimerkiksi teollisuuden hiilidioksidipäästöjen talteenotto ja varastointi, jossa kehitystyötä on vielä tehtävä, vaikka tekniikan käytännön sovelluksissa onkin viime aikoina otettu edistysaskeleita. Teollisuuden hiilidioksidipäästöjen hyödyntäminen levän kasvatuksessa on kuitenkin lupaava mahdollisuus, koska tekniikkaa käyttämällä voitaisiin mahdollisesti saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä. Jos levän kasvatuksessa sen sijaan päädytään käyttämään voimalaitosten savukaasuja, on tutkittava, miten eri savukaasukomponentit vaikuttavat levään. Tässä työssä on viitattu tutkimuksiin, joissa voimalaitosten hiilidioksidipäästöjä

on syötetty altaisiin, mutta päästöjä voidaan mahdollisesti käyttää hyödyksi myös fotobioreaktoreissa.

Myös vetytalouteen liittyvässä teknologiassa riittää kehitettävää ennen kuin voidaan luoda jakeluverkostoja tai hyödyntää vetyä laajassa mittakaavassa. Tämän lisäksi vedyn tuotannon mekanismeista leväsoluissa ei vielä täysin tunneta, vaikka joidenkin viherlevälajien kyky tuottaa huomattavia määriä vetykaasua on herättänyt kiinnostusta jo pitkään. Vetypolttoaineen tuottaminen levästä siis lienee lähitulevaisuudessa epätodennäköistä.

Energian tuottaminen levästä vaatii vielä paljon yleistä tutkimustyötä ennen kuin energiakäyttöä voidaan käynnistää missään päin maailmaa. Leväbiomassan suuren mittakaavan tuotanto Suomen olosuhteissa on toistaiseksi lähes täysin tutkimaton vaihtoehto, koska yleensä leväbiomassan tuotantolaitokset sijaitsevat päiväntasaajan seudulla lämpimämmässä ilmastossa.

Leväkasvatuksen näkökulmasta Suomen vaativat ilmasto-olosuhteet, erityisesti lämpötila ja valon määrä, asettavat erityisiä haasteita viljelytekniikalle, jos viljelyä harjoitetaan ulkona. Sisätiloissa viljelyn haittapuolena ovat korkeat valaistuskustannukset. Tutkimusten valossa Suomen olosuhteissa potentiaalia levän viljelyyn voi olla jätevedenkäsittelyssä sellu- ja paperitehtailla, kunnallisissa jätevedenpuhdistamoissa, kaatopaikkojen suotovesialtaissa, biokaasulaitosten mädätealtaissa ja kasvihuoneiden yhteydessä. Nämä ovat kuitenkin vain teoreettisesti mahdollisia vaihtoehtoja ja käytännön tutkimusta aiheesta tarvitaan. Puunjalostusteollisuuden jätevedenkäsittelyn etuna on veden sopiva lämpötila ja sen levälle tarjoamat ravinteet, mutta haasteita voi tuoda viljelytekniikan sovittaminen yhteen vedenkäsittelysystemin kanssa.

Jos kasvatusta edellä mainittujen vaihtoehtotekniikoiden yhteydessä ei Suomessa onnistu, jouduttaneen kasvatuksessa turvautumaan fotobioreaktoreihin, joiden suunnittelua on vielä parannettava, jotta laajamittainen viljely kannattaisi. Tämän vuoksi fotobioreaktortekniikan tutkimus Suomessa voisi olla aiheellista. On myös selvitetävä,

mitä kannattaa viljellä – onko viljelyominaisuuksiltaan jo tunnettujen levälajien viljeleminen järkevää vai löytyykö tuhansien mikrolevälajien joukosta energiantuotannon kannalta parempia vaihtoehtoja? Viljeltävä levälaji on valittava ominaisuuksiensa perusteella olosuhteisiin sopivaksi erityisesti niiltä osin kuin olosuhteita ei kyetä säätelemään.

On selvítettävä mitä kuivaus- ja korjuutekniikkaa on kannattavaa yhdistää mihinkin kasvatusteknologiaan ja millä tavoin levää on käsiteltävä ennen halutun polttoaineen valmistusta. Levän korjuutekniikkaa on parannettava ja sen yhdistämistä valittavaan kasvatusteknologiaan on tutkittava. Suomessa levän aurinkokuivaus ei onnistu, joten on määritettävä levälle muu tehokas ja taloudellisesti kannattava kuivaustekniikka.

Suomessa biodieselin valmistus kasviperäisistä aineksista on toistaiseksi ollut melko vähäistä, mutta levädieselin potentiaaliin uskotaan ympäri maailman. On kuitenkin tutkittava, minkä polttoaineen valmistus levästä on Suomen olosuhteissa kaikkein edullisinta. Biodieselin valmistusprosessissa on määritettävä, millä tavoin öljyn irrotus levästä on kannattavinta: mekaanisella puristuksella, kemikaaliliuotuksella vai entsyymien avulla. Tämän lisäksi öljyn irrotuksessa syntyvälle kuivalle leväainekselle on määritettävä hyödyllisimmät jatkokäyttövaihtoehdot.

LÄHTEET

AlgaeLink. 2008a. Algae growing equipment [verkkosivu]. [Viitattu 27.11.2008].
Saatavissa: <http://www.algaelink.com/algae-growing-equipment.htm>

AlgaeLink. 2008b. Algae solar dryer [verkkosivu]. [Viitattu 27.11.2008]. Saatavissa:
<http://www.algaelink.com/algae-solar-dryer.htm>

Aurora Biofuels. 2007. Home [verkkosivu]. [Viitattu 6.11.2008]. Saatavissa:
<http://www.aurorabiofuels.com/>

Bastianoni Simone et al. 2008. Biofuel Potential Production from the Orbetello Lagoon
Macroalgae: A Comparison with Sunflower Feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 2008
Vol. 32: Nro 7. s. 619-628. ISSN 0961-9534.

Benemann John R. 1995. CO₂ Capture and Biofuels Production with Microalgae.
Eleventh Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors
Conference, Pennsylvania, USA 12.-14.7.1995. s. 199-206.

Berndes Göran, Hoogwijk Monique, van den Broek Richard. 2003. The contribution of
biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and
Bioenergy*, 2003 Vol. 25: Nro 1. s. 1-28. ISSN 0961-9534/03.

Bioste Oy. 2006. Nestemäisten biopolttoaineiden tuottamisen teknisten ja taloudellisten
mahdollisuuksien selvitys [verkkójulkaisu]. Evästä ja Energiaa -hankkeen
toteutettavuusselvityksen loppuraportti. [Viitattu 28.10.2008]. Saatavissa:
<http://www.maaseutukeskus.fi/pk/Loppur.pdf>

Borowitzka Michael. 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes
and fermenters. *Journal of Biotechnology*, 1999 Vol. 70: Nro 1-3. s. 313-321. ISSN
0168-1656/99

Boyle Godfrey (toim.). 2004. Renewable Energy. 2. painos. Iso-Britannia: Oxford University Press & The Open University. 452 s. ISBN 0-19-926178-4.

Chisti Yusuf. 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 2007 Vol. 25: Nro 3. s. 294-306. ISSN 0734-9750.

Earthrise. 2004. Company [verkkosivu]. [Viitattu 29.10.2008]. Saatavissa: <http://www.earthrise.com/company.asp>

Energiäteollisuus. 2008. Hiilidioksidin talteenotto [verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto/uudetenergiantuotantotekniikat/hiilidioksidintalteenotto>

Energy Farms Network. 2007. Vegetable oil yields [verkkosivu]. Päivitetty 9.3.2007. [Viitattu 25.11.2008]. Saatavissa: <http://www.energyfarms.net/node/968>

Ghirardi Maria et al. 2000. Microalgae: A Green Source of Renewable H₂. Trends in Biotechnology, 2000 Vol. 18: Nro 12. s. 506-511. ISSN 0167-7799/00.

GreenFuel. 2008. [GreenFuel Technologies Corporation - yhtiön verkkosivut]. Päivitetty 2008. [Viitattu 21.6.2008]. Saatavissa: http://www.greenfuelonline.com/contact_faq.html#Energy%20Crop%20Comparisons

Hamelinck Carlo, Faaij André. 2006. Outlook for advanced biofuels. Energy Policy, 2006 Vol. 34: Nro 17. s. 3268-3283. ISSN 0301-4215.

HR BioPetroleum. 2008a. Demonstration Facility [verkkosivu]. [Viitattu 26.11.2008]. Saatavissa: <http://www.hrbp.com/Facilities/Demo.html>

HR BioPetroleum. 2008b. HR BioPetroleum Image Library [verkkosivu]. [Viitattu 21.11.2008]. Saatavissa: <http://www.hrbp.com/News/Images.html>

IEA. 2007. World energy outlook 2007. Pariisi: IEA Publications. 663 s. ISBN 978-92-64-02730-5.

IEA. 2008. Key world energy statistics 2008 [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.10.2008]. 78 s. Saatavissa: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/key_stats_2008.pdf

IEA Bioenergy. 2007. Potential Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.6.2008]. 12 s. Saatavissa: <http://www.ieabioenergy.com/MediaItem.aspx?id=5586>

Ilmatieteen laitos. 2008a. Lämpimimmät ja kylmimmät vuodet 1900-luvun alusta [verkkojulkaisu]. Päivitetty 17.1.2008. [Viitattu 10.11.2008]. Saatavissa: http://www.fmi.fi/saa/tilastot_99.html#2

Kadam Kiran. 2001. Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life Cycle Basis [verkkodokumentti]. National Renewable Energy Laboratory. [Viitattu 10.9.2008]. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29417.pdf>

Koljonen Tiina, Siikavirta Hanne, Zevenhoven Ron. 2002. CO₂ Capture, Storage and Utilisation in Finland [verkkodokumentti]. VTT. 96 s. [Viitattu 9.9.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2002/co2capt.pdf>

KTM. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa [verkkodokumentti]. Työryhmän mietintö. 138 s. [Viitattu 14.11.2008]. Saatavissa: [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/b9ce89bb53ac87dbc225660a0022076c/92AA9268109E88ECC2257180002A497E/\\$file/jul11eos_2006_netti.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/b9ce89bb53ac87dbc225660a0022076c/92AA9268109E88ECC2257180002A497E/$file/jul11eos_2006_netti.pdf)

Laatikainen Tuula. 2008. Vattenfall käynnisti hiilidioksidin talteenoton [verkkajulkaisu]. Tekniikka & Talous 23.9.2008. [Viitattu 9.10.2008]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article133527.ece>

Larjola Jaakko. 2008. Luento 6: Aurinkopaneelit, polttokennot, vetytalous. 29 s. Lappeenrannan teknillisen yliopiston Uusiutuva energia-kurssin luentomateriaali keväällä 2008.

Malkki Leena. 2006. Rypsiöljyn metyyliesterin paikallinen valmistus ja käyttö. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, kemian laitos. Jyväskylä. 48 s.

Melis Anastasios, Happe Thomas. 2001. Hydrogen Production. Green Algae as a Source of Energy. *Plant Physiology*, 2001 Vol. 127: Nro 3. s. 740-748. ISSN 0032-0889 (painettu versio) tai ISSN 1532-2548 (verkkoversio).

Moheimani Navid. 2005. The culture of coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation. PhD Doctorate. Murdoch University, Science & Engineering, Biological Sciences & Biotechnology. Australia. 252 s. Saatavissa: <http://www.lib.murdoch.edu.au/adt/browse/view/adt-MU20050901.140745>

Molina Grima E. et al. 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 2003 Vol. 20: Nro 7-8. s. 491-515. ISSN 0734-9750/02.

Moreno-Garrido Ignacio. 2008. Microalgae Immobilization: Current Techniques and Uses. *Bioresource Technology*, 2008 Vol. 99: Nro 10. s. 3956. ISSN 0960-8524.

Motiva. 2008a. Bioenergia [verkkajulkaisu]. Päivitetty 13.8.2008. [Viitattu 6.11.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/toiminta/uusiutuva-energia/bioenergia/>

Motiva. 2008b. Uusiutuvan energian käyttö Suomessa [verkkajulkaisu]. Päivitetty 8.4.2008. [Viitattu 6.11.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/toiminta/uusiutuva-energia/uusiutuvanenergian kayttosuomessa/>

Mäki Timo, Posio Jani. 2004. Savukaasumittaukset. Raportti B No 51. Oulun yliopisto, säätötekniikan laboratorio. Oulu: Oulun yliopistopaino. 14 s. ISBN 951-42-7333-8.

Neste Oil. 2008. Auringonvalosta öljyä [verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.10.2008]. Saatavissa: <http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,88,286,7849,10411>

Ojanen Pekka. 2001. Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät [verkkajulkaisu]. Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 66 s. [Viitattu 16.11.2008]. ISBN 952-11-2153-X (PDF), ISSN 1238-8610. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=74361>

Pienkos Philip. 2007. The Potential for Biofuels from Algae (Algae Biomass Summit San Fransisco 2007) [verkkodokumentti]. National Renewable Energy Laboratory. [Viitattu 10.9.2008]. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42414.pdf>

Rodolfi Liliana et al. 2008. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008 Early View. 13 s. ISSN 0006-3592 (painettu versio) tai ISSN 1097-0290 (verkkoversio).

Rosello Sastre Rosa et al. 2007. Scale-down of microalgae cultivations in tubular photobioreactors – A conceptual approach. *Journal of Biotechnology*, 2007 Vol. 132: Nro 2. s. 127-133. ISSN 0168-1656.

Sheehan John et al. 1998. A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae [verkkodokumentti]. National Renewable Energy Laboratory (Yhdysvallat). [Viitattu 22.6.2008]. Saatavissa: http://www.global-greenhouse-warming.com/support-files/biodiesel_algae.pdf Sheehan

Shell. 2007. Shell and HR Biopetroleum build facility to grow algae for biofuel [verkkojulkaisu]. [Viitattu 6.11.2008]. Saatavissa:

http://www.shell.com/home/content/media/news_and_library/press_releases/2007/biofuels_cellana_11122007.html

Shell. 2008. Image library (Biofuels) [verkkosivu]. [Viitattu 26.11.2008]. Saatavissa:

http://www.shell.com/home/content/media/imagelibrary/image_library.html

Sierra E. et al. 2008. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 2008 Vol. 138, Nro 1-3. s. 136-147. ISSN 1385-8947.

Smeets Edward et al. 2007. A bottom-up assessment and review of global bioenergy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007 Vol. 33, Nro 1. s. 56-106. ISSN 0360-1285.

Suomen ympäristökeskus. 2007a. Levät [verkkojulkaisu]. Päivitetty 12.2.2007. [Viitattu 5.10.2008]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=7536&lan=fi>

Suomen ympäristökeskus. 2007b. Makrolevät [verkkojulkaisu]. Päivitetty 29.10.2007. [Viitattu 2.9.2008]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=101790&lan=fi#a2>

Suomen ympäristökeskus. 2007c. Planktonlevien luokittelu [verkkojulkaisu]. Päivitetty 29.10.2007. [Viitattu 2.9.2008]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=19406&lan=fi>

Tekes. 2008. BioRefine-projektit [verkkosivu]. BioRefine – Uudet biomassatuotteet 2007-2012. Päivitetty 11.1.2008. [Viitattu 15.11.2008]. Saatavissa: <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/BioRefine/fi/projekttilistaus.html>

Tilastokeskus. 2008. Ennakko 2007: Uusiutuvan energian osuus 2007 [verkkajulkaisu]. Päivitetty 19.3.2008. [Viitattu 6.11.2008]. Saatavissa:

http://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2007/04/ehkh_2007_04_2008-03-20_kuv_007.html

Vapo Oy. 2007. Vapoil Process diagram [verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.11.2008]. Saatavissa: http://www.vapo.fi/filebank/3503-vapoil_process_diagram.pdf

Vapo Oy. 2008a. Biomassa esikäsitellään ja kuivataan [verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.11.2008]. Saatavissa:

http://www.vapoil.fi/fi/biodieselin_valmistus/esikasittely_ja_kuivaus/?id=1663

Vapo Oy. 2008b. Biomassa kaasutetaan hapen ja vesihöyryn avulla [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.11.2008]. Saatavissa:

http://www.vapoil.fi/fi/biodieselin_valmistus/kaasutus/?id=1664

Vapo Oy. 2008c. Synteesikaasu on puhdasta häkää ja vetyä [verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.11.2008]. Saatavissa:

http://www.vapoil.fi/fi/biodieselin_valmistus/synteesikaasu/?id=1665

Vergara-Fernández Alberto et al. 2007. Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system. *Biomass and Bioenergy*, 2008 Vol. 32: Nro 4. s. 338-344. ISSN 0961-9534.

Yle Uutiset. 2008. Uppsalassa uskotaan levien tuottamaan energiaan [verkkajulkaisu]. Päivitetty 3.8.2008. [Viitattu 12.9.2008]. Saatavissa:

<http://yle.fi/uutiset/24h/id97872.html>