

MIKROLEVÄN HYÖDYNTÄMINEN SAVUKAASUJEN PUHDISTUKSESSA

Tiivistelmä

Tekijä(t) Juntunen, Teemu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 52	Valmistumisaika Syksy 2020
Työn nimi Mikrolevän hyödynnys savukaasujen puhdistuksessa		
Tutkinto Energia- ja ympäristötekniikka (AMK)		
Tiivistelmä <p>Hiilidioksidin tuotanto maailmassa on lisääntynyt jatkuvan energiantarpeen, sekä teollisen tuotannon vuoksi. Tämän ongelman ratkaisuksi etsitään useita eri keinoja ja yksi mahdollisista keinoista on mikrolevien hyötykäyttö savukaasujen käsittelyssä. Mikrolevät voivat toimia biologisena materiaalina, jolla on suuri kierrätyspotentiaali. Yksi niiden edellytyksistä on korkea kasvuvauhti, sekä ne voivat puhdistaa epäorgaanista hiiltä fotosynteettisessä prosessissa.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin teollisten kaasujen syntyä Suomessa, eri yhdisteiden ominaisuuksia, mikroleviä, kasvatusjärjestelmiä, hyödynnysmahdollisuuksia, sekä potentiaalia käytölle Suomessa.</p> <p>Mikrolevien potentiaalia savukaasujen puhdistuksessa on tutkittu useissa eri kokeissa ympäri maailmaa. Tässä opinnäytetyössä katselmoitiin mikrolevän ominaisuuksia, sekä mahdollisuutta käyttää sitä savukaasujen puhdistuksessa.</p> <p>Koetulokset ovat rohkaisevia, sillä mikroleviä voidaan hyödyntää savukaasujen puhdistuksessa, sekä lopputuotetta on mahdollista hyödyntää jatkojalostuksessa.</p>		
Asiasanat Mikrolevät, savukaasut, leväkasvatusjärjestelmät, biopolttoaineet, mikrolevän hyödyntäminen, teollisten kaasujen käsittely.		

Abstract

Author(s) Juntunen Teemu	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2020
	Number of pages 52	
Title of publication Microalgae usage in flue gas cleansing		
Name of Degree Energy and environmental engineering (AMK)		
Abstract <p>Production of carbon dioxide globally has increased through continuous need of electricity and industrial production. To solve this problem there is a search for multiple different solutions and one of the possibilities is to use microalgae as a material to utilize in flue gas treatment. Microalgae are a biological material which has a great recycling potential. One of their strengths is its high growth rate and it can clean inorganic carbon in a photosynthetic process.</p> <p>This thesis discusses the production of flue gas in Finland, characteristics of different gas compounds and its effects in microalgae, microalgae, growing systems, utilization potential and the potential of usage in Finland.</p> <p>The potential of microalgae in cleansing of flue gas has been researched in various different experiments around the world. In this thesis the potential to use microalgae in the cleansing of flue gas is being viewed.</p> <p>The results are encouraging, since microalgae can be potentially used in the cleansing of flue gas and the end product is possible to be used forth.</p>		
Keywords Microalgae, flue gas, microalgae growing systems, biofuels, utilization of microalgae, handling of flue gas		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	TEOLLISTEN KAASUJEN- JA VESIEN SYNTY.....	2
2.1	Yleistä.....	2
2.1.1	Yhdisteiden ominaisuuksia.....	3
2.2	Teolliset päästöt Suomessa.....	4
2.3	Savukaasujen puhdistuksen lainsäädännölliset vaatimukset.....	8
2.3.1	Polttolaitosten vaatimukset rikkioksidin ja typpioksidin puhdistukseen.....	8
2.3.2	Jätteenpolttolaitosten raja-arvot.....	9
3	MIKROLEVÄT.....	10
3.1	Mikrolevät prosesseissa.....	12
3.2	Mikrolevien kasvatusvaatimukset.....	13
3.2.1	Vaatimukset savukaasuja puhdistavalle leväprosessille.....	13
3.3	Valaistuksen vaikutus levän kasvuun.....	16
3.3.1	Valon intensiteetin vaikutus biomassan määrään.....	16
3.3.2	Valon intensiteetin vaikutus rasvojen tuotantoon.....	16
3.3.3	Valaistuksen vaikutus mikrolevän typen hyödynnykselle.....	17
4	ESIMERKKIJÄRJESTELMIÄ.....	19
4.1	Suljetut järjestelmät.....	19
4.1.1	Putkibioreaktorit.....	19
4.1.2	Horisontaaliset putkibioreaktorit.....	20
4.1.3	Paneelibioreaktorit.....	21
4.1.4	Säiliöbioreaktorit.....	23
4.2	Avoimet bioreaktorit.....	24
4.2.1	Avoimen kasvatusjärjestelmän koe.....	25
4.3	Kasvatusjärjestelmien vertailua.....	30
5	MIKROLEVÄN KERÄYS, PROSESSOINTI JA HYÖDYNYS.....	33
5.1	Menetelmien vertailua.....	34
5.2	Kuivaus.....	34
5.3	Levän erotus ja puhdistus.....	35
5.4	Mikrolevät kaupallisessa käytössä.....	35
5.5	Mikrolevät ihmisravintona.....	37
5.6	Mikrolevät kalojen tai karjan ravintona.....	37
5.7	Mikrolevät kosmetiikassa.....	38

5.8	Mikrolevät lääketieteessä.....	38
5.9	Mikrolevien hyötykäyttö biodieselin tuotannossa.....	38
5.10	Mikrolevän hyödynnys bioetanolin tuotannossa	39
5.11	Mikrolevän käyttö lannoitteena.....	39
5.12	Päätelmiä.....	40
6	LEVÄLAJIEN MENESTYMINEN SAVUKAASUISSA	41
7	LEVIEN HYÖDYNNESEDELLYTYKSET SUOMESSA	45
7.1	Suomen sääolosuhteen vaikutukset järjestelmiin	45
7.2	Savukaasut Suomessa	47
7.2.1	Hakkeenpolton savukaasut.....	48
7.2.2	Biopolttoaineiden savukaasut	49
7.3	Levälajin valinta	50
7.4	Mahdollisuudet Suomessa	51
8	YHTEENVETO	52
	LÄHTEET	53
	LIITTEET.....	57

1 JOHDANTO

Savukaasut energiantuotannosta ja teollisuudesta tuottavat valtavan määrän kasvihuonepäästöjä. Yksi suurimmista kasvihuonekaasuista on hiilidioksidi, jonka arvioidaan olevan 10-25% päästöjen määrästä. Hiilidioksidi tuottaa noin 52% ilmaston lämpenemisestä ja tämän odotetaan kasvavan jatkuvan hiilidioksidin tuotannon, sekä sen kasvavan tuotannon määrän vuoksi. (Zhang 2015, 10.) Hiilidioksidin vähentäminen on haastavaa jatkuvan yhteiskunnallisen tarpeen takia, jonka vuoksi eri teollisuuden aloilla etsitään ratkaisuja hiilidioksidin käsittelyyn.

Yksi mahdollinen ratkaisu käsittelyyn on mikrolevien hyödynnyks. Osa mikrolevistä pystyy kasvamaan korkeissa hiilidioksidipitoisuuksissa (5-20%), sekä ne pystyvät yhteyttämään hyödyntäen epäorgaanista hiiltä. Mikrolevät ovat komplekseja organismeja, joiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti eri levälajien välillä.

Savukaasuissa esiintyy useita eri yhdisteitä, sekä pienhiukkasia, joilla voi olla ratkaiseva merkitys levän kasvulle. Suuri osa levälajeista ei pysty yhteyttämään korkeissa hiilidioksidipitoisuuksissa, vaan tarvitsevat <10% pitoisuuden, joka estää osan lajeista hyödynnyksen käsittelyssä. (Zhang 2015, 11.)

Mikrolevillä on suuri kaupallinen potentiaali, sekä niistä voidaan jalostaa useita eri tuotteita. Tämä teknologia on nouseva trendi ja tutkimuksia tehdään useita ympäri maailmaa. Kasvatusjärjestelmiä on useita erilaisia ja niiden soveltuvuutta tutkitaan savukaasujen käsittelyssä ja mikrolevän kasvatuksessa.

Tässä työssä käsitellään eri yhdisteiden vaikutusta levän kasvuun, eri kasvatusjärjestelmiä, kaupallista potentiaalia, sekä Suomen olosuhteita ja savukaasuja levänkasvatukselle.

2 TEOLLISTEN KAASUJEN- JA VESIEN SYNTY

2.1 Yleistä

Jotta globaalit ilmastonsuojelutavoitteet saavutetaan; on päästävä tavoitteisiin, jotka koskevat hiilidioksidin uusiokäyttöä ja hyödyntämistä. Euroopan Unionin alueella sähkö-, sekä teollisuustuotanto tuottaa puolet kasvihuonepäästöistä. Sementin- ja teräksentuotanto, öljyn jalostus, sekä kemialliset prosessit vaativat suuria määriä polttoaineita, ja tämä tuottaa paljon hiilidioksidia, sekä muita yhdisteitä.

Vuonna 2012 hiilidioksidipäästöt energiantuotannosta olivat yhteensä 3,44 gigatonnia (Gt). Eniten hiilidioksidipäästöjä oli Saksassa, Italiassa, Ranskassa ja Puolassa (Dietmar S, Karin A, Katrin B, Stefan B, Laura E, Andrea E, Manfred F, Justus G, Samuel H, Frank M, Karen P, Andreas P, Katja P, Clemens S, Julia T & Peter V. 2015, 4).

Yleisimmät yhdisteet, joita on savukaasuissa ovat

- typpi (N_2)
- hiilidioksidi (CO_2)
- vesihöyry (H_2O)
- happi (O_2)
- hiilimonoksidi (CO)
- typpioksidit (NO, NO_2 , NO_x)
- rikkidioksidit (SO_2)
- rikkivety (H_2S)
- hiilivedyt (C, H tai HC)
- vetysyanidi (HCN)
- ammoniakki (NH_3)
- vetyhalidit (HCL, HF)
- kiinteät aineet, kuten pöly. (Burkart 2012, 10).

2.1.1 Yhdisteiden ominaisuuksia

Typpi (N_2)

Typpi on yleisin ilmassa oleva alkuaine. Se on hajuton, väritön ja mauton kaasu, jota tulee mukaan prosessiin virtaavan polttoilman mukana. Pieni osa typestä sitoutuu polttoaineesta tulevien aineiden kanssa, jolloin se voi muodostaa haitallisia typpioksideja.

Hiilidioksidi (CO_2)

Hiilidioksidi on väritön ja hajuton kaasu, jolla on hieman hapan maku. Sitä tuotetaan kaikissa polttoprosesseissa. Se lisää huomattavasti kasvihuoneilmiötä sen lämmönsäteilyn vuoksi. Ympäröivässä ilmassa sitä on noin 0,03%, jos pitoisuus ylittää yli 15% tämä aiheuttaa lähes välittömän tajuttomuuden.

Vesihöyry (H_2O)

Polttoaineessa oleva vety reagoi hapen kanssa ja muodostaa vettä. Tämä joko poistuu korkeammissa lämpötiloissa kosteutena savukaasujen mukana, tai tiivistyy matalamassa lämpötilassa.

Happi (O_2)

Happea mitataan polttolaitoksissa, jotta voidaan nähdä kuinka tehokkaasti palamisprosessi käyttää happea.

Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidi on hajuton, väritön ja myrkyllinen kaasu. Ulkotiloissa hiilimonoksidi ei ole vaarallista, sillä se reagoi hyvin nopeasti ympäröivän ilman kanssa muodostaen hiilidioksidia. Sisä- ja suljetuissa tiloissa se on hyvinkin vaarallista. Jo 700ppm pitoisuudet ilmassa voivat aiheuttaa kuoleman muutaman tunnin altistuksen jälkeen.

Typpioksidit (NO, NO_2 , NO_x)

Typpioksidit muodostuvat korkeissa lämpötiloissa, kun polttoaine ja polttoilma reagoivat keskenään. Typpioksidit ovat vaarallisia ihmiselle, sekä ympäristölle. Ihmiselle typpioksidit voivat aiheuttaa keuhkovaurioita, jonka vuoksi tyypeä pyritään puhdistamaan savukaasuista mahdollisimman tehokkaasti.

Rikkidioksidit (SO_2)

Rikkidioksidi on väritön, myrkyllinen kaasu, jolla on hyvin voimakas pistävä haju. Polttolaitoksilla pidetään yli 5 ppm pitoisuutta vaarallisena. Reagoidessaan veden tai tiivistyessään rikkioksidi muodostaa rikkihappoa, joka voi sataa alas maahan vesisateiden mukana. Savukaasuista pyritään puhdistamaan rikkioksidit mahdollisimman tehokkaasti.

Rikkivety (H_2S)

Rikkivety on hyvin voimakkaan hajuinen, myrkyllinen kaasu. Sitä esiintyy maakaasussa, ja jotkut teollisuusprosessit voivat myös tuottaa rikkivetyä. Yleensä rikkivety poistetaan katalyyttien avulla, jolloin se muutetaan rikkidioksidiksi.

Hiilivedyt (C, H tai HC)

Hiilivedyt ovat laaja kirjo erilaisia kemiallisia yhdisteitä, jotka koostuvat vedystä ja hiilestä. (C_xH_y) Nämä ovat orgaanisen kemian tärkeimpiä yhdisteitä. Näitä esiintyy luonnossa raakaöljyssä, maakaasussa ja hiilessä. Näistä voidaan tuottaa esimerkiksi liuottimia, muoveja ja polttoaineita. Hiilivety-yhdisteitä on tuhansia erilaisia, joista osa on karsinogeenisiä.

Vetysyanidi (HCN)

Vetysyanidi on hyvin myrkyllinen neste, jonka kiehumispiste on ainoastaan 25,6 °C.

Ammoniakki (NH_3)

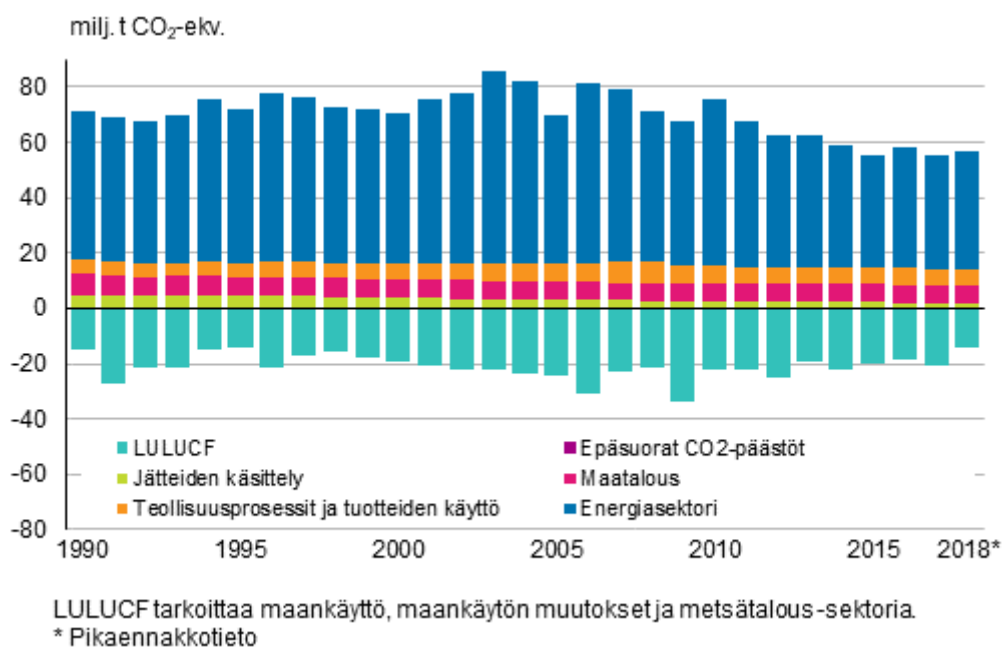
Ammoniakkia käytetään usein typpiyhdisteiden poistoon. Tätä syötetään savukaasuihin, jolloin typpiyhdisteet hajoavat ja tällöin usein syntyy typpeä ja vettä.

Kiinteät aineet

Pölyä syntyy polttoprosessin seurauksena. Näissä on usein eri silikoniyhdisteitä, alumiinia, kalsiumia, hiiltä ja eri sulfaatteja. Nämä ovat vaarallisia, sillä ne sisältävät useita myrkyllisiä ja karsinogeenisiä yhdisteitä. (Burkart K. 2012, 16-19).

2.2 Teolliset päästöt Suomessa

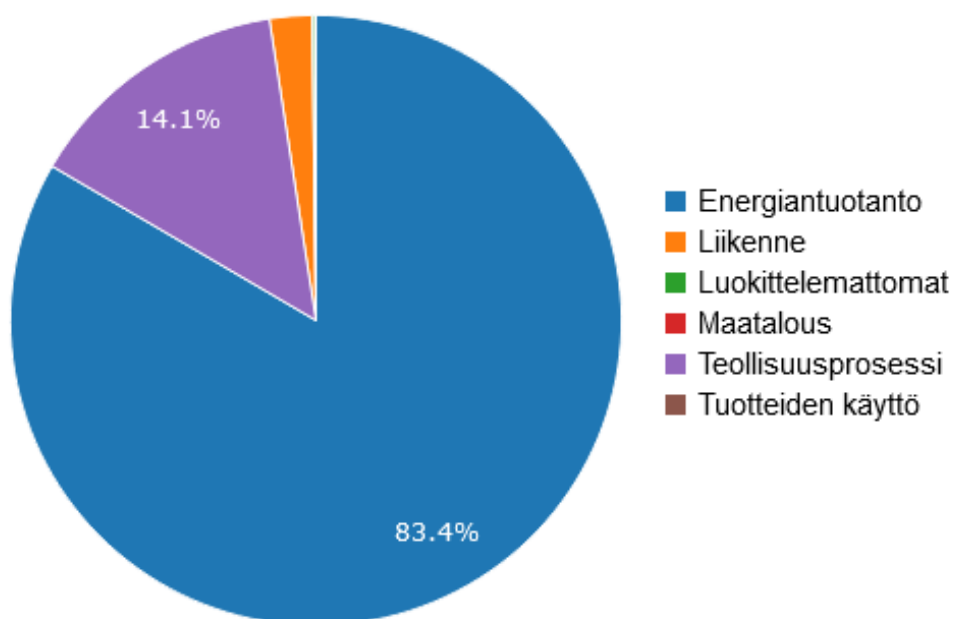
Vuonna 2018 Suomessa tuotettiin kasvihuonekaasuja 56,5 milj. tonnia hiilidioksidiekvivalenttitonnia (milj. t. CO₂-ekv.). Tähän lukemaan ei ole otettu mukaan metsätalouden tuottamia poistumia. Kokonaispäästöistä 75% on peräisin energiantuotannosta (polttoaineiden käyttö ja haihtumapäästöt), teollisuusprosesseista, sekä tuotteista osuus on 10%. Maatalous 11%, jätteiden käsittely 3%. Kokonaispäästöistä 82% on hiilidioksidia, 8% metaania, 8% dityppioksidia ja 2% muita kaasuja. (Tilastokeskus 2018.)



Kuva 1. Kasvihuonepäästöt sekä poistumat Suomessa 2018 (LÄHDE: Suomen kasvihuonekaasupäästöt, 2018, Tilastokeskus).

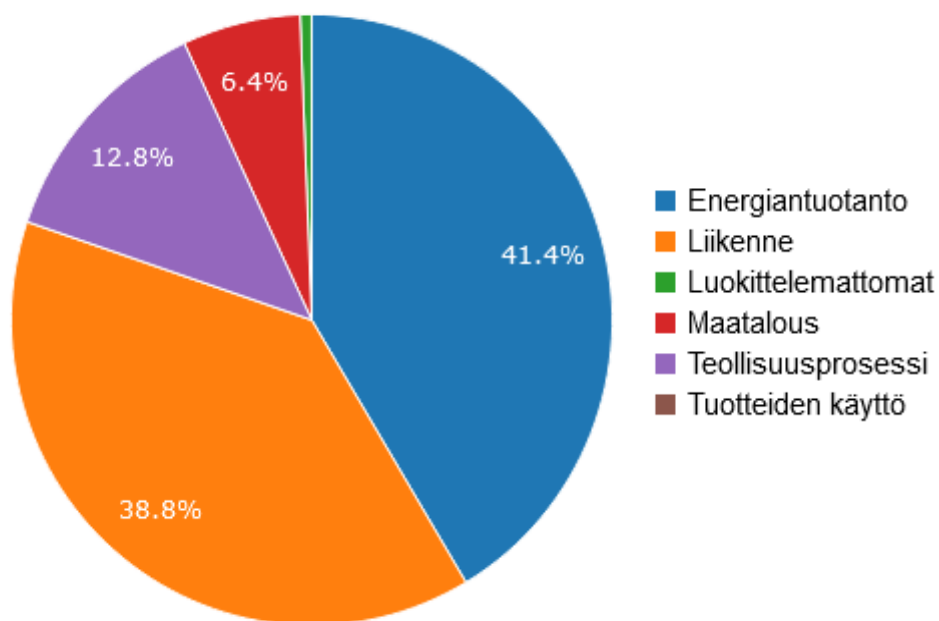
Kuvan 3 mukaan vuonna 2017 tehdyn mittauksien mukaan typpioksidipäästöistä 54,2% syntyy teollisuudessa, sekä energiantuotannossa. Kuvan 2 mukaan rikkioksidipäästöistä 87,5% syntyy energiantuotannossa, sekä teollisuusprosesseissa. (Ympäristö.fi 2017). Kyseisiä kuvia tarkastellessa voidaan todeta, että energiantuotanto on teollisuuden ohella suurin rikin oksidien tuottaja. Typen oksideja tuotetaan myös liikenteessä huomattava määrä (38,8%).

Rikin oksidit-päästöt vuodelle 2017 (t)



KUVA2: Rikkioksidipäästöt vuodelta 2017 (LÄHDE: Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa, 2017, Ympäristö.fi).

Typen oksidit-päästöt vuodelle 2017 (t)



KUVA3: Typpioksidipäästöt vuodelta 2017 (LÄHDE: Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa, 2017, Ympäristö.fi).

2.3 Savukaasujen puhdistuksen lainsäädännölliset vaatimukset

Savukaasujen puhdistukseen tarvittavan vähimmäistason määrää Euroopan Unionin direktiivi (2010/75/EU), sekä jätteenpolton savukaasujen asetus, joka on valtioneuvoston antama asetus (151/2013). Prosesseille annetaan suoritusarvojen ja raja-arvojen välille vaihtelumarginaali, jonka vuoksi tavoitteena on asetuksen arvoja puhtaampi puhdistus. (Suomen kiertovoima ry. 2013).

Hiilidioksidille ei ole erillistä puhdistusvaatimusta, vaan yritykset joutuvat maksamaan erillistä veroa EU:lle niiden tuottamista hiilidioksidipäästöistä. Tässä osiossa keskitytään typpi- sekä rikki-päästöihin. Hiilimonoksidille on myös puhdistusvaatimuksensa, sillä vapautuessaan se tuottaa ympäröivän ilman kanssa hiilidioksidia.

Kun prosessia suunnitellaan, niin siihen vaikuttaa poltettavan jätteen laatu, sekä polttoprosessi ja vaadittava kaasujen puhtaustaso. Puhdistusvaiheita ja niihin toisiinsa kytkettyjä vaihteita on lukuisia erilaisia. Nämä jaetaan kolmeen eri ryhmään: Märkään-, puoli-kuivaan- ja kuivaan puhdistusprosessiin. (Suomen kiertovoima ry. 2013)

2.3.1 Polttolaitosten vaatimukset rikkioksidin ja typpioksidin puhdistukseen

Rikkidioksidin raja-arvot (mg/Nm^3), joissa käytetään kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita. Tässä taulukoinnissa ei oteta huomioon kaasuturbiineja tai kaasumoottoreita.

Nimellinen kokonais-lämpöteho (MW)	Kivihiili ja ruskohiili ja muut kiinteät polttoaineet	Biomassa	Turve	Nestemäiset polttoaineet
50–100	400	200	300	350
100–300	250	200	300	250
> 300	200	200	200	200

KUVA4: Rikkidioksidipäästöjen raja-arvoja (mg/Nm^3) (LÄHDE: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, 2010, EUR-Lex).

Näissä vaatimuksissa on eroja riippuen laitoksen valmistusajankohdasta. Jos laitos on valmistunut ennen 27.11.2002, niin laitosten päästövaatimukseen sovelletaan vanhempaa lainsäädäntöä, joka ei ole vaatimuksiltaan yhtä vaativa. (EUR-Lex. 2010)

Typpioksidipäästöjen raja-arvot (mg/Nm^3), joissa käytetään kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita. Tässä taulukoinnissa ei oteta huomioon kaasuturbiineja tai kaasumoottoreita.

Nimellinen kokonaislämpö-teho (MW)	Kivihiili ja ruskohiili ja muut kiinteät polttoaineet	Biomassa ja turve	Nestemäiset polttoaineet
50–100	300 Ruskohiilen pölypolton osalta 450	300	450
100–300	200	250	200 (1)
> 300	200	200	150 (1)

KUVA5: Typpioksidipäästöjen raja-arvoja (mg/Nm^3) (LÄHDE: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, 2010, EUR-Lex).

2.3.2 Jätteenpolttolaitosten raja-arvot

Yhdyskuntajätettä tai vaarallista jätettä polttava voimalaitos täytyy suunnitella, rakentaa, sekä varustaa siten, että savukaasun epäpuhtauspitoisuudet eivät ylitä raja-arvoja. Nämä raja-arvot määrittelee valtioneuvoston asetus (151/2013).

Jätevoimalaitosten toimintatasot (Novox, 2006)		
Päästö/pitoisuus (mg/Nm^3 , O ₂ 11 %)	BAT-taso (Vuorokausikeskiarvo)	Asetuksen raja-arvo (Vuorokausikeskiarvo)
Hiukkasten kokonaismäärä	1-5	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	1-10	10
Suolahappo (HCl)	1-8	10
Fluorivety (HF)	< 1	1
Rikkidioksidi (SO ₂)	1-40	50
NO _x (ei katalyyttiä)	120-180	200
NO _x (katalyyttiä käyttäen)	40-100	200
Hiilimonoksidi (CO)	5-30	50
Elohopea (Hg)	0,001–0,02	0,05
Kadmium ja tallium yhteensä (Cd+Tl)	0,005–0,05 (yksittäismittaukset)	0,05 (max. 8 h keskiarvo)
Muut raskasmetallit yhteensä (Sb+As+Pb+Cr+Co+Mn+Ni+V)	0,005–0,5 (yksittäismittaukset)	0,5 (max. 8 h keskiarvo)
Dioksiinit ja furaanit, ngTEQ/Nm ³	0,01–0,1 (yksittäismittaukset)	0,1 (yksittäismittaukset)

KUVA6: Jätteenpolttolaitosten ilmapäästöjen raja-arvoja. (LÄHDE: Ilmapäästöjen raja-arvot, 2013, Jätelaitosyhdistys).

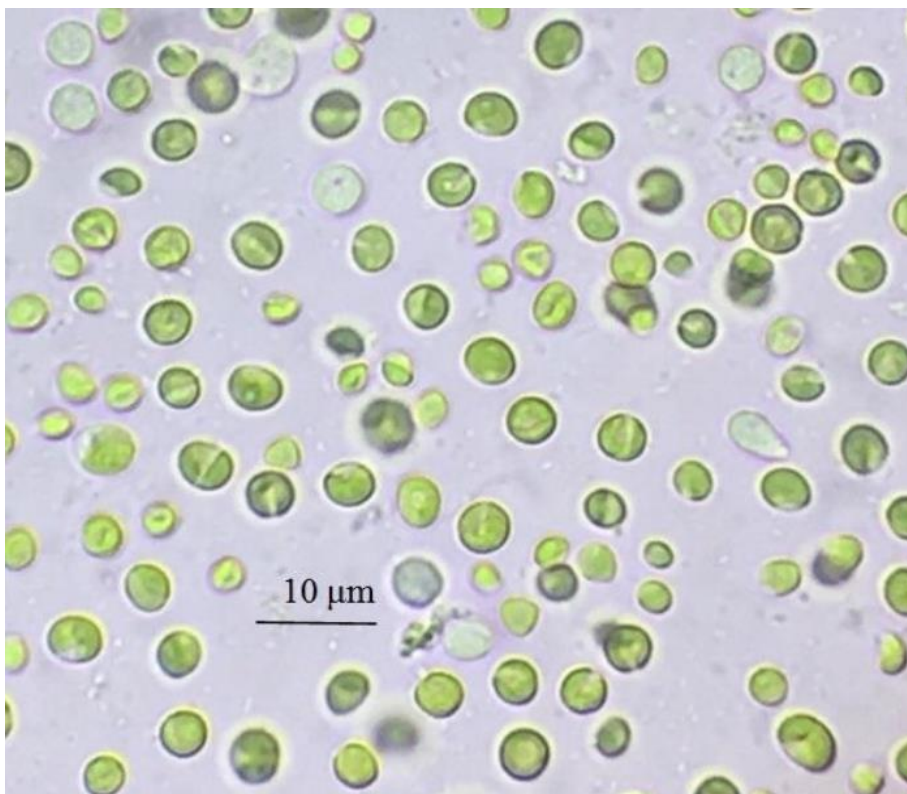
3 MIKROLEVÄT

3.1 Mikrolevien määritelmää

Mikrolevät ja syanobakteerit eli sinilevät ovat eliöitä, jotka kykenevät yhteyttämään. Mikrolevät ovat yksisoluisia, tuottavat happea, ovat mikroskooppisen pieniä ja muodostavat kasvustoja. Niitä kasvaa sekä makeissa, että suolaisissa vesissä. (Lunkka-Hytönen, Loh-tander-Buckbee & Ruohonen-Lehto, 2013, 7-9).

Mikroleviä pidetään ensimmäisinä hapen tuottajina (O_2). Niiden olemassaolo voidaan jäl-jittää yli kolmen miljardin vuoden päähän, ne ovat muuttaneet atmosfääriä kasveille, sekä eläimille sitomalla hiilidioksidia ja vapauttamalla happea. Mikrolevien selviytymismekanismit ovat adaptoituneet kaikkiin ympäristöihin, niitä löytyy erittäin suolaisista vesistä, jäädästä, luolista ja niillä on symbioottisia suhteita parasitteina jopa ihmisissä. Ne pystyvät tuotta-maan kovan pinnan, jotta ne selviytyvät esimerkiksi seinillä tai puiden pinnoilla, jotkut mik-rolevät selviävät erittäin alhaisista ja toiset hyvin korkeista lämpötiloista. (Sihen T, Filipa L, Rayen F, Didier D & Dominique P, 2014, 4-5).

Leviä pystytään hyödyntämään myös ravinteina, sillä ne ovat hiilihydraattien, lipidin (ras-vojen) ja proteiinien lähde. Levillä on tutkitusti erittäin hyvät edellytykset hiilidioksidin sito-miseen.



KUVA7: *Chlorella Vulgaris*. LÄHDE: (R Ramaraj, Y Unpaprom, N Dussadee, 2016, Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification).

Levät jaetaan 5 eri lajiin:

- Vihreisiin leviin (6000-8000 lajia)
- Punaisiin leviin (4000-5000 lajia)
- Ruskeisiin leviin (1500-2000 lajia)
- Sinivihreisiin leviin
- Piileviin (12000 lajia)

Vihreät levät sisältävät paljon hiilihydraatteja ja rasvaa, sinivihreitä leviä kasvaa lähestulkoon kaikkialla märissä maastoissa ja ne sitovat hyvin typpeä ja hiilidioksidia, sekä piilevät ovat hyviä rasvan lähteitä. (G Huang, F Chen, Y Kuang, H He, A Qin, 2015, 2).

Leville on useita eri käyttökohteita. Suurimmat kohteet ovat biopolttoaineiden tuotanto, eläimille käytettävä ruoka (ihminen tai kala/karja), leviä käytetään myös terveystuotteena sillä ne sisältävät Omega-3 -rasvahappoja. Mikroleviä voidaan hyödyntää myös biomassasta tuotettujen muovien tuotannossa. (C Barkan, K DeLuca, M Preston, 2018, 8).

3.2 Mikrolevät prosesseissa

Leviä pidetään hyvinä biologisina hiilidioksidin puhdistajina, sillä se on ympäristöystävällistä, sekä se on hyvä kestävän kehityksen kannalta. Mikrolevien käytöllä on muitakin etuja. Levillä on hyvin suuri tehokkuus fotosynteesissä verrattuna maakasveihin, ne eivät pelkästään käytä hiilidioksidia, vaan ne ovat hyvin energiarikkaita. Niissä on rasvoja, hiilihydraatteja ja proteiineja. Yleisesti koetulokset ovat olleet lupaavia mikrolevien käytölle puhdistuksessa. (G Huang ym. 2015, 3).

Jotta löydettäisiin ideaaliset mikrolevälajit savukaasujen puhdistusta varten, niin niillä täytyy olla seuraavia ominaisuuksia:

- nopea kasvu
- korkea sietokyky hiilidioksidille ja myrkyllisille yhdisteille
- täytyy kestää korkeita lämpötiloja
- eivät saa olla herkkiä ravintoaineiden niukkuudelle ja pH:n muutoksille.

Lupaavimmat mikrolevälajit savukaasujen puhdistukselle ovat *Scenedesmus dimorphus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris* ja *Nannochloropsis oculata*.

Esimerkiksi *Chlorella sp.* levät ovat ominaisuuksiltaan hyviä ja voivat kasvaa hyvin savukaasujen vaikutuksen alaisena. Taiwanissa tehdyssä tutkimuksessa on kyseistä levälajia kasvatettu kivihielestä, sekä terästehtaista syntyvien savukaasujen alaisuudessa. On huomattu, että kyseinen levälaji puhdistaa tehokkaasti CO₂, NO_x ja SO₂ -yhdisteitä. (G Huang ym 2015, 3-4).

Levää voidaan kasvattaa käyttäen eri metodeita, sekä erilaisissa olosuhteissa. Levät tarvitsevat valoa, jotta ne voivat yhteyttää hyödyntäen vettä, sekä hiilidioksidia. Mikrolevät tarvitsevat myös typpeä ja rikkiä niiden pääasiallisina ravinteina. Makroravinteina levät tarvitsevat natriumia, magnesiumia, kalsiumia ja kaliumia. Mikroravinteina ne tarvitsevat molybdeenä, mangaania, booria, kuparia, rautaa ja sinkkiä. Yksi hyvistä kasvualoista mikroleville onkin jätevesi. (Muhammad I-K ym. 2018, 3-4).

Yksi tärkeimpiä parametrejä levänkasvatuksessa on, millaista bioreaktoria siinä käytetään. Reaktori täytyy suunnitella levälajikohtaisesti, sekä sen mukaan mitä levällä yritetään puhdistaa. Laajemman skaalan projekteissa voidaan levää kasvattaa lammissa, jotka ovat suhteellisen halpoja, mutta ongelmana näissä on kasvualustan kontaminointi. Toiset bioreaktorit ovat suljettuja faaseja, joissa kasvualustan homogeenisyyttä on helpompi hallita, mutta nämä ovat kustannuksellisesti kalliimpia. Joidenkin mikrolevien on todettu kasvavan

hyvin heterogeenisissäkin olosuhteissa. Jotta mikrolevien hyödynnyksestä voitaisiin puhua tarpeeksi kustannustehokkaana olisi saavutettava 30 g/m² kasvu. Mikrolevien kasvun onnistuminen riippuu ravinteiden saannista, lämpötilasta, pH:sta, epäorgaanisesta hiilestä, hapesta, valon määrästä ja hiilidioksidista. Muut tärkeät osa-alueet kasvatusta varten ovat biomassan sekoittaminen, reaktorin syvyys ja leveys, biomassan keräämisen aikaväli ja kasvualustan laimennus. (Muhammad I-K ym. 2018, 5).

3.3 Mikrolevien kasvatusvaatimukset

Mikrolevien kasvatus on haastavaa. Levien kasvu ja ekologia on hyvin monimutkaista. Tietoa levien hyödynnyksestä on runsaasti, sekä uusia projekteja on jatkuvasti. Levien geenien sekvensoinnilla pyritään lisäämään ymmärrystä, sekä pyritään hallitsemaan mikrolevien käyttöä. Yksi suurimmista ongelmista on levien huono kasvu, jos ne tuottavat suuria määriä rasvoja. Rasvoja voidaan taas hyödyntää biopolttoaineiden tuotannossa, joka onkin yksi arvokkaimmista käyttökohteista mikroleville. Jotta saavutetaan suuri rasvantuotanto, niin levää täytyy kasvattaa vähätyppisessä ympäristössä, joka taas hidastaa merkittävästi levien kasvua. (C Barkan ym. 2018, 9).

Tällä hetkellä levien keräys, jälkikäsittely ja jalostus on kallista, sekä energiaa kuluttavaa. Useissa tapauksissa jälkikäsittely, kuten kuivaaminen voi olla hintavinta levien käsittelyssä, jopa niin kallista, että levien käyttöönotto hylätään, sillä kustannukset nousevat liian suuriksi. Mikrolevien hyödynnyksessä on kuitenkin suhteellisen uusi insinööriyön, sekä tutkimusten kohde. Tämän vuoksi alalla on paljon tilaa uusille prosesseille, jotka edesauttavat kustannusten laskua. (Slade 2013, 30-31).

Hiilidioksidin, hapen, levän sekoittaminen, lämpötila, pH, valonsaanti ja ravinteiden määrän täytyy olla tiukasti kontrolloitua, kun levää kasvatetaan jos halutaan saavuttaa mahdollisimman suuri tuottavuus. Tästä tulee erityisen haastavaa, kun savukaasuja käytetään kasvatuksessa. Bioreaktorin sekoittaessa levää on äärimmäisen tärkeää turvata levän valonsaanti, kun suunnitellaan prosessia. Koska levän hyödyntäminen on alkuvaiheessa alana, niin vertailukohteita on myös harvassa. Tästä huolimatta useat tutkimukset laboratoriossa, sekä suuren kokoluokan prosesseissa ovat osoittaneet hyviä koetuloksia. (C Barkan, ym. 2018, 30-31).

3.3.1 Vaatimukset savukaasuja puhdistavalle leväprosessille

Ideaalisessa prosessissa bioreaktoriin johdetaan 10% CO₂ v/v savukaasua hiilikäyttöisestä voimalaitoksesta. Savukaasua johdetaan noin 200kg/pv. 24 tunnin aikana tavoitteena on saada vähintään 30% (ideaalisesti 50%) sisään tulevasta hiilidioksidista

puhdistettua fotosynteesin avulla. Prosessi on tärkeää suunnitella näiden parametrien vuoksi, jotta saavutetaan tarpeeksi suuri kustannustehokkuus.

Levää kerätään jatkuvasti samoissa määrin, kuin se kasvaa. Tällä pyritään takaamaan jatkuva levän kasvualustan tiheys, sekä kasvun määrä. Kerätty levä kuivataan, jotta sen kosteus on alle 10% levän painosta. Tämä tuote voidaan myydä esimerkiksi kala- tai eläinruoksi, sekä esimerkiksi jatkojalostukseen, jossa sen rasvoja hyödynnetään biopolttoaineiden tuotannossa. (C Barkan ym. 2018, 31-32).

Savukaasuissa yleensä on hiilidioksidia (CO_2), happea (O_2), hiilimonoksidia (CO), typpioksideja (NO_x), rikkioksideja (SO_x), raskaita metalleja ja tuhkaa. Yleisesti savukaasut sisältävät noin 100-300ppm rikkioksidia. Tämän vuoksi mikroleviä ei voida hyödyntää suoraan hiilidioksidin sitomiseen. Monet mikrolevät voivat kestää jopa 400ppm rikkioksidipitoisuuksia, mutta bioreaktorissa tapahtuvan pH:n laskun vuoksi tämä yleensä tappaa tai estää täysin mikrolevien kasvun.

Typpioksideja (NO_x) savukaasuissa on yleensä 5-10% (v/v). Josta typpidioksidia (NO_2) on noin 90-95%. Alle 300ppm typpioksidipitoisuuksilla ei ole todettu olevan vaikutusta mikrolevien kasvuun. Typpioksidit voivat vaikuttaa jopa positiivisesti mikrolevien kasvuun, sillä ne toimivat hyvin ravinteina mikrolevälle. (G Huang. ym. 2015, 5).

Lämpötila: Lämpötilalla on elintärkeä vaikutus levän kasvuun. Optimaaliset lämpötilat levälle ovat 15-26 °C. Mikrolevät eivät selviä liian korkeissa lämpötiloissa, sekä lämpötilojen vaihdokset aiheuttavat muutoksia levien fotosynteesin tehokkuudessa. Joidenkin levälajien, kuten *Chlorella* sp. on todettu voivan kasvaa kuumissa lähteissä 42 °C lämpötilassa. Jotkut sinilevät voivat kasvaa jopa 80 °C. (G Huang. ym. 2015, 6).

pH-pitoisuus: Mikrolevät kasvavat hyvin niiden optimaallisessa pH-pitoisuudessa (6-9). Savukaasujen lisääminen bioreaktoriin voi nopeasti kuitenkin pudottaa pH:n alle viiden. Jotkut vihreät levät voivat kuitenkin kestää jopa alle 4:n pH-pitoisuuksia. Yksi näistä on edellämainitut *Chlorella* sp. -levät. (G Huang. ym. 2015, 6).

Raskasmetallit: Luonnollisesti hiilessä esiintyvät raskasmetallit kaasuuntuvat hiilen polton yhteydessä ja ne vapautuvat savukaasujen mukana ilmakehään, jopa läpäisten puhdistusprosessit. Raskasmetallit vaikuttavat negatiivisesti levien kasvuun niiden myrkyllisyyden vuoksi. Tutkimuksessa osoitetaan, että kymmenellä eri yhdisteellä (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) on suoraan verrannolliset vaikutukset levien kasvuun ja niiden rasvojen tuotantoon. Nämä raskasmetallit ovat myös haitallisia, jos levää käytetään eläinten ravintona, sekä ne vaikuttavat negatiivisesti biopolttoaineiden laatuun. (G Huang. ym. 2015, 7).

Happi: Liiallinen tai vähäinen hapen määrä voi vaikuttaa negatiivisesti levän kasvuun. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että happea mitataan säännöllisesti useasta bioreaktorin osasta.

Sekoitus: Levää ei saa sekoittaa yli 30cm/s vauhdilla; tämä voi aiheuttaa soluvahinkoa liiallisen liikkeen vuoksi. Mikrolevien kasvatukselle täytyy järjestelmä mitoittaa erittäin tarkasti. Levät ovat komplekseja organismeja. Kasvusto ei saa olla liian tiheää, jotta turvataan valon saanti alemmille leväkerroksille. Sopiva tiheys on noin 2g/L.

Valo: Pimeään ja valon vaihtelu täytyy olla tarkkaa, jotta sillä voidaan säädellä spesifi kasvu. Hiilidioksidia ei saa syöttää liiallisesti valaistuksen ollessa pois käytöstä. Jos näin tapahtuu, niin se aiheuttaa peruuttamatonta vahinkoa kasvustolle. Valaistuksen merkitystä käsitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa. (C Barkan. 2018, 24-29).

Jotta mikrolevää voidaan käyttää savukaasujen kasvatuksessa; on tärkeää, että se täyttää seuraavia parametrejä:

- Kuivattua mikrolevää voidaan hyödyntää useissa eri käyttökohteissa.
- Se on hyvin tutkittua. Tämä on tärkeää, jotta tiedetään sen käyttäytyminen eri olosuhteissa.
- Sillä ei ole vaativia kasvuolosuhteita, kuten hyvin korkeita lämpötiloja.
- Sitä käytetään yleisesti levänkasvatuksessa.
- Se kestää vaihtuvat olosuhteet.
- Kestää mahdolliset kontaminoinnit.
- Levälajin täytyy kasvaa tehokkaasti.
- Rasvojen määrä levässä normaaleissa typpipitoisuuksissa on noin 20%. Tällä on suuri merkitys levän kasvulle.
- Levällä on useita eri terveysvaikutuksia, jotta sitä voidaan käyttää ravintona.
- Se kasvaa hyvin 10% CO_2 v/v pitoisuuksissa.
- Kestää hyvin vaihtuvia typpi- ja rikkioksidipitoisuuksia.

Tärkeää levälajin valinnassa on myös se; käytetäänkö kasvatuksessa merivettä vai makeaa vettä. Useissa yhteyksissä meriveden käyttö voi alentaa huomattavasti käyttökustannuksia. Makeassa vedessä kasvava *Chlorella Vulgaris* täyttää lähestulkoon kaikki nämä

parametrit ja se onkin yleisimmistä ja tutkituimmista levälajeista hiilidioksidin puhdistuksessa. (C Barkan. 2018, 19).

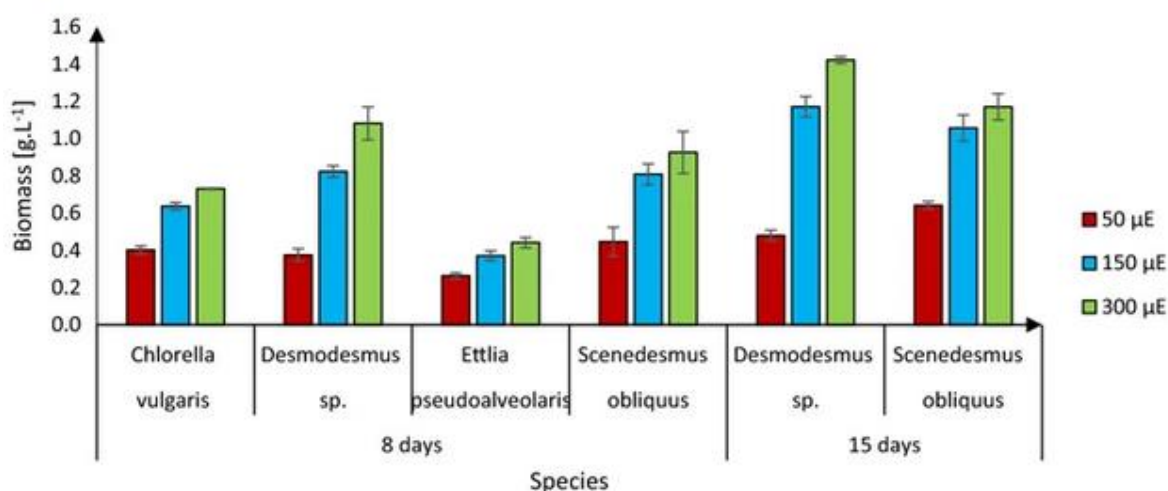
3.4 Valaistuksen vaikutus levän kasvuun

Järjestelmää suunnitellessa täytyy huomioida valaistuksen tärkeys. Riippuen bioreaktorista ja kasvatettavan levämäärän määrästä, voidaan päätellä; onko lisävaloille tarvetta. Suomessa vuodenaajoista vuoksi, levän kasvatusta täytyy toteuttaa vähintään jaksottaisella keinotekoisella valaistuksella.

3.4.1 Valon intensiteetin vaikutus biomassin määrään

Riippuen levälajista valaistuksen intensiteetillä on vaikutusta levän kasvuun. *Desmodesmus sp.* -levälajilla on mahdollista saavuttaa 1.1g/L kasvu $300\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ intensiteetillä. Riippuen valaistuksen määrästä, sillä ei kuitenkaan ole kovin suurta kasvumerkitystä, vaikka valaistuksen intensiteetti nostettaisiin $150\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ $300\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$:iin. Kokeessa, jossa kasvatettiin useita eri levälajeja kolmella eri intensiteetillä 50-, 150- ja $300\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ huomattiin, että biomassin määrä riippuu myös levälajista. (JC Nzayisenga, Xavier Farge, S Groll & A Sellstedt, 2020, 13).

Fig. 1



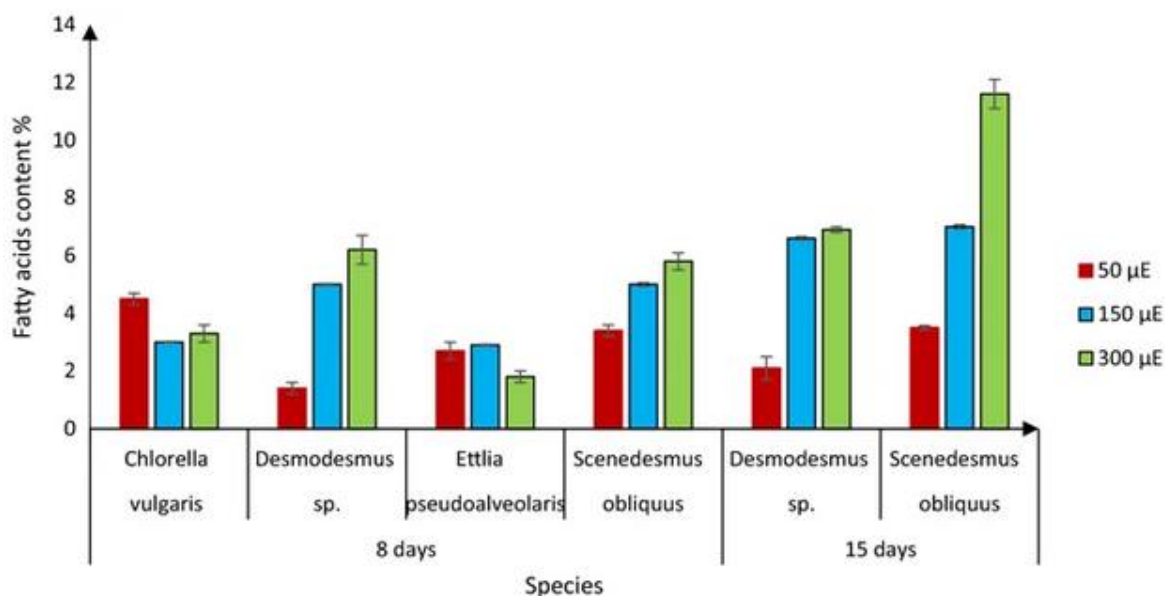
KUVA8: Eri levälajien kasvatustuloksia, jossa kokeiltiin valon intensiteetin vaikutusta biomassin määrään. LÄHDE: JC Nzayisenga ym. 2020.

3.4.2 Valon intensiteetin vaikutus rasvojen tuotantoon

Rasvojen tuotanto on tärkeää ajatellen levän jatkohyödynnyksen potentiaalia. Rasvoilla on suuri merkitys esimerkiksi biopoltoaineiden tuotannossa. Tässä samassa kokeessa, jossa tutkittiin valon vaikutusta levän biomassin määrään selvitettiin myös valon intensiteetin

vaikutusta rasvojen määrään. Tutkimuksessa havaittiin, että rasvojen määrä kasvaa myös kun valon intensiteetti on suurempi. Poikkeuksena tästä on *Chlorella vulgaris*, jonka rasvamäärä laski $300\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Jatkotutkimuksissa taas havaittiin, että intensiteetin kasvaessa $600\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ nousee myös rasvantuotanto huomattavasti. (JC Nzayisenga ym. 2020, 14).

Fig. 2



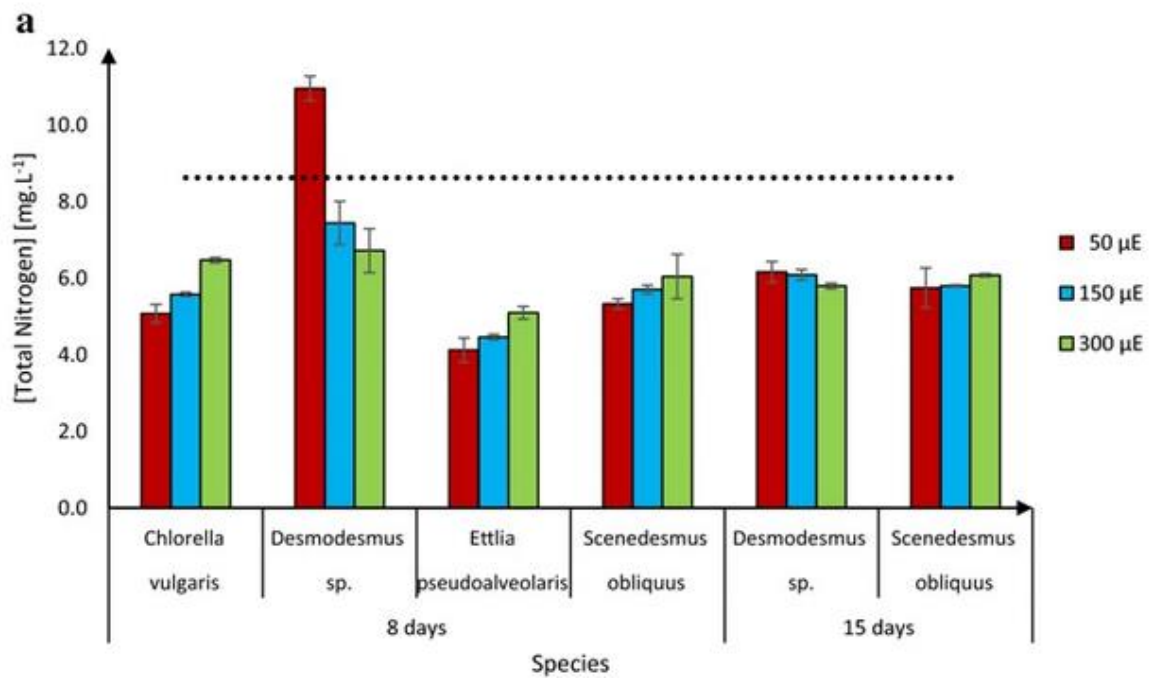
KUVA9: Eri levälajien kasvatuskoetuloksia, jossa kokeiltiin valon intensiteetin vaikutusta rasvojen tuotantoon. LÄHDE: JC Nzayisenga ym. 2020.

Tästä voidaan päätellä, että *Chlorella V.* -levälajin rasvantuotanto on suurimmillaan joko matalassa tai korkeassa intensiteetissä. Tämä voi olla myös ongelmallista, sillä tavoitteena on myös puhdistaa hiilidioksidia mahdollisimman tehokkaasti, sekä kasvattaa mahdollisimman hyvin jatkohyödynnettävää levää. Tämän vuoksi valaistuksen kustannukset suljetussa reaktorissa nousisivat, sillä valaistuksen täytyy olla tarpeeksi intensiivistä, jotta saavutetaan parhaat kasvuolosuhteet, sekä rasvojen tuotanto.

3.4.3 Valaistuksen vaikutus mikrolevän typen hyödynnykselle

Savukaasut sisältävät typpeä, jota mikrolevät hyödyntävät ravintoaineena. Jotta saavutetaan mahdollisimman tehokas puhdistusteho; on tärkeää tietää levälajin potentiaali typen hyödynnykselle (JC Nzayisenga ym. 2020, 15). Samassa tutkimuksessa havaittiin, että valaistuksen intensiteetillä on myös merkitystä levän typenkäytölle

Fig. 5



KUVA10: Eri levälajien kasvatuskoe tuloksia, jossa kokeiltiin valon intensiteetin vaikutusta levän tyypin käytölle. LÄHDE: JC Nzayisenga ym. 2020.

Kuten ylläolevasta kuvasta voidaan päätellä, niin tämäkin on hyvin riippuvaista levälajista. *Chlorella V.*, jota pidetään yleisesti kestäväenä ja hyvänä ehdokkaana savukaasujen puhdistukselle hyödyntää tyyppiä huomattavasti paremmin intensiteetin kasvaessa.

4 ESIMERKKIJÄRJESTELMIÄ

4.1 Suljetut järjestelmät

Suljetut järjestelmät tai fotobioreaktorit ovat läpinäkyviä kasvatusalustoja, jotka ovat suunniteltu mikrolevien kasvattamiseen. Suljetut järjestelmät ovat suljettuja ympäröivältä ilmalta ja tämän vuoksi ne eivät kontaminoidu helposti. Suljettujen järjestelmien etuna on myös veden säilyminen järjestelmässä, sekä hiilidioksidi säilyy prosessissa. Nämä järjestelmät ovat yleensä vertikaalisia tai horisontaalisia, tai mahdollisesti sijoitettu johonkin kulmaan riippuen valaistuksesta. Luonnollista valoa käytettäessä täytyy järjestelmä sijoittaa valon tulokulmaan riippuen siten, että valaistus on mahdollisimman tehokasta. (M. K Egbo, A. O Okoani, I. E Okoh, 2018, 66)



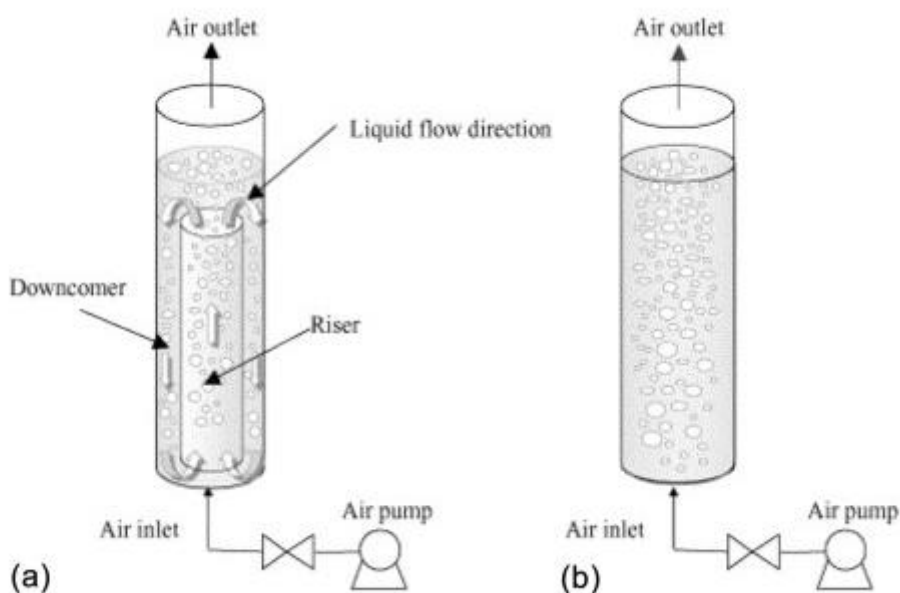
KUVA11: Pystymallinen fotobioreaktori. LÄHDE: SYKE, 2013.

4.1.1 Putkibioreaktorit

Putkilaariset bioreaktorit ovat sylinterimallisia putkistoja. Niiden pinta on valoa läpäisevää, jotta kasvusto saa valoa. Putkistojen pohjat ovat varustettuja sumuttimilla, sekä levän sekoitus tapahtuu kaasun syötön avulla sumuttimien kautta. Tällä ehkäistään solujen sedimentaatio, sekä varmistetaan, että levämassa saa tasaisesti valoa. Sumutus myös sekoittaa ravinteita ja kaasuja, jonka avulla ehkäistään kasvumassojen keskittyminen.

Yksi yleisimmistä reaktoreista on kuplafotobioreaktorit, jotka ovat pystymallisia putkistoja. Tällä kasvatustavalla on suhteellisen vähäinen käyttöönottokustannus verrattuna muihin suljettuihin järjestelmiin. Näillä bioreaktoreilla on myös hyvät lämpö- ja massansiirto-ominaisuudet. (M. K Egbo, ym. 2018, 68-69)

Toiseen samaan tekniikkaan perustuvassa reaktorissa sisällä on pystyputki, josta kaasu virtaa sisään reaktoriin. Sitä kutsutaan ilmasiltabioreaktoriksi. Tässä sisällä on nousuputki, jonka avulla pyritään takaamaan tasaisempi kaasun sekoittuminen pylvään sisälle (Munonyedi E. ym. 2018). Se on suunniteltu siten, että pylvään sisäpuoli on jaettu kahteen eri osioon. Tällöin kaasut kiertävät pylvästä, kun niitä syötetään reaktoriin. Tällä myös taataan ilmakuplien tasaisempi liikkuminen bioreaktorin sisällä (Peter S. 2017, 551).



KUVA12: Kaksi eri pylväsfotobioreaktoria. (a) on ilmasiltabioreaktori ja vieressä (b) on kuplabioreaktori. LÄHDE: Yuhua Duhan, Fan Shi, 2014.

4.1.2 Horisontaaliset putkibioreaktorit

Poiketen vertikaalisista putkibioreaktoreista nämä bioreaktorit ovat sijoitettu joko kulmaan tai horisontaalisesti. Näiden bioreaktoreiden etuna on ulkotiloissa kasvattaessa niiden sijoitettavuus maksimoidakseen auringonvalon saannin. Tätä kasvatusjärjestelmää käytetäänkin yleensä ulkotiloissa. (M. K Egbo. ym. 2018, 70)



KUVA13: Horisontaalinen putkifotobioreaktori. LÄHDE: Young-Lorenz, J, 2013.

CO₂ -kaasu syötetään näihin erillisen kaasuttimen kautta. Happi täytyy poistaa putkistosta mahdollisimman tehokkaasti, sillä se voi aiheuttaa leväkuolemia, sekä vahingoittaa putkiston pintaa. Näiden järjestelmien yksi ongelmista on auringonvalosta johtuva kuumeneminen. Sitä hallitaan joko suihkuttamalla vettä putkiston päälle, varjostamalla putkia päivän kuumimpana hetkenä tai syöttämällä viileää vettä järjestelmään. (Singh R. ym. 2012) Hapen poistoa varten putkistoon asennetaan erillinen kaasunpoistojärjestelmä, mutta riippuen putkiston pituudesta ja koosta tämä voi aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia. (M. K Egbo. ym. 2018, 70)

4.1.3 Paneelibioreaktorit

Paneelibioreaktorit tehdään valoa läpäisevistä materiaaleista, kuten putkibioreaktorinkin. Näitä voidaan valaista ulkoisesti joko valaistuksella, tai käyttämällä auringonvaloa. Näillä bioreaktoreilla on hyvin laaja valaistuspinta-ala, ja ne sijoitetaankin siten, että valaistus on mahdollisimman tehokasta. Yksi järjestelmän eduista on käyttäessä keinotekoisesta valaistusta, sillä tällä ei ole itsevarjostavaa ominaisuutta.

Sekoitus järjestelmässä toimii ilmastuksen kautta, sekä siinä on muihin järjestelmiin suhteellisen vähäinen energiantarve ilmastukselle. Sekoitussuhteen laskemiselle on kaava:

$$P = p_1 \times g \times U_g$$

Jossa p_1 on nesteen tiheys, g on painovoiman kiihtyvyys ja U_g on lisätyn kaasun tiheys. (M. K Egbo. ym. 2018, 71)

Paneelibioreaktoreissa valon kulkuun vaikuttaa myös merkittävästi näiden leveys. Mitä ka-
peampi bioreaktori on, niin sitä pienempi valon kulku on reaktorin sisällä. Tämä tarkoittaa
sitä, että valaistusta joudutaan mahdollisesti lisäämään enemmän rakennettaessa järjes-
telmää. Solix -yhtiö on kehittänyt järjestelmän, jossa valoa läpäisevissä muovipusseissa
kasvatetaan levää, sekä levää jäähdytetään upottamalla pussit veteen.

Järjestelmien ongelmiin vaikuttavat kaasun epätasainen jakaantuminen, sekä levämassa
voi kiinnittyä kasvualustan seinämiin, jolloin reaktorissa keskellä oleva levämassa ei saa
valoa. (M. K Egbo. ym. 2018, 71) Tutkimuksen mukaan, jossa tutkittiin optimaalista raken-
netta paneelibioreaktorissa havaittiin, että optimaalinen leveys reaktorille olisi noin 10cm.
Chlorella V. -levälajilla tehdyn kokeiden perusteella myös erillisestä sekoitusjärjestelmästä
on lähes kaksinkertainen hyöty levän kasvulle. (M. K Egbo. ym. 2018, 71).



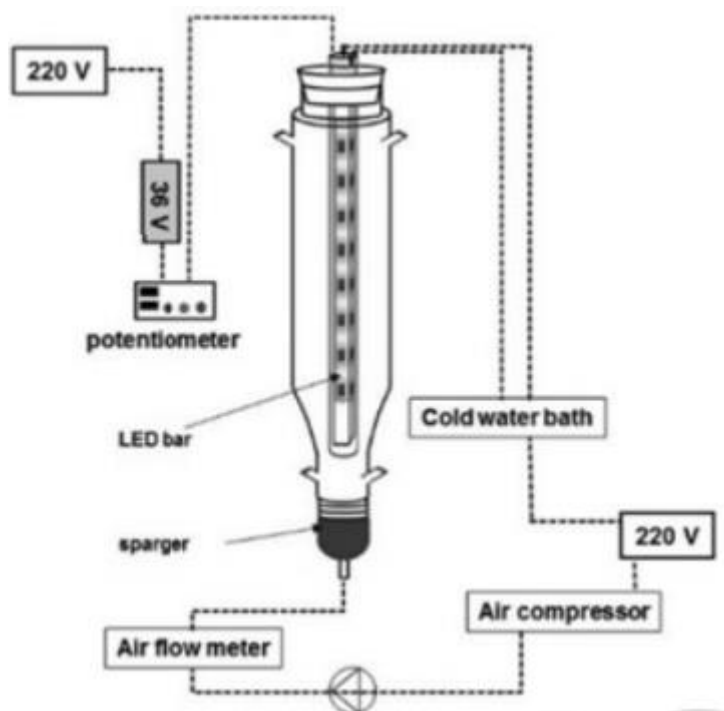
KUVA14: Paneelibioreaktorijärjestelmä. LÄHDE: Peter Lindblad, Alberto Conejero, David Fuente Herraiz, Narciso Alves Silva Couto, 2019.

Vaikkakin paneelijärjestelmiä on käytetty jo 1950-luvulta levän kasvatukseen, niin niitä ke-
hitetään yhä, jotta tätä järjestelmää voitaisiin käyttää suuren skaalan kasvatukselle. Uu-
sista järjestelmistä on saatu lupaavia tuloksia, mutta kustannustehokkuus on vielä yksi
suurimmista kysymyksistä levänkasvatukseen liittyen. (M. K Egbo. ym. 2018, 71).

4.1.4 Säiliöbioreaktorit

Säiliöbioreaktoreilla on huomattavan suuri pinta-ala verrattuna muihin bioreaktoreihin. Tämä näkyy erityisesti siinä, että valo ei pääse välttämättä läpäisemään ulkovalaistuksella kaikkia leväkerroksia. Useimmiten säiliöbioreaktorit ovat valaistu sisältä LED-putkistoilla. Säiliöbioreaktorit ovat suhteellisen harvinaisia muihin reaktoreihin verrattuna, mutta niiden suosio on kasvamassa, sillä niillä on mahdollisuus tuottaa suurempia määriä levää pienellä pinta-alalla verrattuna muihin reaktoreihin. (M. K Egbo. ym. 2018, 67)

LED-valojen värillä on merkitystä kasvatuksessa. *Spirulina platensis* -levälajin kasvatuskokeessa testattiin eri värein, sekä intensiteetein. Kokeessa huomattiin, että punainen LED-valo tuotti suurimman määrän rasvaa, sekä levän kasvua. Sininen LED-valo tuotti pienimmän kasvumäärän. (M. K Egbo. ym. 2018, 67)



KUVA 15: Kaavio sisävalaistuksella toimivasta bioreaktorista. LÄHDE: M. K Egbo. ym. 2018)

Sekoittaminen säiliöreaktoreissa tapahtuu sekoittimilla tai ilmastuksen avulla. Sekoittimet voivat nostaa kuitenkin huomattavasti bioreaktoreiden käytön kustannuksia, sekä voivat aiheuttaa vahinkoa levälajeille riippuen onko kyseessä erityisen muutoksille herkkä oleva levälaji. (M. K Egbo. ym. 2018, 67-68)

4.2 Avoimet bioreaktorit

Avoimilla bioreaktoreilla tarkoitetaan kasvatusjärjestelmiä, jotka sijaitsevat ulkoilmassa ja niitä ei ole eristetty ulkoisilta vaikutuksilta, kuten säältä. Avoimet järjestelmät periaatteeltaan jaetaan kahteen eri luokkaan. Altaisiin, sekä ratamallisiin systeemeihin.

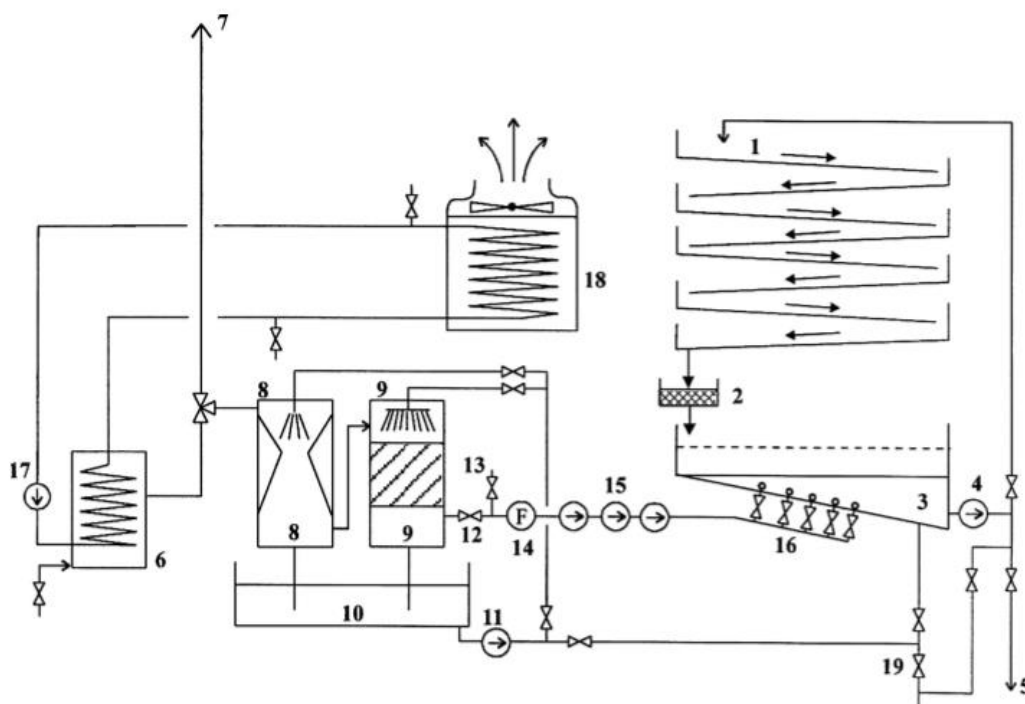


KUVA16: Kuvassa on useita avoimia ratajärjestelmiä mikrolevän kasvatukseen. A. Rata, jossa on paksu jakaja. B. Avoin rata. C. Laboratoriokokeessa käytettävä rata, jolla yritetään kasvattaa mahdollisimman suuria levämääriä. D. Kaavio ratabioreaktorin veden kierrosta. LÄHDE: Gour Gopal Satpati, Ruma Pal, 2018.

Näiden kasvatusjärjestelmien etuna on niiden suuri tuottavuus, sekä matalat käyttökustannukset. Haittapuoliin lukeutuu niiden sopeutumattomuus. Avoimet kasvatusjärjestelmät ovat sääolojen armoilla, jonka vuoksi vain tietyt levälajit pystyvät menestymään niissä. (M. K Egbo. ym. 2018, 66).

4.2.1 Avoimen kasvatusjärjestelmän koe

Tšekissä on kokeiltu avoimessa 55m² -kokoisessa olevassa avoimessa kilparatajärjestelmässä kasvattaa *Chlorella sp.* -levälajin levää käyttäen ravinteena maakaasun savukaasua. Järjestelmän pinnalla oli noin 6mm paksu levämassa, joka kasvoi auringonvalon alla virran nopeuden ollessa 50 cm s⁻¹. Savukaasun CO² -pitoisuus. Hiilidioksidin hyödynnys syötetystä kaasusta oli noin 10-50% ja hyödynnyksen tehokkuus laski, mitä enemmän savukaasua järjestelmään syötettiin. Hiilidioksidia syötettiin järjestelmään noin 0.1kPa paineella ja sitä ylläpidettiin koko järjestelmän pituudelta, jotta koko järjestelmän potentiaali hyödynnettiin. NO_x (45 mg m⁻³ ja CO 3mg m⁻³ -kaasuilla ei ollut vaikutusta levän kasvuun. Tutkimuksessa havaittiin, että levän kasvuun tarvittiin noin 4,4kg CO², jotta saadaan noin 1kg (kuivapaino) edestä levää. (J Doucha, Frantisek Straka & Karel Livansky, 2005, 403).



KUVA17: Kaavio levänkasvatusjärjestelmästä, jolla kasvatettiin levää käyttäen savukaasua. (1) Kasvualustat; (2) siivilä; (3) retentiosäiliö; (4) kierrätyspumppu; (5) levänkeräys; (6) kaasupoltin; (7) piippu; (8) savukaasun jäähdytin; (9) savukaasun puhdistin; (10) jäähdytysvesisäiliö; (11) kiertovesipumppu; (12) savukaasuventtiili; (13) ilmenttiili; (14) kaasun virtausmittari; (15) kaasupuhallussetti; (16) saturaatio- / ilmastusjärjestelmä; (17) kuumavesipumppu; (18) ilmajäähdytin; (19) vesi ulos/sisään LÄHDE: (J Doucha. ym. 2005)

Kasvatuksen alussa levä pumpattiin retentiosäiliöstä (3) pumpulla (4) kasvalustoille (1). Kasvualustat olivat pituudeltaan 5.7m ja 1.16m leveitä. Yhteensä järjestelmän pinta-ala oli 55m². Virtauden nopeus järjestelmässä oli 50cm s⁻¹. Yhteensä järjestelmässä levämasaa oli noin 0.4 m³. Kasvatuksen alussa vertailtiin biokaasun ja maakaasun käyttöä. Koikeissa huomattiin, että molempien hiilidioksidi- ja typpipitoisuudet olivat käytännössä samat. Maakaasun käyttöön päädyttiin sen helppouden vuoksi. Kaasu poltettiin polttimessa (6) ja lämpöenergia ohjattiin ilmajäähdyttimelle (18). Kaasupuhaltimet (15) ottivat savukaasun savupiipusta (7) kaasunjäähdyttimen (8) ja puhdistimen (9) kautta ja ohjasivat kaasun saturaatiojärjestelmään. Kaasun saturaatio onnistui käyttämällä etyylipropyleenidimeristä (EPDM) valmistetuista putkilla, jotka sijoitettiin retentiosäiliön alle. Kasvatus lopetettiin illalla pesemällä veden pinnalla oleva levämassa retentiosäiliöön. Hiilidioksidihäviötä estetään pitämällä kaasun pumppauksen paine minimissä 0.1-0.2 kPa pCO_2 . Tästä alemmalla paineella olisi levän kasvu häiriintynyt. (J Doucha. ym. 2005, 404)

TAULUKKO1: Savukaasun saturaatioarvoja ennen syöttöä. LÄHDE: J Doucha. ym. 2005

Aika	Savukaasun virtausarvo (m³ h⁻¹)	CO₂ (vol. %) sisään	CO₂ (vol. %) ulos	O₂ (vol%) sisään	O₂ (vol%) ulos	NO_x (mg m⁻³) sisään	NO_x (mg m⁻³) ulos	CO (mg m⁻³) sisään	CO (mg m⁻³) ulos
10:45	27.2	5.46	4.40	8.24	8.39	30.0	28.1	3.45	2.80
13:30	9.1	7.50	3.60	8.12	8.36	29.1	25.0	1.66	0.26
14:15	34.9	6.05	5.70	8.07	8.12	32.3	32.0	3.61	3.12
15:05	16.8	6.55	3.90	9.47	9.68	22.4	22.1	1.01	0.17
15:25	14.6	6.80	4.50	8.68	8.80	20.4	17.9	1.61	1.75
17:05	13.2	7.13	3.90	8.58	8.95	28.1	24.5	1.12	0.11

Savukaasun pitoisuudet häviävät, kun se on kulkenut kasvatusjärjestelmän läpi. Happi desorptoituu kaasun virtauden mukana. Levämassa hyödyntää osittain järjestelmään syötettyä hiilidioksidin, kun taas osa siitä vapautuu ilmakehään.

$$M = \frac{Q_g \rho_{CO_2} C_{g,in}}{100}$$

KAAVA1: Hiilidioksidin määrä savukaasussa ($g\ h^{-1}$). LÄHDE Jiri D. ym. 2005

Kaavassa 1 Q_g on kaasun tilavuusvirta ($m^3\ h^{-1}$), p_{CO_2} on hiilidioksidin tiheys ($g\ m^{-3}$), $C_{g.in}$ on hiilidioksidipitoisuus savukaasuissa (vol. %) ennen sen kulkeutumista kasvatusjärjestelmän läpi. Kaavalla lasketaan hiilidioksidin määrää syötettävää kaasussa. (J Doucha. ym. 2005, 406)

$$\frac{M}{A} = \frac{R_{CO_2} + K_{L,CO_2} K_H (p_{mean} - p^+)}{(Dec/100)}$$

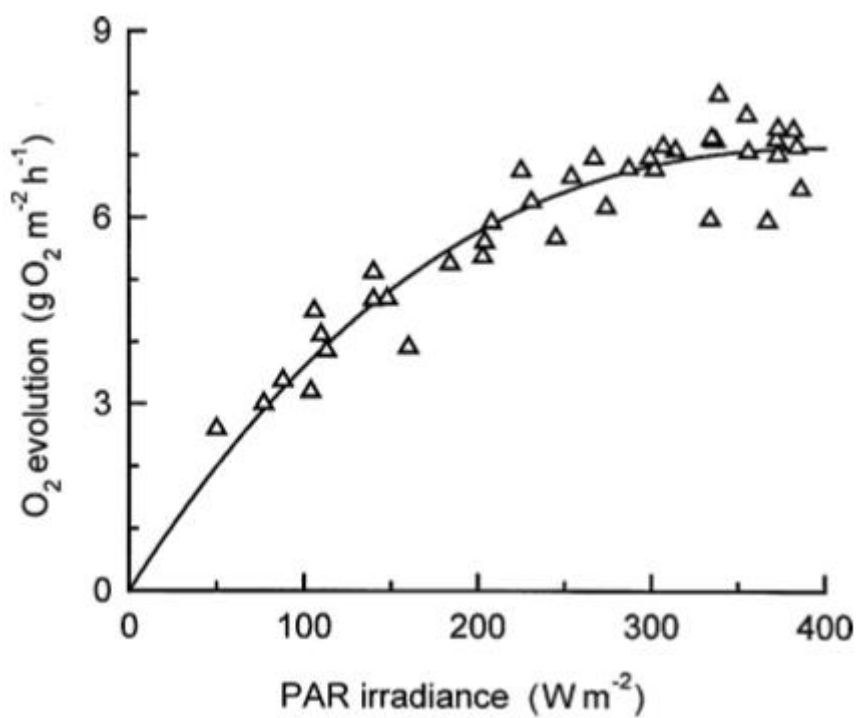
KAAVA2: Hiilidioksidin määrä verrattuna kasvualustaan A. LÄHDE: Jiri D. ym. 2005

RCO_2 on levän hiilidioksidin kulutus ($g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$) tietyn kasvialueen sisällä. K_{L,CO_2} on vesifaasin massan siirtotehokkuus ($m\ h^{-1}$) suspensiosta ilmakehään. K_h on Henryn vakio ($g\ CO_2\ m^{-3}\ kPa^{-1}$) hiilidioksidille. p_{mean} on hiilidioksidin osittainen paine levämässä (kPa), p^+ on hiilidioksidin osittainen paine ympäröivässä ilmakehässä, Dec on prosentuaalinen määrä savukaasun dekarbonisaatiosta, kun se on kulkeutunut kasvujärjestelmän läpi. Kasvatuksen optimoimiseksi hiilidioksidin PCO_2 (osittainen liuenneen hiilidioksidin paine) täytyy pitää mahdollisimman matalana (0.1-0.2 kPa) varoen kuitenkin estämästä levämässän yhteyttämistä hiilidioksidivajeen vuoksi. (J Doucha. ym. 2005, 406-407) Suljetussa järjestelmässä hiilidioksidihäviötä ei tarvitse ottaa laskiessa huomioon, sillä häviötä ei ole tai se on hyvin vähäistä.

TAULUKKO2: Kasvatuksen parametrejä. LÄHDE: Jiri D. ym. 2005

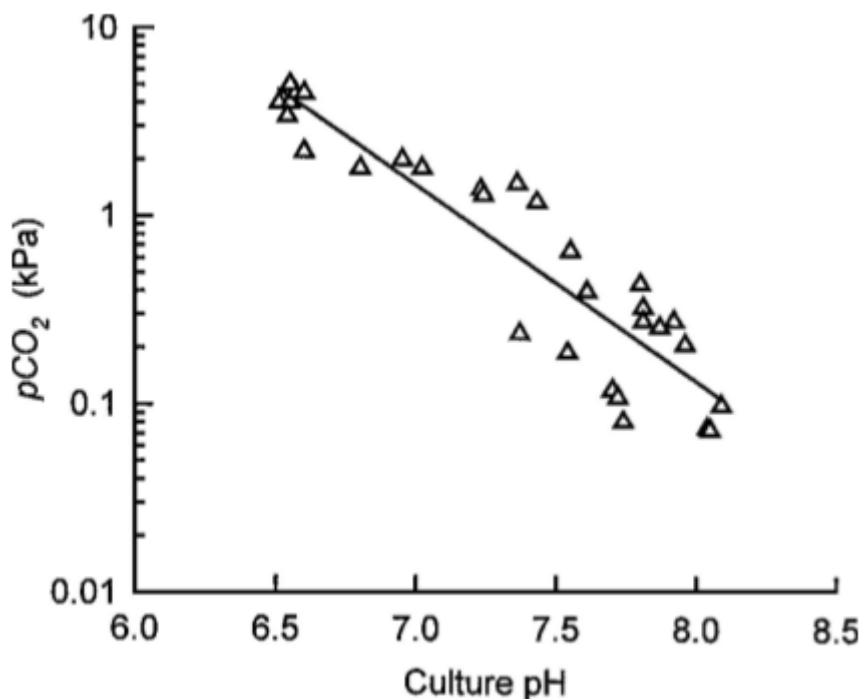
Aika	PAR- arvo (W m^{-2})	Kasvu- alus- tan lämpö- tila (°C)	PCO_2 (kPa) sisään	PCO_2 (kPa) ulos	pH si- sään	pH ulos	mg O_2 L^{-1} si- sään	mg O_2 L^{-1} ulos
10:45	308	31.2	1.73	0.49	6.95	7.88	5.60	19.02
13:30	377	32.3	0.66	0.21	7.55	7.96	6.36	18.64
14:15	383	32.4	2.85	0.11	6.61	8.09	3.97	25.35
15:05	323	33.2	1.45	0.28	7.23	7.92	5.69	18.99
15:25	334	31.9	2.30	0.07	6.85	8.05	4.58	22.20
17:05	188	31.7	1.53	0.32	7.02	7.87	5.99	16.30

PAR-arvo tarkoittaa fotosynteesistä aktiivista säteilyn määrää. Yllä olevasta taulukosta voidaan päätellä, että hiilidioksidin osapaine ja määrä vähentyy merkittävästi savukaasun kulkeutuessa kasvualustan läpi, sekä hapen tuotanto kasvaa huomattavasti.



KUVA18: Kuvassa on levämassan hapen määrä verrattuna PAR-arvoon. LÄHDE: Jiri D. ym. 2005

Levän yhteyttäminen on suoraan verrannollinen fotosynteesistä aktiivisen säteilyn määrään. Yöaikaan avoimelle kasvatusjärjestelmälle ei voida syöttää hiilidioksidia.



KUVA19: Kuvassa on levämassan pH-arvo, sekä hiilidioksidin osittaispaine. Lähde: Jiri D. ym. 2005

(Kuvasta 19) voidaan päätellä, että hiilidioksidin osapaine laski logaritmisesti verrattuna kasvualustan pH-arvoon. Liuennut hiilidioksidi nostaa veden pH-arvoa. Levämassa käytti keskimäärin syötetystä hiilidioksidista noin 47% yhteyttämiseen. Muut hiilidioksidihäviöt johtuivat saturaatiosta tai hiilidioksidin haihtumisesta ilmakehään. Teoreettisesti näillä arvoilla tarvitaan noin 1.72kg hiilidioksidia, jotta saadaan tuotettua 1kg biomassaa. (J Doucha, ym. 2005, 408).

Kasvatuskokeiden tulosten perusteella mikrolevää on mahdollista hyödyntää keskikokoisia kasvatusjärjestelmiä biometanoinnin ja maatalousjätteen yhteydessä. Tällä vähennettäisiin merkittävästi kasvihuonepäästöjä. Tutkimuksessa valmistettua levämassaa käytettiin märkänä karjan rehun ravintolisänä. Kuivauksen poisjättäminen laski kustannuksia noin 15%. (J Doucha, ym. 2005, 409-410).

4.3 Kasvatusjärjestelmien vertailua

Ulkoilmassa olevissa suljetuissa järjestelmissä, sekä avoimissa järjestelmissä suurin ongelma on niiden joutuminen sääolosuhteiden vaikutusten alaiseksi, sekä niissä ei ole

mahdollisuuksia veden lämpötilan säätelyyn, jonka vuoksi levän kasvu määräytyy suuresti ulkoisista lämpötiloista. Näiden ongelmien vuoksi avointen järjestelmien käyttö on erittäin haastavaa Suomessa. Suljetuissa järjestelmissä on helpompaa hallita kasvuolosuhteita, sekä kasvualustan kontaminaatoriski on pieni. Suljettujen järjestelmien kustannukset ovat kuitenkin suurempia. Tätä esitellään seuraavassa taulukossa.

TAULUKKO3: Taulukossa esitellään avoimien ja suljettujen bioreaktorien eroa. LÄHDE: (Zhang. 2015.)

Parametrit	Avoimet järjestelmät	Suljetut järjestelmät
Prosessin kontrollointi	Vaikeaa	Helppoa
Lämpötilan ja pH:n hallinta	Vaikeaa	Helppoa
Haihduntahäviöt	Suuri	Matala
Valaistuksen tehokkuus	Matala	Suuri
Kaasunsyötön kontrollointi	Matala	Helppoa
<i>CO₂</i> :n diffuusio ilmaan	Kyllä	Ei
Hapen inhibitio	Ei	Kyllä
Sekoitus	Vaikeaa	Helppoa
Lajien kontrollointi	Vaikeaa	Helppoa
Kontaminaation kontrollointi	Vaikeaa	Helppoa
Kasvun hallinta	Vaikeaa	Helppoa
Hiilidioksidin fiksointi	Matala	Korkea
Spesifin kasvun hallinta	Matala	Korkea
Tuottavuus	Matala	Korkea
Investointikustannukset	Matala	Korkea
Rakennuskustannukset	Matala	Korkea

Hallintakulut	Matala	Korkea
Elinikä	Korkea	Matala
Vaadittu tila	Suuri	Pieni
Prosessin koon kasvattaminen	Helppoa	Vaikeaa

Suurin etu kuplapylväsbioreaktoreissa on niiden matalat rakennuskustannukset, suuri kasvu pienellä alueella, niissä ei ole paljoa huollettavia liikkuvia osia, suhteellisen helppo lämmön ja massan siirto, tehokas hapen vapautus ja ravinteet jakautuvat tasaisesti. Paneelibioreaktoreissa on suurin tuotanto tehokassa valaistuksessa, sekä niissä tapahtuva kasvu on suurempaa pylväsbioreaktoreihin verrattuna pienemmällä pinta-alalla. Horisontaaliset putkibioreaktorit ovat tehokkaimmillaan ulkotiloissa, sekä niiden fotosynteettinen tehokkuus on suurempi kuin paneelibioreaktoreissa. Spiraalin muotoisia bioreaktoreita ei ole otettu vertailuun mukaan, sillä niiden käyttökustannukset ovat suuret. (Zhang. 2015, 42).

5 MIKROLEVÄN KERÄYS, PROSESSOINTI JA HYÖDYNNYS

5.1 Keräysprosessien esittelyä

Mikrolevää kasvatetaan yleensä hyvin laimennetussa ympäristössä. Kun mikrolevää kasvatetaan savukaasujen avulla on keräysprosessin valinta hyvin tärkeää, jotta saadaan kerättyä halutut materiaalit. Tehokkaan keräyksen ja prosessoinnin hinta voi nousta korkeaksi, sillä mikrolevän ominaisuudet, kuten koko ja tiheys vaikuttavat keräysprosessiin. Jotkut mikrolevät ovat huomattavasti helpompia kerättäviä. (Zhang. 2015, 44).

Keräysprosessit perustuvat kiinteään massan erotukseen nesteestä. On tärkeää, että levämassat voidaan tiivistää mahdollisimman suureksi leväliejuksi tai kakkumaiseksi, jotta niiden keräys on helppoa. Tämä tarkoittaa sitä, että veden poistamista levämassasta täytyy lykätä mahdollisimman paljon, jotta levän keräys on käytännöllistä. (Zhang. 2015, 44-45.) Prosessin kustannukset voivat olla jopa 20-30% koko tuotannon kustannuksista. Mikrolevien keräys on periaatteessa kahden prosessin yhdistelmä (Liam Brennan & Philip Owende. 2009, 566.):

- (1) Massan keräys – Jotta levä saadaan kerättyä vesimassasta täytyy vedessä oleva aines tiivistää noin 100-800 kertaiseksi, jotta saavutetaan 2-7% materiaalipitoisuus. Tässä on eri tapoja kuten flokkulointi, kellutus tai painovoimasedimentaatio.
- (2) Sakeuttaminen – Tässä tavoitteena on tiivistää levälieju eri menetelmin, kuten linkeamalla, filtraatiolla tai ultraäänikoostamisella. Sakeuttaminen voi olla kuitenkin hyvin kallista verrattuna massan käsittelyyn. (L Brennan. ym. 2009, 567)

5.2 Menetelmien vertailua

Kun mikrolevä on kerätty kasvatusalustastaan, niin seuraava tärkeä prosessin osa on sen prosessointi ja jatkokäsittely. Oikean menetelmän käyttö lisää huomattavasti levän käyttöikä, sekä parantaa sen laatua.

TAULUKKO4: Eri keräysmenetelmien vertailua. LÄHDE: Pei H, 2019.

	Keräyskustannukset	Turvallisuus	Aika
Linkous	Korkea (Tarvitsee huomattavan määrän energiaa)	Korkea	Vaatii vähän aikaa
Suodatus	Korkea (Vaatii mahdollisesti suodattimien vaihtoa usein)	Korkea	Vaatii vähän aikaa
Automaattinen flokkulointi	Matala	Korkea	Pitkä
Syömäkelpoisten sienilajien käyttö	Matala	Korkea	Lyhyt
Flokkulaatio kemi-kaaleilla	Matala	Matala	Lyhyt
Kellutus	Matala	Korkea	Lyhyt

5.3 Kuivaus

Biomassan kuivaus nostaa sen käyttöikä. Tähän on useita eri metodeja, kuten sumutuskuivaus, kylmäkuivaus, matalapaineinen hyllykuivaus, kuivaus auringonvalolla ja rumpukuivaus. (Teresa M. Mata & António Martins, 2012, 208).

Kuivauksella on tärkeä rooli prosessia suunnitellessa, sillä kuivausmenetelmien kustannukset voivat nousta korkealle. Kuivauksella on myös erilaisia vaikutuksia leviin ja eri levälajeille sopivat erilaiset menetelmät. (Zhang, 2015, 55.) Esimerkiksi Scenedesmus -levälajille optimaalinen kuivausmenetelmä on rumpukuivaus.

5.4 Levän erotus ja puhdistus

Mikrolevätuotteet ovat kuivauksen jälkeen joko jauhomaisia tai puristettuina kapseleihin. Riippuen mikrolevän käyttökohteesta sitä joudutaan mahdollisesti jalostamaan edelleen, jotta sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi biopolttoaineiden tuotannossa. (Zhang. 2015, 54).

Superkriittistä hiilidioksidia käytetään yleensä pääasiallisena liuottimena, kun mikrolevästä erotetaan rasvoja. Superkriittisellä hiilidioksidilla on suhteellisen alhainen lämpötila 31,1°C ja sen paine on 7.38Mpa, jolla voidaan onnistuneesti erottaa herkkiä rasvayhdisteitä vahingoittamatta niitä. Tämä menetelmä on myös suhteellisen turvallinen, sillä hiilidioksidi ei ole myrkyllistä, se ei ole syttyvää eikä reagoivaa. Jos levää käytetään hiilidioksidin puhdistukseen esimerkiksi hiilivoimalaitoksella, niin tällöin on mahdollista hyödyntää puhdistettua hiilidioksidia savukaasuista levän käsittelyyn. Tärkeintä levänkäsittelyssä on erottaa astaksaniinia, beta-karoteenia ja erinäisiä rasvahappoja. (Zhang. 2015, 54-55).

Mikrolevät ovat lupaavia materiaaleja kestäväen kehityksen kannalta. Niiden käyttöpotentiaali ylettyy ruokateollisuuteen, kemiaan ja biopolttoaineisiin.

5.5 Mikrolevät kaupallisessa käytössä

Mikroleviä voidaan syntetisoida keski- tai korkea-arvoisiksi tuotteiksi kuten polysakkariideiksi, proteiineiksi, karotenoideiksi, väriaineiksi, sekä pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi, joita voidaan käyttää ravintona, ravinteina ja polttoaineteollisuudeiksi. Mikrolevät ovat erityisen tehokkaita tuottamaan Omega-3 -6 -happoja, sekä erinäisiä rasvahappoyhdisteitä, jotka ovat yhdistetty ihmisen terveyteen tärkeiksi ravinteiksi. (A. P Mata. 2017, 5).

Vihreät levät (Chlorophyceae), joista esimerkkinä *Chlorella Vulgaris*, *Haematococcus pluvialis* ja *Dunaliella salina* ovat tärkeimpiä leviä ajatellen bioteknologioita. Niitä käytetään yleisesti jo ihmisen lisäravinteina ja eläinten ruokalisänä. Näitä leviä käytetään myös väriaineina ihovoiteissa, sekä eri farmaseuttisissa hoitomenetelmissä. (Angelo P. 2017, 6.) Alla olevassa taulukossa tarkastellaan eri kaupalliseen käyttöön soveltuvia levälajeja, sekä mitä ravintoaineita niissä on.

TAULUKKO5: Eri mikroleviä ja niiden ravinnepitoisuuksia. LÄHDE: Pei H. 2019.

Laji	Kasvatusalusta	Proteiinit (%)	Rasva (%)	Hiilihydraatit (%)	Jalostusarvo
<i>Thraustochytrium sp.</i>	Alusta, jossa glyserolia	Ei	38.95	Ei	EPA ja DHA (Omega-3 -hapot 37.88% kokonaisrasvoista)
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Ruokomelassi	Ei	30-50	Ei	Monityydyttämättömiä rasvahappoja 36.89-49.16%
<i>Scenedesmus sp.</i>	Soijapapuöljy	53.3	33.4	Ei	EPA (15.89%)
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Muunneltu Alleen kasvualusta	26.5	1.14	69.1	Ravintokuituja (54.1%)
<i>Galdieria sulphuraria</i>	Muunneltu Alleen kasvualusta	32.5	1.77	62.9	Astaxanthin (575mg/kg)
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Ruokomelassi	Ei	Ei	Ei	Astaxnathin (56.1 mg/L)
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Ruokomelassi	Ei	30-50	Ei	Astaxnathin (13.6 mg/L)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	OHM-kasvualusta	Ei	Ei	Ei	Astaxnathin (>15 mg/L)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Puhdistettua jätevetettä	Ei	Ei	Ei	Astaxnathin (80 mg/L)
<i>Botryococcus braunii</i>	Ei	39.9	34.4	18.5	Tärkeitä aminohappoja (54.4g/100g proteiinia)
<i>Tetraselmis chuii</i>	Ei	46.5	12.3	25.0	Tärkeitä aminohappoja (45.5 g/100g proteiinia)

<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Ei	39.6	18.2	25.2	Tärkeitä aminohappoja (45.2 g/100g proteiinia)
<i>Porphyridium aerugineum</i>	Ei	31.6	13.7	45.8	Tärkeitä aminohappoja (63.9g / 100g proteiinia)

5.6 Mikrolevät ihmisravintona

Mikroleviä on käytetty Kiinassa, Japanissa, Afrikassa ja Meksikossa ruoka-aineina niiden suuren proteiinipitoisuuden vuoksi. Tähän päivään saakka *Chlorella* ja *Spirulina* -levälajien levät ovat myydyimpiä ruokaleviä, sillä ne kasvavat nopeasti. Erinäisissä tutkimuksissa on havaittu, että mikrolevät sisältävät ihmiselle antioksidantteja, β -1,3-glukaaneja, sekä eri vitamiineja. Näiden on todistettu hyödyntävän ihmisen immuunipuolustusta. Näitä leviä käytetään myös eri ruokatuotteissa väriaineina, sekä niistä on tuotettu erilaisia terveystuotteita. Gatamaneni Laganthan Bhalamurugan, Orsat Valerie & Lefsrud Mark, 2018, 231).

Yksi mikrolevän ongelmista ravintona on se, että niissä on suuri määrä nukleiinihappoa. Tämä metabolisoituu elimistössä ureahapoksi ja tämä voi aiheuttaa virtsakiviä. (Gatamani B. ym. 2018, 231).

5.7 Mikrolevät kalojen tai karjan ravintona

Viime vuosikymmeninä on lisääntyvissä määrin käytetty mikrolevää eläintenkasvatuksessa ruoanlähteenä. Tällä hetkellä noin 30% tuotetusta mikrolevästä käytetään eläinravintona. Mikrolevässä on suuria määriä proteiineja, joten niitä voidaan käyttää kalanruoan tai rehun lisäravinteena. Yleisimpänä levälajina on *Chlorella* -levälajin levät. (G Bhalamurugan. ym. 2018, 232).

On tutkittu, että mikrolevää voidaan käyttää kanankasvatuksessa myös lisäravinteena. *Chlorella* -levät tutkimusten mukaan edesauttavat kananpoikien kasvua, sekä levällä ei ole negatiivista vaikutusta kanamuniin tai kanoihin. Mikrolevät myös parantavat eläinten ruoansulatusta, immuunijärjestelmää, sekä tehostaa kasvua. (G Bhalamurugan. ym. 2018, 232).

5.8 Mikrolevät kosmetiikassa

Mikrolevien hyödynnys kosmetiikassa on kasvava trendi. Yksi yleisimmistä käyttökohteista mikrolevälle on ihorasvat. Tutkimustulosten mukaan *Spirulina sp.*, *Chlorella sp.* ja *Arthrospira sp.* -levät tehoavat ihon ikääntymistä, iho-ongelmia ja erilaisia ihon pigmentaatio-ongelmia vastaan. Aasiassa mikrolevästä valmistettuja ihotuotteita käytetään hyvin yleisesti, sillä on havaittu, että edellämainituilla levälajeilla on vaikutusta ihon melaniiniin, jolloin mikroleväpohjaiset voiteet käytännössä vaalentavat ihoa. Polysakkarideja, joita saadaan mikrolevästä voidaan hyödyntää hiustenhoitotuotteissa, sekä haavanhoitotuotteissa. (G Bhalamurugan, ym. 2018, 233).

5.9 Mikrolevät lääketieteessä

Mikrolevien hyödynnys on kasvava ala lääketieteessä. Yksi kiinnostuksenkohteista on suun kautta annettavien rokotteiden tuotanto mikrolevien avulla. *Chlamydomonas reinhardtii* -levälajista voidaan tuottaa erilaisia farmaseuttisia proteiineja kuten interferoni β insuliinia ja immunoglobuliini A:ta. *Chlorella* -levälajissa on suuria määriä B-vitamiinia, erityisesti B-12 -vitamiinia. (G Bhalamurugan, ym. 2018, 233).

TAULUKKO6: Eri levälajeja, joita hyödynnetään lääketieteessä. LÄHDE: G Bhalamurugan ym. 2018

Laji	Saadut materiaalit
<i>Chlorella sp.</i>	Luteiini, β -karoteeni, α -karoteeni, α -tokoferoli
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	Dokosaheksaeenihappo
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Karotenoideja, astaxnathin, luteiini
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Eikosapentaeenihappo
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Luteiini, β -karoteeni
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Glyseroli

5.10 Mikrolevien hyötykäyttö biodieselin tuotannossa

Biodieseliä voidaan tuottaa mikrolevistä saatavien rasvojen avulla. Triglyseroleja pidetään yleisesti tärkeimpänä komponenttina biodieselin tuotannossa. Tällä hetkellä biodieseliä tuotetaan kasvirasvoista, eläinrasvasta ja ylijäämä keittorasvasta. Mikrolevät voivat

sisältää jopa 80% rasvaa niiden kuivapainosta, jonka vuoksi niiden suosio biopolttoaineiden tuotannossa on kasvanut. Levän biomassaa voidaan käsitellä useilla eri menetelmillä biodieselin tuotannossa. Näitä ovat esimerkiksi biokemiallinen konversio, lämpökemiallinen konversio, kemiallinen reaktio, sekä levämassan polttaminen. Kemiallista prosessia, jossa mikrolevästä tuotetaan biodieseliä kutsutaan transesterifikaatioksi. (G Bhalamurugan ym. 2018, 234).

Mikrolevistä tuotetulla biodieselillä on korkea viskositeetti, korkea kaloripitoisuus ja se on tiheää verrattuna muista lähteistä tuotettuun biodieseliin. Mikrolevissä yleisesti ei ole rikkiä ja tämä vähentää päästöjä. *Scenedesmus sp.* -levälajeilla tehdyn tutkimuksen mukaan biodieseliä voidaan tuottaa 70°C -asteessa käyttäen 1:15 suhteessa 5% rikkihappoa. Tämä tuotti puhdasta biodieseliä noin 10 tunnin prosessin jälkeen. Biodieselin tuotanto on mikrolevillä kuitenkin toistaiseksi suhteellisen kallista. Geenitekniikan avulla pyritään kasvattamaan levämassan kasvua, jotta mikrolevän tuotantoa saadaan nostettua. Jos mikrolevää onnistutaan käyttämään laajasti biodieselin tuotannossa, niin se voi syrjäyttää perinteiset polttoaineet. Mikrolevillä on myös potentiaali tuottaa enemmän biodieseliä verrattuna muihin tuotteisiin. Jätteenä jäänyttä biomassaa voidaan myös hyödyntää eläinrehuna. (G Bhalamurugan ym. 2018, 234).

5.11 Mikrolevän hyödynnys bioetanolin tuotannossa

Bioetanolia voidaan tuottaa monista eri lähteistä. Tällä hetkellä bioetanolia tuotetaan sokerista ja tärkkelyksestä. Ongelmina tässä on se, että sokerin kasvattaminen vaatii paljon maa-alaa ja bioetanolin tuotanto joutuu kilpailemaan ruoantuotannon kanssa käytettävissä olevasta sokerista. Yleisimpiä levälajeja, joista voidaan tuottaa bioetanolia ovat *Chlorella sp.* -levälajin levät. *Chlorella Vulgaris* toimii erinomaisena lähteenä bioetanolin tuotannolle, sillä se sisältää suuria määriä tärkkelystä (37%). Tutkimusten perusteella bioetanolin tehokkuus on parhaimmillaan 30°C asteen lämpötilassa, jolloin bioetanolia syntyy noin 450 µmol/g levän kuivapainosta. Mikroleviä pidetään yleisesti sopivana materiaalina bioetanolin tuotannolle, mutta sen kaupallinen tuotanto ei ole käytössä. (G Bhalamurugan ym. 2018, 235).

5.12 Mikrolevän käyttö lannoitteena

Lannoitteiden tuotannon kustannukset ovat nousussa. Tällä hetkellä etsitään ratkaisuja, joissa voidaan korvata kemialliset lannoitteet biopohjaisilla lannoitteilla. Lannoitteiden toiminta perustuu niiden typpi- ja fosforipitoisuuksiin. Biolannoitteet ovat bakteereja, sieniä tai eri leviä, jotka pystyvät toimittamaan kasveille niiden tarvitseman typen. *Chlorella Vulgarista* on tutkittu lannoitekäytössä ja on huomattu, että se tehostaa kasvien itämistä. Se

myös nostaa huomattavasti kasvien klorofyllin määrää. Tutkimuksessa todettiin, että leviä voidaan käyttää kasviravinteina, sekä ne parantavat maaperän hedelmällisyyttä.

Maissinkasvatuksessa kokeiltiin yhdessä lehmänlantaa ja mikrolevää. Tutkimuksen lopputulena oli jopa 51,1% tehokkuus kasvien kasvussa verrattuna lannoittamattomampaan kasvustoon. (G Bhalamurugan ym. 2018, 235-236).

5.13 Päätelmiä

Chlorella Vulgaris -levälajin on todettu voivan olla mahdollinen levä, jota voidaan hyödyntää savukaasujen puhdistuksessa. Sillä myös voi olla potentiaalia eri kaupallisissa kohteissa.

Mikrolevän hyödynnys kaupallisessa käytössä on alkuvaiheessa. Sillä on kuitenkin potentiaalia kasvaa useiden miljardien arvoiseksi elinkeinotoiminnaksi. Mikrolevät tutkitusti voivat tuottaa määräänsä nähden enemmän biopolttoaineita kuin mikään muu polttoaineiden tuotannossa oleva raaka-aine. (G Bhalamurugan ym. 2018, 236.) Käyttökohteita on useita, mutta ala odottaa vielä uusia innovaatioita, jotta teknologian käyttökustannuksia saadaan laskettua.

6 LEVÄLAJIEN MENESTYMINEN SAVUKAASUISSA

6.1 Savukaasujen ja levälajien vertailua

Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin eri levälajien menestymistä erilaisten savukaasujen vaikutusten alaisena. Kokeiden tarkoituksena oli löytää kaupalliseen käyttöön soveltuvaa levälajia, jolla voidaan puhdistaa eri voimalaitosten savukaasuja. Kokeissa käytettiin sekä simuloitua savukaasua, että suoraan voimalaitoksista kerättyä raakaa tai puhdistettua savukaasua.

TAULUKKO7: Eri kasvatuskokeiden tuloksia. Lähde: G Huang, ym. 2015

Reaktori	Laji	Kaasun- lähde	CO ₂	SO ₂	NO _x	Lopputulema
Kilparata-reaktori	<i>Nannochloropsis sp.</i> ; <i>Phaeodactylum sp.</i>	Suoraan syötettyä savukaasua polttimesta	10-20%	70-90ppm	70-90ppm	Ei vaikuttanut levänkasvuun
Avoin kilparatareaktori	<i>Monoraphidium minutum</i>	Simuloitua savukaasua	13.6%	0.02%	0.015%	Mikrolevä puhdistaa tehokkaasti savukaasuja
Kuplaputkifotobioreaktori	<i>S.obliquus</i> SAG	Savukaasua 1600MW voimalaitokselta	4-5%	-	-	Biomassan tuotanto oli erittäin tehokasta näissä valobioreaktoreissa
Kilparata	-	Dieselpoltin	CO ₂ 10.6% CO 18.1ppm	0ppm	38.3ppm	Levälaji tuntematon, mutta tuloksina oli tehostettu savukaasun puhdistus
Putkibioreaktori	Merimikrolevä NOA-113	Simuloitu savukaasu	15%	0%	NO 330ppm	Mikrolevä puhdisti tehokkaasti hiilidioksidin

Putkibio-reaktori	<i>Chlorella sp. HA-1</i>	Savupii- pusta tul- lutta kaa- sua	10%	0%	NO 100 ppm	Bioreaktori osoitti hyvää yhteytysky- kyä
Kuplaput- kibiore- aktori	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Simuloitua savukaa- sua	15%	0%	100ppm	96% Typpioksidin poisto, ei vaiku- tusta levien kas- vuun
Kuplaput- kibiore- aktori	<i>Scenedes- mus sp.</i>	Savukaa- sua hiilivoi- man poltti- mesta	18%	200ppm	150ppm	Operaatiossa saa- vutettiin jopa 67% hiilidioksidin poisto, jos kasvuolosuh- teet saatiin pidettyä optimaalisina
Kuplaput- kibiore- aktori	<i>Chlorella sp.</i>	Simuloitua savukaa- sua	9.5-16.5%	280- 320ppm	100- 300ppm	pH:n säätelyllä huomattiin olevan vaikutusta siihen, kuinka paljon epä- puhtauksia levät sietävät
Kuplaput- kibiore- aktori	<i>Nannochlo- ropsis lim- netica</i>	Savukaa- sua	10%	25ppm	-	Levänkasvatus on- nistui
Lasista valmis- tettu kup- laputki- bioreak- tori	<i>Chlorella sp. MTF-15</i>	Savukaa- sua teräk- sen valmis- tuksesta	24%	25-30ppm	15- 20ppm	Chlorella sp. onnis- tui kasvamaan näissä olosuh- teissa
Avoin kasvatus- järjes- telmä	<i>Chlorella sp. P12</i>	Savukaa- sua maa- kaasun poltosta	6-8%	-	37ppm	50% hiilidioksidin poisto onnistui

Suljettu bioreaktori	<i>Spirulina platensis</i>	Voimalaitoksen savukaasua, josta puhdistettu rikki	12%	-	-	Bioreaktori onnistui poistamaan 2234kg hiilidioksidia vuodessa
Lasiputkisto	<i>S. Dimorphus</i>	Simuloitua savukaasua	15%	400ppm	NO 300ppm	Kasvualustaan lisättiin CaCO ₃ , sekä savukaasua sumutettiin järjestelmään. Mikrolevä kasvoi tehokkaasti alustassa.
Kromatografisen kasvatusjärjestelmä	<i>Spirulina platensis</i>	Simuloitua dieselgeneraattorin savukaasua	11%	0%	0%	Levänkäsytys onnistui
Avoin allasjärjestelmä	<i>Scenedesmus sp., Chlorella sp., Nitzschia sp., Chlamydomonas sp., Oocystis sp., Protoderma sp.</i>	Kaasua lietteenkuivausjärjestelmästä	7.5%	-	77ppm	Tässä kasvatuskokeessa levät kärsivät vahinkoa korkeiden ärsykepitoisuuksien vuoksi

Yllä olevasta taulukosta voidaan tarkastella eri levälajien menestystä vaihtelevissa olosuhteissa. Kokeiden perusteella voidaan päätellä, että levälajit menestyvät suhteellisen hyvin savukaasujen vaikutuksen alaisina. Ongelmina oli kasvatusalustan olosuhteiden hallinta, sekä levälajien kartoitus savukaasujen puhdistuksen soveltuvuuteen jatkuu vielä.

Mikroleväkasvatuksen massatuotannon onnistumiseksi levälajien etsintää jatketaan. Tutkimuksissa on havaittu, että voimalaitosten vesistöissä kasvavat levälajit sietävät

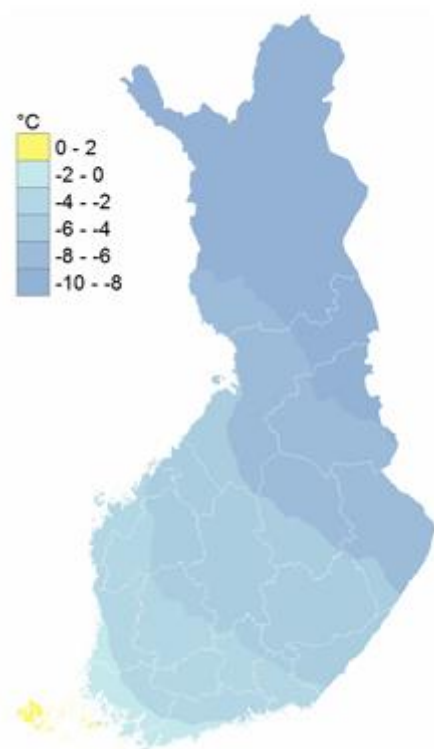
mahdollisesti jopa 18% CO₂ v/v -pitoisuuksia. Geenitekniikalla, sekä levälajien kartoituksella pyritään löytämään optimaalista levää, jota voidaan hyödyntää savukaasujen puhdistuksessa. (G Huang, ym. 2015, 18-20).

7 LEVIEN HYÖDYNNYSEDELLYTYKSET SUOMESSA

Suomessa levien kasvatukseen vaikuttaa useita eri tekijöitä. Näitä ovat muun muassa sääolosuhteet, käytettävien savukaasujen laatu, valon määrä vuodenaikojen vuoksi. Siksi onkin tärkeää mitoittaa kasvatusjärjestelmä Suomeen sopivaksi.

7.1 Suomen sääolosuhteen vaikutukset järjestelmiin

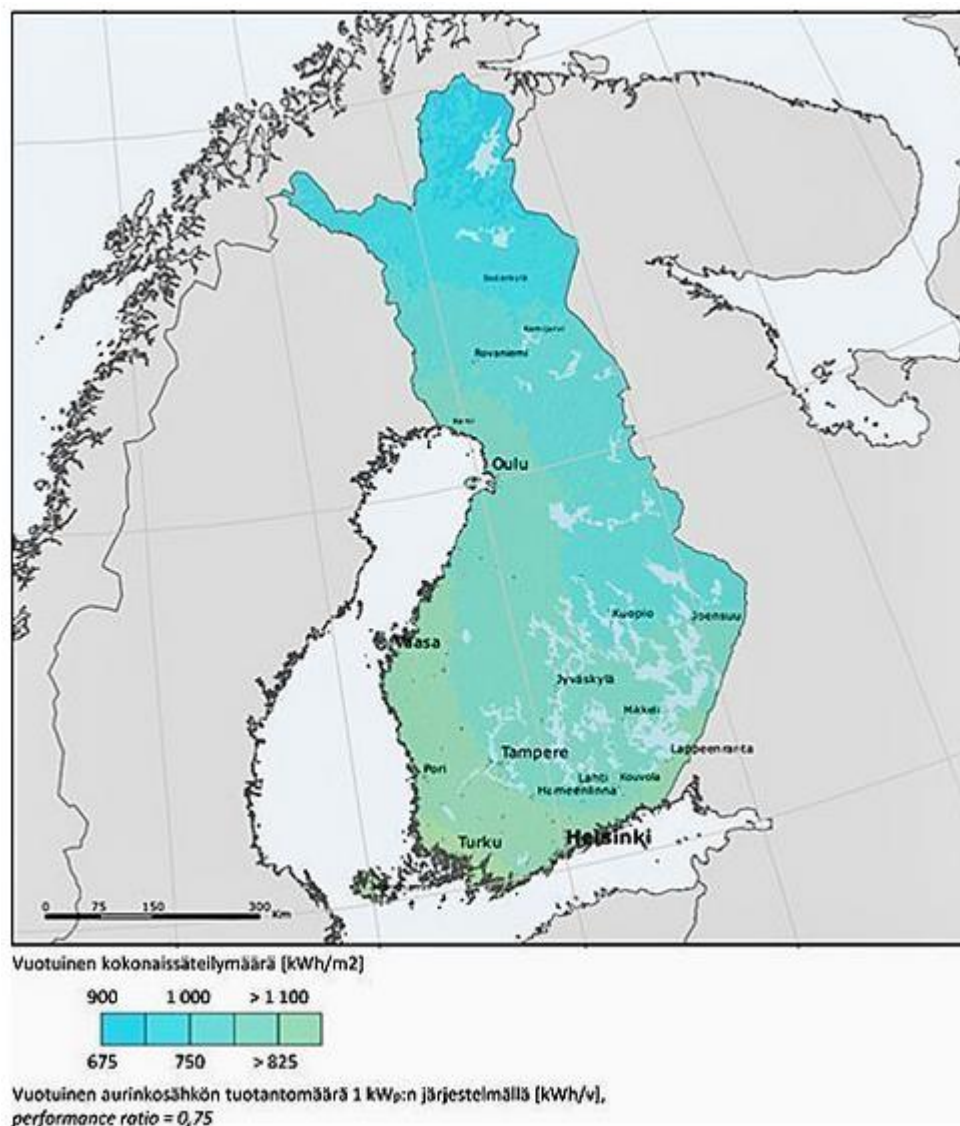
Suomen vaihtelevat ilmasto-olosuhteet aiheuttavat suuria haasteita levänkasvatukselle. Ulkotiloissa käytettävät avoimet ja suljetut kasvatusjärjestelmät altistuvat vaihteleville lämpöolosuhteille. Mikrolevien optimaalinen kasvulämpötila on noin 15-26°C. Tämän ylläpitäminen talviolosuhteissa on vaikeaa avoimille kasvatusjärjestelmille.



KUVA20: Suomen ylin lämpötila mitattuna 15.1. LÄHDE: Ilmatieteen laitos, 2019.

Lämpötilaa voidaan käytännössä pitää yllä suljetuissa ulkoilmoissa lämmittämällä kasvatusalustaa, sekä sisään syötettävä savukaasu nostaa vesimassan lämpötilaa. Lämmityskustannukset voivat kuitenkin nousta huomattavan korkeaksi, jolloin levänkasvatuksesta saatava hyöty voi olla minimaalinen kustannuksiin verrattuna. Seuraavana ongelmana lämpötilan ylläpitämiselle nousee tarvittavan valon määrä. Levämassan hapen tuotanto on suoraan verrannollinen fotosynteesistä aktiivisen säteilyn määrään. Kasvatuskokeissa saadut tulokset osoittavat, että optimaalinen levämassalle oleva määrä on noin 300 – 400

$W m^{-2}$. (J Doucha. ym. 2005, 406.) Valon intensiteetillä on myös merkitystä levämassan kasvuun.



KUVA21: Vuotuinen kokonaissäteily määrä Suomessa. LÄHDE: Motiva, 2020

Vuotuinen säteily määrä on pieni verrattuna Keski- ja Etelä-Euroopan vastaaviin lukemiin. Suomessa on siis haastavaa hyödyntää avoimia levänkasvatusjärjestelmiä savukaasujen puhdistuksessa, sillä järjestelmien tulisi toimia ympärivuotisesti. Järjestelmät tarvitsisivat todennäköisesti lisävalaistusta, sekä jatkuvaa lämpötilojen ylläpitoa, jolloin kustannukset voivat nousta jopa suljettuja järjestelmiä kalliimmiksi.

Sääolosuhteiden vuoksi avoimet järjestelmät, sekä horisontaaliset putkibioreaktorit ovat haastavia hyödynnettäviä Suomessa. Horisontaalisia putkibioreaktoreita voidaan hyödyntää myös sisätiloissa, mutta ne ovat optimaalisia ulkotiloissa niiden laajan pinta-alan

vuoksi, jolloin ne hyödyntävät tehokkaasti auringonvaloa. Sisävalaistuksessa täytyisi kat-
taa laaja pinta-ala, joka taas nostaisi tämän järjestelmän käyttökustannuksia.

Pystyputkibioreaktorit, paneelibioreaktorit, sekä säiliöbioreaktorit ovat sisätiloissa sopivia
järjestelmiä. Putkibioreaktoreissa ja paneelibioreaktoreissa voidaan hyödyntää myös au-
rionvaloa kasvatuksessa, mutta sääolosuhteiden puolesta tämä voisi olla osavuosit-
taista. Energiakustannuksia voi vähentää valaistuksen ja ilmastuksen suhteen esimerkiksi
erillisellä aurinkopaneelijärjestelmällä.

Säiliöbioreaktorit vievät suhteellisen laajan alan, sekä ne vaativat sisävalaistuksen johtuen
niiden suuresta pinta-alasta. Ulkoa tuleva valo ei pysty läpäisemään säiliössä olevia kaik-
kia leväkerroksia. (M. K Egbo, ym. 2018, 67.) Avoimia altaita on myös mahdollista raken-
taa sisätiloihin. Riippuen prosessin laajuudesta tarvittava pinta-ala, sekä valaistuksen te-
hokkuus voi olla huomattavan kallista.

Suljetut järjestelmät ovat myös helppoja hallita, prosessi ei kontaminoidu helposti ja hiilidi-
oksidihäviötä ei pääse syntymään. Tämä myös nostaa sisätiloissa käytettävän prosessin
turvallisuutta. (M. K Egbo, ym. 2018, 68).

Järjestelmiä vertaillessa ei Suomen sääolosuhteiden vuoksi ole paljoa vertailtavia vaihto-
ehtoja. Turvallisin, helpoin ja paras menetelmä on valita ja mitoittaa on suljettu järjes-
telmä. Yksi sääolosuhteiden hyöty voi olla kuitenkin jäähdytyskustannuksissa. Lämpötilo-
jen hallinnassa voidaan hyödyntää kylmää ulkoilmaa. Sisään syötettävä savukaasu läm-
mittää merkittävästi vesimassaa. Tätä voitaisiin kompensoida hyödyntämällä ulkoilmaa
varsinkin talvisin.

7.2 Savukaasut Suomessa

Tässä osiossa ei ole hiilivoimaloiden savukaasuja mukana, sillä Suomessa pyritään luo-
pumaan hiilen käytöstä vuoteen 2029 mennessä. (Yle. 2019) Vertailukohteena on hak-
keenpolton, sekä biokaasulaitoksen savukaasuja. Tässä tarkastellaan, onko näiden laitos-
ten savukaasuja mahdollista hyödyntää levänkasvatuksessa aikaisempien tutkimustulos-
ten perusteella.

7.2.1 Hakkeenpolton savukaasut

Ensimmäisenä mittauskohteena on 5MW kiinteän polttoaineen kattila. Mittaukset on suoritettu 2.2MW teholla, joka vastaa normaalia laitoksen tehoa. Polttoaineena käytettiin havukuori-, rankamurse- ja sorvinlastuseosta, jonka kosteus oli noin 60%. Seossuhteet olivat seuraavat: Havukuori 60%, rankamurske 20% ja sorvinlastu 20%.

O ₂	O ₂ %	CO ₂ %	CO ₂
	Epävarmuus		Epävarmuus
11,3	± 0,2 % -yks	9,6	± 0,2 % -yks

KUVA22: Hakkeenpolton happi- ja hiilidioksidipitoisuuksien keskimääräisiä tuloksia.
LÄHDE: XAMK 2018.

Komponentti	mg/m ³ (n)		mg/m ³ (n) redusoitu O ₂ = 6 %		mg/MJ	
		Epävarmuus		Epävarmuus		Epävarmuus
SO ₂	4,7	± 15 %	7,3	± 15 %	3,4	± 15 %
NO _x	156	± 15 %	242	± 15 %	114	± 15 %
Hiukkaset mittaus 1	94	± 15 %	146	± 15 %	69	± 15 %
Hiukkaset mittaus 2	95	± 15 %	147	± 15 %	69	± 15 %
Hiukkaset mittaus 3	93	± 15 %	144	± 15 %	68	± 15 %
Hiukkaset keskiarvo	94	± 15 %	146	± 15 %	69	± 15 %

KUVA23: Hakkeenpolton hiukkaspitoisuuksia normaalissa käyttötilanteessa. LÄHDE: XAMK 2018.

Toisena mittauskohteena on 12MW kiinteän polttoaineen kattila. Mittaukset ovat suoritettu normaalissa 6,5MW tehossa. Kattilan polttoaineena käytettiin puumurska/kuoriseosta. Seossuhteet olivat havukuori 65% ja puumurska 35%.

O ₂	O ₂ %	CO ₂ %	CO ₂
	Epävarmuus		Epävarmuus
7,3	± 0,2 % -yks	12,1	± 0,2 % -yks

KUVA24: Hakkeenpolton happi- ja hiilidioksidipitoisuuksien keskimääräisiä tuloksia.
LÄHDE: XAMK 2018

Komponentti	mg/m ³ (n)		mg/m ³ (n) reduoitu O ₂ = 6 %		mg/MJ	
		Epävarmuus		Epävarmuus		Epävarmuus
SO ₂	8,8	± 15 %	9,6	± 15 %	4,5	± 15 %
NO _x	123	± 15 %	135	± 15 %	64	± 15 %
Hiukkaset mittaus 1	43	± 15 %	47	15	22	± 15 %
Hiukkaset mittaus 2	43	± 15 %	47	± 15 %	22	± 15 %
Hiukkaset mittaus 3	31	± 15 %	34	± 15 %	16	± 15 %
Hiukkaset keskiarvo	39	± 15 %	43	± 15 %	20	± 15 %

KUVA25: Hakkeenpolton hiukaspitoisuuksia normaalissa käyttötilanteessa. LÄHDE: XAMK 2018

Typpi,- rikki,- ja hiilidioksidipitoisuudet molemmista mittauksista sopivat levänkasvatukseen. Puunpoltosta syntyy kuitenkin pienhiukkasia, jotka voivat olla haitallisia levänkasvatukselle. Tutkimusten mukaan puunpoltossa syntyy yli 100 eri yhdistettä, kuten klooria, alumiinia, sinkkiä ja fosforia. (Jarkko T. 2008, 23.) Jos puunpoltossa käytettävää savukaasua käytetään levän kasvatukseen täytyy sitä tarkkailla, jotta näitä yhdisteitä ei päädy kasvualustaan. Väärien yhdisteiden päätyemisellä leväalustaan voi olla peruuttamattomia vaikutuksia levään. Savukaasun puhdistuksella ennen sen hyödyntämistä levänkasvatukseen on elintärkeä vaikutus.

7.2.2 Biopolttoaineiden savukaasut

Mikrolevää voidaan hyödyntää biopolttoaineiden tuotannossa. Tutkimuksissa selvitettiin onko mahdollista tuottaa mikrolevää biopolttoaineiden savukaasuista, jolloin tuotannosta saataisiin kiertävä.

TAULUKKO 8: Keskimääräiset biopolttoaineiden savukaasujen yhdistepitoisuudet: LÄHDE: Andrew Miller. 2012.

	Happi (%)	Hiilidioksidi (%)	Hiilimonoksidi (ppm)	Typpiyhdisteet (ppm)	Rikkidioksidi (ppm)	THC (ppm)
<i>Dieseli</i>	1,9	13,4	2,2	110	16,9	0,70
<i>Soijabiodieseli</i>	1,4	13,6	2,7	110	4,4	-0,4

Eläinbio- diesel	1,7	13,5	3,1	110	3,1	-2,9
---------------------	-----	------	-----	-----	-----	------

Biopolttoaineiden savukaasuja voidaan hyödyntää mikrolevien kasvatuksessa. Polttoaineissa on suhteellisen korkea hiilidioksidipitoisuus, joka vaatii mahdollisesti sen käsittelyä ennen kasvualustaan syöttämistä riippuen kasvatettavasta levälajista. Biopolttoaineet sisältävät myös pienhiukkasia, kuten kalsiumia, sinkkiä, potassiumia, rautaa, silikonia, kuparia ja magnesiumia. (Andrew Miller. 2012, 6.) Tästä johtuen tämä savukaasu joudutaan puhdistamaan erikseen ennen sen lisäämistä kasvualustaan, jotta vältetään savukaasun aiheuttamat negatiiviset vaikutukset.

7.3 Levälajin valinta

Levälajin valinnassa onkin olennaista suunnitella se, kuinka levää hyödynnetään prosessissa ja sen jälkeen. Levälajeja on tuhansia erilaisia, joista osa on valikoitunut kaupalliseen hyödynnykseen. Levän koolla on merkitystä, sillä mitä kookkaampi levälaji sitä helpompaa ja halvempaa sitä on kerätä. On tärkeää myös tunnustaa hyödynnettävän savukaasun ominaisuudet. Jos savukaasuissa on esimerkiksi runsas määrä erilaisia solumyrkkyjä ja karsinogeeniä täytyy kerättyä levää tarkkailla jatkuvasti, jos sitä hyödynnetään ravintona. Tämä voi myös lisätä levänkasvatuksen kustannuksia. Levillä on myös erilaisia ominaisuuksia niiden selviämisen suhteen, kuinka herkkiä ne ovat pH:n ja ravinteiden muutoksille, jolloin prosessin suunnittelu on äärimmäisen tärkeää.

Levälajia valittaessa on tärkeä miettiä sen kasvutehokkuutta, yhteyttämispotentiaalia ja jatkojalostusmahdollisuuksia. Vihreitä leviä hyödynnetään esimerkiksi eläinten ja ihmisten lisäravinteina, sekä kosmetiikkateollisuudessa. *Chlorella sp.* -levälajit ovat yksi tutkituimmista levistä savukaasujen puhdistusta varten. Ne selviävät haastavissa olosuhteissa ja eivät ole herkkiä pH:n muutoksille kasvatusprosessissa.

Avoimen järjestelmän kasvatuskokeissa on havaittu, että savukaasuissa kasvatetussa levässä ei esiinny karsinogeenisiä materiaaleja, jos savukaasu suodatetaan ennen sen hyödyntämistä levän kasvatuksessa. Kasvatuksessa hyödynnettyä levää käytettiin karjan lisäravinteena. (J Doucha. ym. 2005, 410-411).

Scenedesmus sp. -levälajeja käytetään usein biopolttoaineiden tuotannossa. (G Bhalamugan. ym. 2018, 234.) Näitä voitaisiin käyttää esimerkiksi biopolttolaitosten savukaasujen puhdistuksen yhteydessä, jotta tuotannon ja hyödynnyksen välille saadaan kiertoratkaisu, jossa levästä tuotetaan polttoainetta, sekä polttoaineen hyödynnyksestä syntyvää savukaasua puhdistettaisiin käyttäen levää.

Levälajeja kartoitetaan yhä, sekä geenitekniikan avulla pyritään nopeuttamaan levien kasvua, sekä tehostamaan niiden selviytymistä haastavissa olosuhteissa. Tutkinta on laajaa, sillä kyseessä on suuri tuotannon ala tulevaisuudessa.

7.4 Hyödynnysmahdollisuudet Suomessa

Levillä on suuri hyödynnyspotentiaali. Ne tutkitusti puhdistavat tehokkaasti hiilidioksidia kasvualustastaan, sekä ne ovat kasvava trendi eri markkinoiden aloilla lääketieteestä ravintolisiin. Suomen siirtyessä pois kivihiilen käytöstä on leviä mahdollista hyödyntää esimerkiksi biopolttoaineiden tuotannossa, jolloin levät toimisivat sekä savukaasujen puhdistajana, että biopolttoaineen lähteenä.

Ongelmina levien hyödynnykselle on niiden vaativat kasvatusolosuhteet, sekä huomattavat kustannukset. Suomessa on erittäin haastavaa hyödyntää halvempia avoimia kasvatustjärjestelmiä, jonka vuoksi kustannukset ovat suhteellisen korkeita. Suomessa yksi suurimpia vaikuttavia tekijöitä levänkasvatukselle on vaihtuvat sääolosuhteet ja vähäinen aurionvalo, jonka vuoksi talvisin avoimien järjestelmien hyödynnys on vaativaa. Tämän vuoksi ympärivuotisen käytön ylläpitämiseksi savukaasujen puhdistukselle todennäköisesti täytyy päätyä käyttämään suljettuja sisätiloihin sijoitettuja järjestelmiä. Tällä hetkellä ala odottaa uusia innovaatioita, sekä uusia järjestelmiä, joilla voitaisiin alentaa kustannuksia ja nostaa prosessin tehokkuutta.

Suomessa syntyvät hakkeenpolton, sekä biopolttolaitosten savukaasut ovat tutkimusten mukaan soveltuvia levänkasvatukselle. Tärkeää on kuitenkin poistaa haitalliset yhdisteet savukaasuista, jotka voivat vahingoittaa mahdollisia levämassoja. Riippuen levälajista on tärkeää myös hallita savukaasun typpi-, rikki-, ja hiilidioksidipitoisuuksia, sillä toiset levät kestävät paremmin korkeampia pitoisuuksia kuin toiset.

Avainasemaan nouseekin hyödynnettävä levä, sekä kuinka levää hyödynnetään kasvatuksen jälkeen. Raskasyhdisteiden pääsy levään aiheuttaa vahinkoa levälle, sekä vähentää sen mahdollista jatkohyödynnysarvoa. Korkeat hiilidioksidipitoisuudet riippuen polttoaineesta eivät välttämättä sovellu jokaiselle levälle, vaan on tärkeää mitoittaa kasvatustjärjestelmä, sekä itse mikrolevän laji soveltuvaksi tietyn savukaasun käsittelyyn.

8 YHTEENVETO

Mikroleviä on mahdollista hyödyntää savukaasujen puhdistuksessa. Niillä on potentiaalisesti suuri markkina-arvo, ovat erinomainen ratkaisu kestävän kehityksen kannalta, sekä niillä on myös suuri kiertotalouteen liittyvä potentiaali. Mikrolevälajeja on useita tuhansia, joiden soveltuvuus tekniikkaan on yhä tutkimusten alla.

Ongelmina levänkasvatuksessa on sen mittavat kustannukset, sekä kasvatuksen haastavuus. Mikrolevät ovat herkkiä biologisia organismeja, joille täytyy pystyä tarjoamaan sopeva kasvuympäristö. Mikrolevien geenitekniikalla pyritään luomaan leviä, joiden kasvu on huomattavasti nopeampaa, sekä uutta tekniikkaa kasvatukseen kehitetään jatkuvasti.

Suomessa mikrolevät voisivat olla yksi ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämiselle ja voi olla yksi ratkaisusta hiilineutraaliustavoitteelle. Suomen ongelmana levän hyödynnyksessä on kylmät ja pimeät talvet, jotka rajoittavat huomattavasti ulkoaltaiden käyttöä. Sisätiloissa olevat bioreaktorit ovat lähtökohtaisesti kalliimpia, kuin ulkona sijaitsevat reaktorit.

Tutkimusten perusteella mikrolevät pystyvät hyödyntämään yli 50% syötetystä hiilidioksidista, sekä levämassat tarvitsevat tyypeä kasvaakseen. Onnistuneita kasvatuskokeita on myös suoritettu, joissa kasvatusjärjestelmä on integroitu voimalaitosten järjestelmiin. Kyseessä on kuitenkin olleet pilottitutkimukset, joiden avulla on kerätty tärkeää dataa, mutta tekniikan kustannukset ovat toistaiseksi korkeat, jotka eivät houkuttele investointeja alaa kohtaan.

Ala odottaa lisää rahoitusta, tutkimusta ja uusia innovaatioita, joilla voidaan tuottaa uusia menetelmiä tuotannolle. Järjestelmissä kehitetään uusia tapoja, joilla voidaan säästää kustannuksissa.

LÄHTEET

- Burkart Knospe. 2012. Flue Gas Analysis in Industry. 2nd Edition, TESTO. [viitattu 30.1.2020]
- Chris H, Paul N, Paul Z & Grek C. 2013. Implications of the Reuse of Captured CO2 for European Climate Action Policies. Netherlands: Ecofys. [viitattu 30.1.2020]
- Dietmar S, Karin A, Katrin B, Stefan B, Laura E, Andrea E, Manfred F, Justus G, Samuel H, Frank M, Karen P, Andreas P, Katja P, Clemens S, Julia T & Peter V. CO2 ReUse NRW – Final Report. [viitattu 29.1.2020] Berlin: Wuppertal Institute. Burkart K, Ulrich J. Flue Gas Analysis in Industry – 2nd Edition. [viitattu 30.1.2020] Testo
- Maria Lunkka-Hytönen, Katileena Lohtander-Buckbee & Marja Ruohonen-Lehto. 2013. Biotekniikan mahdollisuuksia ja sovelluksia [viitattu 4.2.2020]. Helsinki: SYKE.
- Sihen T, Filipa L, Rayen F, Didier D & Dominique P. 2014. CO2 Biofixation by Microalgae. Lontoo: ISTE. [viitattu 4.2.2020].
- Guanhhua H & Huan H. 2015. Current Techniques of Growing Algae Using Flue Gas from Exhaust Gas Industry: a Review. China University of Mining and Technology [viitattu 4.2.2020].
- Muhammad Imran K, Jim H-S & Jong D-K. 2018. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed and other products. PMC – online publisher. [Viitattu 10.2.2020]
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2018, Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2018 . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 11.2.2020].
Saatavilla: http://www.stat.fi/til/khki/2018/khki_2018_2019-05-23_kat_001_fi.html
- Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa. 2017. Suomen ympäristökeskus SYKE. [Viitattu 12.2.2020] Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ilman_epapuhtauksien_paastot
- Suomen kiertovoima ry. Savukaasujen puhdistusprosessit. 2013. Helsinki (JLV) [Viitattu 12.2.2020] Saatavilla: <http://vanha.jly.fi/jly6.php?treeviewid=tree1&nodeid=6>
- Euroopan Unionin lainsäädäntö. 2010. EUR-Lex. [Viitattu 12.2.2020] Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>

Casey M, Kyle D & Mikaela P 2018. Design of a flexible, high-volume direct flue gas-to-algae conversion process for value-added bioproducts. University of Pennsylvania. [viitattu 14.2.2020]

Raphael Slade 2013. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. Biomass and bioenergy: Volume 2013. [viitattu 17.2.2020]

JC Nzayisenga, Xavier Farge, S Groll & A Sellstedt, 2020. Biotechnology for biofuels. Artikkel 4. [viitattu 17.2.2020] Saatavilla:
<https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-019-1646-x>

Munonyedi E, Anthony O & Ikechukuwu O. 2018. Photobioreactors for microalgae cultivation – An Overview. Researchgate [viitattu 18.2.2020] Saatavilla:
<https://www.ijser.org/researchpaper/Photobioreactors-for-microalgae-cultivation-An-Overview.pdf>

Peter F Stanbury. 2017. Aeration and agitation. Principles of Fermentation Technology (3rd. Edition) ScienceDirect. [viitattu 18.2.2020] Saatavilla:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999531000090?via%3Dihub>

Singh Ramnarayan & Shalshav Sharma. 2012. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. Researchgate. [viitattu 19.2.2020]

Xing Zhang. 2015. Microalgae removal of CO₂ from flue gas. IEA Clean coal centre London. [viitattu 6.3.2020] Saatavilla:
https://usea.org/sites/default/files/042015_Microalgae%20removal%20of%20CO2%20from%20flue%20gas_cc250.pdf

Liam Brennan & Philip Owende. 2009. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. University College Dublin [viitattu 7.3.2020] Saatavilla:
https://www.academia.edu/8519254/Biofuels_from_microalgae_A_review_of_technologies_for_production_processing_and_extractions_of_biofuels_and_co_products_A_R_T_I_C_L_E_I_N_F_O

Teresa M. Mata & António Martins. 2012. Microalgae processing for biodiesel production. University of Porto [viitattu 8.3.2020] Saatavilla:
https://www.researchgate.net/publication/280728934_9_Microalgae_processing_for_biodiesel_production/link/5a0018cbaca272347a2b258c/download

Pei Han, Qian Lu, Liangliang Fan & Wenguang Zhou. 2019. A Review on the Use of Microalgae for Sustainable Aquaculture. Nanchang university. [viitattu 8.3.2020]

Angelo Paggi Matos. 2017. The impact of microalgae in food science and technology. Federal University of Santa Catarina. [viitattu 13.3.2020] Saatavilla:

https://www.researchgate.net/publication/320046902_The_Impact_of_Microalgae_in_Food_Science_and_Technology/link/59d3ec72a6fdcc181ad94a51/download

Gatamaneni Laganthan Bhalamurugan, Orsat Valerie & Lefsrud Mark. 2018. Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: A review. Department of Bioresource engineering. Quebec, Canada. Saatavilla:

<http://eeer.org/upload/eeer-23-3-229.pdf>

Jiri Doucha, Frantisek Straka & Karel Livansky. 2005. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella sp.*) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. Fuel Research Institute, Czech Republic.

Jarkko Tissari. 2008. Fine particle emissions from residential wood combustion. Kuopion yliopisto, Suomi.

Andrew Miller. 2012. Characterizing Emissions from the Combustion of Biofuels. US. Environmental Protection Agency, NC. Saatavilla:

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=191572

R Ramaraj, Y Unpaprom, N Dussadee, 2016, Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification, Researchgate. [viitattu 18.2.2020] Saatavilla:

https://www.researchgate.net/figure/Chlorella-vulgaris_fig2_300505269

Yuhua Duhan, Fan Shi. Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology, 2014. ScienceDirect. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/airlift-reactor>

Young-Lorenz, J, 2013, Portfolio analysis of carbon sequestration technologies and barriers to adoption. ResearchGate. Saatavilla: https://www.researchgate.net/figure/Horizontal-tubular-photobioreactor-microalgae-cultivation-system-and-biorefinery-at_fig31_327750644

Peter Lindblad, Alberto Conejero, David Fuente Herraiz, Narciso Alves Silva Couto, 2019. ResearchGate. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/333310409_CyanoFactory_a_European_consortium_to_develop_technologies_needed_to_advance_cyanobacteria_as_chassis_for_production_of_chemicals_and_fuels/download

Gour Gopal Satpati, Ruma Pal, 2018, Microalgae-Biomass to Biodiesel: A Review. ResearchGate. Saatavilla: https://www.researchgate.net/figure/Open-raceway-ponds-for-algal-cultivation-A-Raceway-pond-with-thick-dividing-section_fig1_329424285

Hakkeenpolton happi- ja hiilidioksidipitoisuuksien keskimääräisiä tuloksia. LÄHDE: XAMK 2018.

Hakkeenpolton hiukkaspitoisuuksia normaalissa käyttötilanteessa. LÄHDE: XAMK 2018.

Hakkeenpolton happi- ja hiilidioksidipitoisuuksien keskimääräisiä tuloksia. LÄHDE: XAMK 2018

Hakkeenpolton hiukkaspitoisuuksia normaalissa käyttötilanteessa. LÄHDE: XAMK 2018

CLIITTEET

KAAVA1:

$$M = \frac{Q_g \rho_{\text{CO}_2} C_{g,\text{in}}}{100}$$

KAAVA2:

$$\frac{M}{A} = \frac{R_{\text{CO}_2} + K_{L,\text{CO}_2} K_H (p_{\text{mean}} - p^+)}{(\text{Dec}/100)}$$