



Jenna Koskinen

Chlorella vulgaris -mikrolevän mahdollisuudet hiilensidonnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

13.3.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Jenna Koskinen
Otsikko:	<i>Chlorella vulgaris</i> -mikrolevän mahdollisuudet hiilensidon- nassa
Sivumäärä:	31 sivua
Aika:	13.3.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ympäristötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Kaj Lindedahl Projektipäällikkö Jenni Kurki-Suonio

Insinööriyön tavoitteena oli keskittyä *Chlorella Vulgaris* -mikrolevän mahdolliseen rooliin hiilensitojana ja potentiaalia ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Työssä tarkasteltiin mikrolevän kasvatusta, korjuuta ja käytännön sovellusmahdollisuuksia. Tarkoituksena oli arvioida, miten mikrolevää voidaan tehokkaasti hyödyntää hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä samalla tuottaen arvokasta biomassaa.

Insinööriyössä käsiteltiin mikrolevän kasvatusta, korjuuta ja käyttöä hiilensitojana. Työssä tarkasteltiin myös ympäristövaikutusten arviointia ja taloudellisia näkökohtia, jotka liittyvät mikrolevien käyttöön hiilinieluinä. Työssä tarkastellaan, miten näitä prosesseja voidaan optimoida ja soveltaa suuremmissa teollisissa mittakaavoissa. Insinööriyössä pohdittiin myös mahdollisia ratkaisuja ilmastonmuutoksen torjuntaan ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen mikroleväsovelluksissa.

Insinööriyön tulokset osoittavat, että *C. vulgaris* -mikrolevän hyödyntäminen hiiliensidonnassa tarjoaa keinon hallita hiilidioksidipäästöjä ja tuottaa arvokkaita sivutuotteita. Hyödyntämisessä on myös haasteita, kuten leväkannan ylläpito ja taloudellinen kannattavuus. Onnistunut hyödyntäminen edellyttää optimaalisten kasvatusolosuhteiden ymmärtämistä ja prosessin suunnittelua. Kehittämällä biomassan taloudellisesti kannattavaa korjuuta ja lisäämällä tutkimusta elinkaarianalyysin ja ympäristövaikutusten osalta, *C. vulgaris* voi tarjota potentiaalisen mahdollisuuden biologisena hiilensitojana.

Avainsanat: mikrolevä, hiilidioksidi, hiilensidonta, hiilinielu, ilmastonmuutoksen torjunta, kestävä kehitys

Abstract

Author: Jenna Koskinen
Title: *Chlorella vulgaris* - Opportunities in Carbon Sequestration
Number of Pages: 31 pages
Date: 13 March 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering
Professional Major: Environmental Engineering
Instructors: Kaj Lindedahl, Senior Lecturer
Jenni Kurki-Suonio, Project Manager

The aim of this thesis was to focus on the potential role of *Chlorella Vulgaris* microalgae as a carbon sink and its potential in mitigating climate change. The study examined microalgae cultivation, harvesting, and practical applications. The aim was to assess how microalgae can be effectively utilized to remove carbon dioxide from the atmosphere while simultaneously producing valuable biomass.

The thesis addresses microalgae cultivation, harvesting, and utilization as a carbon sink. It also examined environmental impact assessment and economic aspects related to the use of microalgae as carbon sinks. The thesis explores how these processes can be optimized and applied on a larger industrial scale. It also discusses potential solutions for climate change mitigation and reducing carbon dioxide emissions in microalgae applications.

The results of this thesis demonstrate that the utilization of *C. vulgaris* microalgae in carbon sequestration provides a way to manage carbon dioxide emissions and generate valuable by-products. However, there are challenges in utilization, such as maintaining algal culture and ensuring economic viability. Successful utilization requires understanding optimal cultivation conditions and process design. By developing economically viable biomass harvesting and expanding research on life cycle analysis and environmental impacts, *C. vulgaris* could provide a potential opportunity as a biological carbon sink.

Keywords: microalgae, carbon dioxide, carbon sequestration, carbon sink, climate change mitigation, sustainable development

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hiilinielut	1
3	Hiilensidonta ja -talteenotto	3
3.1	Hiilidioksidin talteenotto	4
3.2	Hiilidioksidin erotusmenetelmät	5
3.3	Hiilidioksidi levänkasvatuksessa	7
3.4	Chlorella vulgaris hiilensidonnassa	8
4	Mikrolevän kasvatus	9
4.1	Autotrofinen viljely	11
4.1.1	Avonaiset altaat	11
4.1.2	Suljettu fotobioreaktori	11
4.2	Heterotrofinen viljely	12
4.3	Miksotrofinen viljely	12
5	Biomassan korjuu	12
5.1	Sentrifugointi	13
5.2	Flokkulaatio	14
5.3	Flotaatio	15
5.4	Suodatus	16
6	Konversio ja tuotteet	16
6.1.1	Bioenergia	16
6.1.2	Muut sovellukset	18
7	Ympäristövaikutukset ja talous	19
7.1	Mikrolevän elinkaariarviointi	20
7.2	Hiilidioksidin kierrätys	20
7.3	Taloudellinen kannattavuus	22
8	Teollinen mittakaava	24

8.1	Levätuotantoa polttolaitoksilla	24
8.2	Festo BionicCellFactory	26
9	Johtopäätökset	27
	Lähteet	29

Lyhenteet

- CA: Hiilihappoanhydraasi. Entsyymi, joka katalysoi hiilidioksidin muuttamisen hiilidioksidianioniksi.
- CCUS: *Carbon capture, utilization, and storage*. Hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi
- CLC: *Chemical looping combustion*. Kemikaalikiertopoltto, jossa metallioksidit toimivat hapen kantajina
- COD: *Chemical Oxygen Demand*. Kemiallinen hapenkulutus.
- DAC: *Direct air capture*. Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmasta.
- DEA: Diethanoliamiini. Kemiallinen yhdiste, joka on myös käytössä hiilidioksidin poistamisessa kaasuseoksista.
- LCA: *Life cycle assesment*. Elinkaariarviointi, menetelmä ympäristövaikutusten arvioimiseksi tuotteen, prosessin tai palvelun koko elinkaaren aikana.
- MEA: Monoetanoliamiini. Kemiallinen yhdiste, jota käytetään hiilidioksidin poistamiseen kaasuseoksista, kuten savukaasuista.
- MOF: *Metal organic frame*. Metalliset orgaaniset kehykset.
- RFC: *Residual Fuel Consumption*. Jäännöspolttoaineen kulutus.
- RPM: *Rounds per minute*. Kierrosta minuutissa, yleinen mittayksikkö moottorien ja laitteiden pyörimisnopeuksien ilmaisemiseen.

1 Johdanto

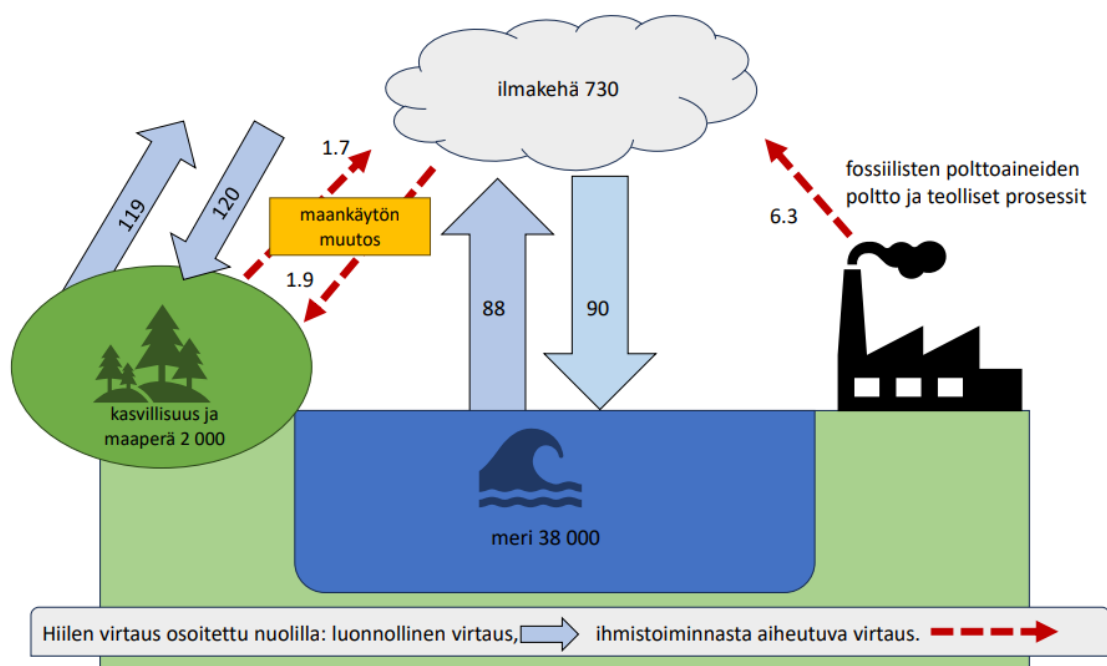
Ilmastonmuutos on yksi suurimmista globaaleista haasteista, jonka ratkaisemiseksi tarvitaan innovatiivisia ja kestäviä lähestymistapoja. Yksi tärkeä näkökulma tähän on hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja hiilinielujen luominen. Hiilinielut ovat ekosysteemejä tai teknisiä ratkaisuja, jotka kykenevät sitomaan ilmakehästä hiilidioksidia ja varastoimaan sitä [1]. Yksi varteenotettava tekniikka tässä yhteydessä on mikrolevän hyödyntäminen biologisena hiilinieluna.

Mikrolevät ovat pieniä yksisoluisten levien ryhmiä ja ne tunnetaan kyvystä sitoa hiilidioksidia fotosynteesin avulla. Mikrolevä kasvaa nopeasti ja voi olla varteenotettava vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen talteenottoon erilaisissa ympäristöissä, muun muassa teollisissa prosesseissa, jätevedenpuhdistamoissa ja energiantuotantolaitoksilla. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia erityisesti *Chlorella vulgaris* -mikrolevän potentiaalia hiilinieluna ja tarkastella siihen käytettäviä kasvatus- ja korjuumenetelmiä. Lisäksi työssä käydään läpi erilaisia tekniikoita, joilla mikrolevän kykyä toimia hiilensitojana voidaan optimoida, ja miten sitä voidaan soveltaa käytännön toteutuksissa.

2 Hiilinielut

Hiilinielut poistavat aktiivisesti hiilidioksidia ilmakehästä ja varastoivat sitä. Ne ovat keskeisessä roolissa luonnollisen hiilen kiertokulun kannalta sekä vielä korostetusti ihmisten teollisen maailman hiilipäästöjen hallinnassa. Maailmanlaajuisesti kaksi merkittävintä hiilinielua ovat kasvillisuus ja valtameret. Hiilinielut ovat tärkeä osa maapallon hiilen kiertokulkua, ja niiden toiminta vaikuttaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen. Kansainvälisesti tarkasteltuna hiilinielujen (kuva

1) rooli ilmastonmuutoksen kannalta on äärimmäisen tärkeä. [1.]



Kuva 1. Maailmanlaajuiset hiilen kierto ja hiilivarastot arvioituna vuosittain (miljardia tonnia hiiltä/vuosi) [1].

Hiilinielut toimivat pääosin kahdella eri tavalla: fotosynteesin kautta kasveissa tai merien kyvyssä liuottaa hiilidioksidia veteen. Fotosynteesi on biokemiallinen prosessi, jossa kasvit, mukaan lukien levät ja puut, käyttävät auringonvaloa energianlähteenään, sekä vettä ja hiilidioksidia ravintona tuottaakseen orgaanisia yhdisteitä. Prosessin yhteydessä ne vapauttavat samalla happea ilmakehään ja muuntavat ilman hiilidioksidin kasvien biomassaksi, joka kertyy puustoon ja muihin kasvien osiin. Tämä tekee kasveista ja etenkin myös meressä kasvavista levistä merkittäviä hiilinieluja, jotka auttavat säätelemään ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Meri kykenee liuottamaan hiilidioksidia meriveteen, jolloin muodostuu hiilihappoa ja bikarbonaatti-ioneja. [1.]

Mikrolevä voi toimia hiilinieluna useilla tavoilla. Mikrolevä käyttää fotosynteesiä sitoakseen hiilidioksidia ympäristöstä ja muuntaakseen sen orgaaniseksi hiileksi ja osaksi omaa biomassansa. Useat mikrolevälajit kasvavat nopeasti, ja ne voivat kaksinkertaistaa biomassansa vain 4–6 tunnissa. Tämä mahdollistaa suuren määrän hiilidioksidin sitoutumista hyvin lyhyessä ajassa. Mikrolevä

sopeutuu erilaisiin ympäristöolosuhteisiin ja pystyy kasvamaan haastavissakin olosuhteissa. Tämän lisäksi mikrolevällä on korkea fotosynteesitehokkuus, ja se pystyy sitomaan jopa 1,83 kg hiilidioksidia jokaista kuivaa biomassakilogrammaa kohden. Fotosynteettisen tehokkuuden ansiosta mikrolevä kykenee tuottamaan 30 kertaa enemmän öljyä yksikköalaa kohden verrattuna maaperän öljysiemenkasveihin. Hiilidioksidin sitomisen kannalta on hyvä valita nopeasti kasvava mikrolevä, jolla on erityisen korkea hiilidioksidin sitomistehokkuus. Näitä lajeja ovat esimerkiksi *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* ja *Spirulina*. [2, s. 187.]

Tyypillisesti mikrolevän kasvatuksen tuotantokustannukset ovat kalliita ja yksi isoin haaste on kustannusten alentaminen. Kustannukset ovat korkeita esimerkiksi energiantensiivisten prosessien, kuten sadonkorjuun ja kuivauksen, osalta. Mikrolevän kasvatusta energiantuotantojärjestelmään yhdistettynä jätevedenkäsittelyyn tai öljypohjaisiin voimalaitoksiin on yksi keino taloudellisesti tehokkaaseen prosessiin. [2, s. 188.]

3 Hiilensidonta ja -talteenotto

Maanpäälliset kasvit sitovat tällä hetkellä noin 52 % maapallon biosfäärin hiilidioksidista, kun taas meren kasviston osuus on 45 – 50 %. Vaikka levät ovat kooltaan pieniä, niillä on lyhyen elinkaaren ansiosta tehokas kyky sitoa hiilidioksidia. Levät kykenevät tehostamaan hiilidioksidin vähentämistä ilmakehästä, jos niille tarjotaan optimaaliset kasvuolosuhteet, kuten sopiva lämpötila, riittävästi ravinteita ja tarpeeksi auringonvaloa. Hiilensidontan lisääminen on olennaista, sillä se voi tehokkaasti vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta ja siten hidastaa ilmaston lämpenemistä, tarjoten samalla lupaavan lähestymistavan ilmastomuutoksen torjumiseksi. [3, s. 4.]

Termillä ”mikrolevä” viitataan yleisesti prokaryoottisiin sinileviin (syanoobakteerit) että eukaryoottisiin mikroleviin, mukaan lukien viherlevät, punalevät ja piilevät. Mikrolevät pystyvät hiilidioksidin keskittämismekanismiin, joka mahdollistaa tehokkaan fotosynteesin hankkimalla epäorgaanista hiiltä hyvinkin alhaisista

ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksista. Nämä mikro-organismit erottuvat muista raaka-aineista, sillä ne sietävät äärimmäisiä ja yksinkertaisia ravinnevaatimuksia. Mikrolevät eivät tarvitse suuria pinta-aloja viljelykelpoista maata, ja ne pysyvät selviytymään paikoissa, joissa muut kasvilajit eivät voi elää, kuten suolaisissa sekä emäksisissä vesissä, maissa ja jätevesissä. Mikroleville voidaan antaa ravinnoksi esimerkiksi hiilidioksidia, typpeä ja fosforia. [4, s. 2.]

3.1 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi, (Carbon capture, utilization and storage, CCUS) on nousemassa keskeiseksi toimenpiteeksi ilmastonmuutoksen torjunnassa. Tämä on seurausta ymmärryksen kasvusta siitä, että perinteiset kasvihuonekaasujen vähentämistoimenpiteet eivät välttämättä riitä hillitsemään ilmaston lämpenemistä. Sen sijaan on tarpeen pyrkiä negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin, eli ottaa ilmakehästä hiilidioksidia talteen enemmän kuin sitä vapautuu ilmastonmuutoksen torjuntaan käytettävien tekniikoiden elinkaaren aikana. [5.] CCUS-tekniikoiden kehitystä ovat edistäneet kansainväliset ja valtioiden omat poliittiset toimet. Esimerkiksi Pariisin ilmastopimuksen tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu alle 2 °C:seen ennalta määrättyllä tarkkuudella, mikä edellyttää hiilidioksidipäästöjen vähentämistä ja hiilidioksidin talteenoton edistämistä. [6, s. 10.]

Euroopan unionin vuoden 2050 hiilineutraalisuustavoite ja vihreä siirtymä ovat puolestaan lisänneet hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin teknologista edistymistä EU:ssa. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon capture and storage, CCS) -menetelmät, jotka aiemmin herättivät toiveita ilmastonmuutoksen torjumisessa, on kyseenalaistettu taloudellisten haasteiden ja pitkän aikavälin ympäristövaikutusten epävarmuuden vuoksi. [7, s. 11.] Vaihtoehtoisesti hiilidioksidin biologinen talteenotto mikrolevien avulla voisi tarjota mahdollisuuden kierrättää hiilidioksidia, jota syntyy esimerkiksi voimalaitoksista, ajoneuvoista, orgaanisen aineen hajoamisesta sekä metsäpaloista. Tämän lisäksi mikrolevien avulla hiilidioksidia voidaan sitoa ja muuntaa biomassaksi, jota voidaan käyttää

raaka-aineena lipidien tuottoon, bioenergiana ja arvokkaiden tuotteiden valmistukseen. [8, s. 9.]

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin edistäminen on tärkeää, koska se mahdollistaa hiilidioksidipäästöjen vähentämisen teollisuusprosesseissa, kuten sähkötuotannossa ja teollisuudenalalla. CCUS-tekniikat tarjoavat myös mahdollisuuden hyödyntää talteen otettua hiilidioksidia uusiutuvien polttoaineiden valmistuksessa ja edistävät siten uusiutuvan energian käyttöä. Lisäksi hiilidioksidin varastointi maanpinnan alapuolelle on tehokas tapa estää hiilidioksidin pääsyä ilmakehään ja siten hidastaa ilmaston lämpenemistä. [9.]

3.2 Hiilidioksidin erotusmenetelmät

Hiilidioksidin erotusmenetelmät voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin: absorptio ja adsorptio, kemikaalikiertopoltto, kryogeeninen tislaukset sekä suora ilman talteenotto (Direct air capture, DAC). Menetelmien tunnistaminen on tärkeä osa prosessin suunnittelua, jossa hyödynnetään talteen otettu hiilidioksidi mikrolevän kasvatuksessa. [10.]

Yleisimmin käytetty menetelmät ovat absorptio ja adsorptio. Kemiallinen absorptio perustuu ilmiöön, jossa molekyylit, ionit tai atomit sitoutuvat nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen. [11, s. 3.] Adsorptiossa puolestaan kiinteää adsorbenttia, kuten kalsiumoksida, aktiivihiiltä tai zeoliittejä, käytetään hiilidioksidin kiinnittämiseen ja sen jälkeen paineen muutoksen avulla irrottamiseen. Tämä mahdollistaa hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin. [12.]

Kemikaalikierron poltossa (chemical looping combustion, CLC) metallioksidit toimivat hapen kantajina. Tässä prosessissa metallioksidi pelkistyy metalliksi ja polttoaine hapettuu hiilidioksidin ja vesihöyryn seokseksi. Metallioksidit, kuten rauta(III)oksidi, mangaani(III)oksidi ja kupari(II)oksidi, voivat pelkistyä ja hapettua uudelleen, mikä tekee tästä menetelmästä taloudellisesti kannattavan. [13, s. 13.]

Kryogeeninen tislaukset perustuu eri kiehumispisteisiin. Tässä menetelmässä ilma-kehästä kerätään ilmaa, joka tiivistetään ja muutetaan nesteeksi. Koska kaasujen kiehumispisteet eroavat toisistaan, ne voidaan erottaa tislaamalla. Tämä menetelmä vaatii kuitenkin paljon energiaa matalien lämpötilojen vuoksi. [14.]

Membranitekniikkaa voidaan käyttää hiilidioksidin erottamiseen muista ilmakehän kaasuista. Puoliläpäisevien kalvojen avulla hiilidioksidi siirtyy kalvon läpi, kun taas muut kaasut pysyvät kalvon toisella puolella. Membraanit ovat energia- tehokkaita ja edullisia käyttää, vaikka niiden likaantuminen ja ilman alhainen hiilidioksidipitoisuus voivat olla haasteita. [15.] Näiden menetelmien lisäksi tutkimus ja kehitys ovat johtaneet uusien kalvomateriaalien, kuten metalliorganisten kehysten (Metal organic frame, MOF), kehittämiseen mikä mahdollistaa hiilidioksidin talteenoton optimoinnin. [16.]

Hiilidioksidin talteenottomenetelmiä voidaan käyttää hiilidioksidipäästöjen syntymisprosessin eri vaiheissa, riippuen siitä, milloin ja miten hiilidioksidi otetaan talteen. Taulukossa 1 on esitelty lyhyesti erilaisia hiilidioksidin talteenottomenetelmiä, niiden toimintaperiaatteita, hyötyjä ja haasteet. Näiden lisäksi fyysisen ja kemiallisen hiilidioksidin talteenoton rinnalla voidaan hyödyntää biologista reittiä hiilidioksidin talteenotossa luonnollisten hiilinielujen (metsityksen, metsittämissen, viljelyn) avulla. [3, s. 3.]

Taulukko 1 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät [3].

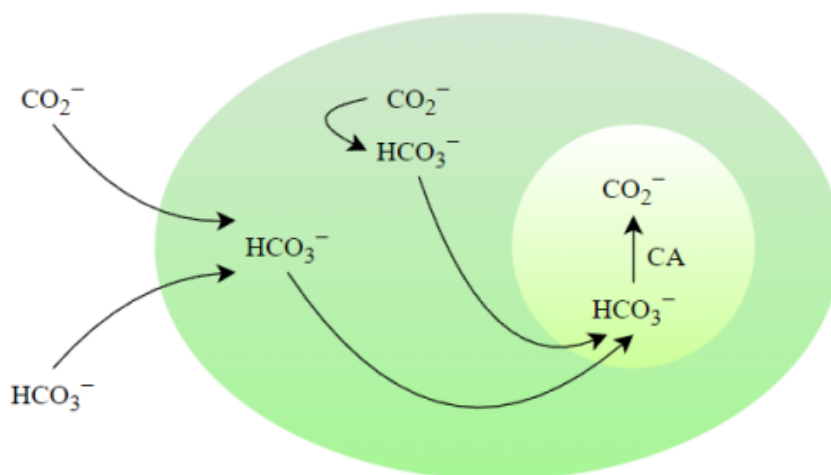
Menetelmät	Hyödyt	Haasteet
Adsorptio (kiinteät adsorbentit)	Vähän jätettä	Energiankulutus
Metal organic frame (MOF)	Korkea hiilidioksidi liukoisuus	MOF-jauheet rakenteellisesti heikkoja, hankala käsitellä
Kemiallinen absorptio	Ympäristöystävällinen vaihtoehto	Korkea liuoksen haihtumisriski ja energiankulutus
Hiilidioksidin varastointi (maan alla)	Suuri varastointikapasiteetti	Korkea toimintakustannus, hiilidioksidin vuoto- ja ympäristöriski

Biologinen CO ₂ :n talteenotto (mikrolevät)	Korkea tehokkuus laajalla hiilidioksidi pitoisuudella	Kustannukset kasvuprosessista, jälkikäsittely
Kalvoteknologia	Korkea erotustehokkuus ja pakkaustiheys	Energiankulutus ja kalvokustannukset

3.3 Hiilidioksidi levänkasvatuksessa

Teollisuuden päästökaasut voivat sisältää 10–20 % hiilidioksidia ja leväkasvatuksen yhdistäminen prosessiin mahdollistaisi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja tehokkaamman reitin biologiseen hiilidioksidin talteenottoon. Savukaasujen puhdistamiseen sopivalla levällä tulisi olla korkea hiilidioksidin sietokyky. *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) -mikrolevälaji on todettu soveltuvaksi tähän tarkoitukseen. [2, s. 188.]

Kuvassa 2 esitetään yksinkertaisesti, miten mikrolevä hyödyntää hiilidioksidia. Ensimmäisenä epäorgaaninen hiili absorboituu ympäristöstä ja tämän jälkeen hiilidioksidi ja vetykarbonaatti (HCO_3^-) kulkeutuu levän kasvisolujen viherhiukkasiin. Epäorgaaninen hiili kulkeutuu tylakoidikalvon läpi ja muuttuu hiilidioksidiksi hiilihappohydraasin (CA) avulla, jonka vaikutuksesta hiilidioksidipitoisuus lisääntyy rubisco-entsyymien lähellä kiihdyttäen fotosynteesiä. Mikrolevä vastaanottaa HCO_3^- :n aktiivisen kulkeutumisen kautta ja hiilidioksidin passiivisen kulkeutumisen kautta. CA säätelee hiilidioksidi ja HCO_3^- -pitoisuuksia oikean pH-arvon ylläpitämiseksi. [17, s. 4–5.]



Kuva 2. Hiilidioksidin sitominen kasvisolujen sisällä osaksi levän biomassaa. [17.]

3.4 *Chlorella vulgaris* hiilensidonnassa

C. vulgaris on osoittanut hyviä tuloksia hiilidioksidin sitojana, sillä sen fotosynteesitehokkuus voi ylittää tavallisten kasvien tehon jopa 10–20 % [18, s. 3]. Venäläiset tutkijat Politaeva ym. hyödynsivät fotobioreaktoria kasvatusympäristönä, jonka seurauksena *C. vulgaris* osoitti huomattavaa kykyä sitoa hiilidioksidia. Fotobioreaktoriin lisättiin aluksi 50 l mikroleväkasvatusta, ja jäljelle jäävä 50 l täytettiin kaasun ja ilman seoksella, jossa oli korkea hiilidioksidi pitoisuus. Hiilidioksidia lisättiin päivittäin ilmaisimien kautta 7,5–17,5 l (15–39 %) fotobioreaktoriin vapaasta tilavuudesta. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että *C. vulgaris* saavutti huippunopeuden hiilidioksidin sitomisessa ja pystyi sitomaan hiilidioksidia 0,412 grammaa litraa kohti päivässä. Lisäksi se pystyi hyödyntämään 8,125 litraa hiilidioksidia yhden päivän aikana. Muut olosuhteet on eritelty taulukossa 2. [17, s. 1.] Tämä osoittaa *C. vulgariksen* potentiaalinen tehokkaana hiilidioksidin sitojana, mikä voi olla ratkaiseva tekijä pyrittäessä vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia.

Taulukko 2. *C. vulgarixen* olosuhteet fotobioreaktorissa [17].

Lämpötila (T)	Valaistuksen Voimakkuus (O)	CO ₂ Tilavuus (V)	Suurin CO ₂ :n sitomisnopeus (g/l/päivä)	Suurin CO ₂ :n käyttö 1 päivässä (I)
30 °C	3000 Lx	7,5-17,5 L (15-39 %)	0,412	8,125

4 Mikrolevän kasvatusta

Kun hiilidioksidia erotellaan ja otetaan talteen, sitä on mahdollisuus hyödyntää mikrolevien kasvatuksessa. Tämä käytäntö edistää viljelyjärjestelmien kasvunopeutta, parantaa hiilidioksidin kiertoa ja tehostaa biomassan laatua ravintoarvojen suhteen. [8, s. 4.] Mikrolevien kasvualustan on tarjottava epäorgaanisia ravinteita, jotka muodostavat levien solut. Olennaisia ravinteita ovat typpi (N), fosfori (P), rauta ja joissakin tapauksissa pii. Minimaalet ravinnevaatimukset voidaan arvioida käyttämällä likimääräistä mikroleväbiomassan molekyylikaavaa $CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}$.

Mikrolevä kasvaa nopeasti ja reagoi jokaiseen muutokseen kasvuolosuhteissa ja täten tiettyyn haluttuun saantoon kuten lipidien ja tärkkelyksen pitoisuuden biomassassa. Epäsuotuisilla olosuhteilla viitataan esimerkiksi typpi- ja fosforirajoitukseen, liian korkeaan hiilidioksidipitoisuuteen, liiallinen altistuminen valolle, korkeaan rautapitoisuuden kasvualustassa tai lämpötilan vaihteluun. *C. vulgaris* on ihanteellinen tuotantoon, koska se on huomattavan resistentti epäsuotuisille olosuhteille. Epäsuotuisissa kasvuolosuhteissa lipidien ja tärkkelyksen pitoisuudet kasvavat, samalla kun biomassatuottavuus vähenee tai pysähtyy kokonaan. Toisaalta proteiinipitoisuus saadaan kasvamaan optimaalisissa kasvuolosuhteissa ja siksi kasvutekniikoiden kokeiluissa on tavoitteena lisätä biomassan tuottavuutta, lipidien, proteiinien, hiilihydraattien ja pigmenttien sisältöä. [19, s. 3.]

Taloudellisesti kannattavalle tuotannolle löytyy myös haasteita, joista yksi on eristyskyky ja leväkannan optimaalinen ylläpito. Tämä johtuu siitä, että levien kasvuympäristöt voivat olla herkkiä saasteille ja muuttuvat nopeasti ja ravinnon hankinta ja käyttö mikrolevälle voivat olla ongelmallisia, kun otetaan huomioon vesien rehevöityminen ja ravinteiden lisääntyminen. [20, s. 1.] Tuotannon hallinta, sadonkorjuu ja sivutuotteiden kehittäminen ovat myös merkittäviä haasteita. Mikrolevän kasvatusolosuhteiden optimointi vaatii tarkkaa seuranta ja hallintaa. Biomassan korjuu ja säilytys voi olla vaikeaa, sillä mikrolevä on usein hajanaista ja haurasta ja tämän lisäksi polttoaineen uuttaminen ja jalostaminen edellyttävät kehitystä menetelmissä, joissa taloudellisuus säilyy. [20, s. 2.]

Vaikka mikrolevä voivat kasvaa alueilla, jotka eivät sovellu perinteiselle maataloudelle, niiden käyttöön liittyy silti ympäristövaikutuksia. Taulukossa 3 on eriteltyä etuja ja haasteita mikrolevän hyödyntämisessä. Levien kasvatus saattaa vaikuttaa paikallisiin ekosysteemeihin ja vesien tilaan. Jäännösmassan hyödyntäminen on myös keskeinen kysymys, joka vaatii kestäviä ratkaisuja. [20, s. 2.]

Taulukko 3. Mikrolevän hyödyntämisen edut ja haasteet [20].

Edut	Haasteet
Korkeat kasvunopeudet ja öljypitoisuus	Kannan eristäminen
Kasvavat laajasti erilaisissa vesiympäristöissä	Ravinnelähteiden hankinta ja hyödyntäminen
Tehokas hiilidioksidin käyttö ja sitominen	Tuotannon hallinta
Nopea biomassan tuotanto	Biomassan korjuu
Monipuolinen alalajien valikoima	Sivutuotteiden kehittäminen
Vähäinen ympäristövaikutus verrattuna maaperän kasveihin	Polttoaineen uuttaminen
Kyky kasvaa alueilla, jotka eivät sovellu maatalouteen	Jalostaminen
Mahdollisuus ravinteiden poistoon vesistä	Jäännösmassan hyödyntäminen

4.1 Autotrofinen viljely

Autotrofinen viljely tarkoittaa, että mikrolevät kasvavat käyttäen epäorgaanista hiiltä sekä valoa energianlähteenään. Toisin sanoen ne tuottavat oman energiansa fotosynteesin avulla, hyödyntäen esimerkiksi hiilidioksidia. Autotrofinen viljelymuoto on suosituin tapa kasvattaa mikrolevää. Autotrofista viljelyä voidaan toteuttaa esimerkiksi avonaisissa altaissa ja fotobioreaktoreissa. [19, s. 4.]

4.1.1 Avonaiset altaat

Avonaiset altaat (Open raceway pond) ovat yleisin ja halvin tapa suuren mitta-kaavan biomassan tuotantoon. Nämä järjestelmät voidaan jakaa luonnollisiin vesialueisiin (järvet ja lammet), keinotekoisiiin lampiin ja säiliöihin. Altaat rakennetaan tyypillisesti voimalaitosten tai teollisuuslaitosten viereen, joissa syntyy suuria hiilidioksidipäästöjä ja biomassa absorboi tyyppiä ilmakehästä typpioksidin muodossa. Eksponentiaalisen kasvun vaiheen lopussa optimaalinen altaan syvyys on 15–50 cm, jotta kaikki levän solut saataisiin altistettua auringonvalolle. Kasvatusalustaa suunniteltaessa on välttämätöntä ottaa huomioon, että lämpötilaeroja, ympäristön hiilidioksidipitoisuutta ja liiallista altistumista auringonvalolle on lähes mahdotonta hallita. Tämä johtuu vuodenaikojen sekä kasvatusympäristön jatkuvasti vaihtelevista olosuhteista. Lisäksi eksponentiaalisen kasvun vaiheen loppupuolella jotkin solut eivät ole riittävästi alttiina auringonvalolle, koska muut pinnalla kelluvat solut peittävät ne, mikä johtaa alhaisempaan biomassatuottoon. Siksi levän sekoittaminen altaassa on suositeltavaa. [19, s. 4.]

4.1.2 Suljettu fotobioreaktori

Suljettu fotobioreaktori pyrkii korjaamaan haasteet lämpötilan ja auringonvalon saatavuuden kanssa, joista avoimet altaat kärsivät, jotta biomassaa voitaisiin kasvattaa hallitussa ympäristössä. Suljetun fotobioreaktorin avulla voidaan hallita pH-arvoa, valon voimakkuutta, lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta, mikä mahdollistaa korkeamman solukonsentraation. Järjestelmä on myös sopivampi

herkille kannoille, jotka eivät voi kilpailla tai kasvaa ääriolosuhteiden keskellä. [19, s. 4.]

4.2 Heterotrofinen viljely

Heterotrofisessa viljelyssä mikrolevä käyttää orgaanista hiiltä sekä energiaa hiilenlähteenä. Mikroleviä kasvatetaan sekoituslietelaitteessa tai fermentoijassa, jossa odotetaan suurempaa kasvuastetta sekä alhaisia sadonkorjuukustannuksia korkeamman kuiva-aineen tuottavuuden (0,25 g l/pv) ja erilaisten komponenttien, kuten lipidien, korkean kertymisen takia (22–54 mg l/pv). *C. vulgarikselle* on todettu toimiviksi hiililähteiksi glukoosi, asetaatti, glyseroli ja glutamaatti, joista glukoosilla saavutettiin suurin kasvunopeus. Tämän järjestelmän suurin haitta on kuitenkin sokerien hinta ja saatavuus, sillä sokeri kilpailee muiden käyttökohteiden, kuten ruoan ja biopolttoaineiden, kanssa. [19, s. 4.]

4.3 Miksotrofinen viljely

C. vulgaris kykenee yhdistämään sekä autotrofiset että heterotrofiset tekniikat fotosynteesillä ja hyödyntämällä orgaanisia aineita, kuten glukoosia, joka on *C. vulgarikselle* sopivin vaihtoehto. Täten solut eivät ole täysin riippuvaisia valosta tai orgaanisista aineista kasvaakseen. Tämä tekniikka kilpailee hyvin autotrofisten järjestelmien kanssa, ja tutkimuksista on saatu tulokseksi kuivamassatuotantoa 2–5 g/l/pv ja lipidejä 67–144 mg/l/pv. Miksotrofisen kasvun etuja ovat biomassan yhtäjaksoisen tuotannon varmistaminen vaihtelemalla fotosynteesin ja orgaanisen aineksen hyödyntämisen välillä auringonvalon saatavuuden suhteen sekä orgaanisten alustojen tarpeellisuuden väheneminen biomassan kasvattamiseksi. [19, s. 4.]

5 Biomassan korjuu

Leväbiomassan korjuu voi olla haasteellista, sillä leväsolut ovat pienikokoisia, tyypillisesti halkaisijaltaan 3–30 µm. Lisäksi kasvatusliuokset ovat yleensä laimeita, sisältäen alle 0,5 kg/m³ kuivaa biomassaa, mikä tarkoittaa suurten

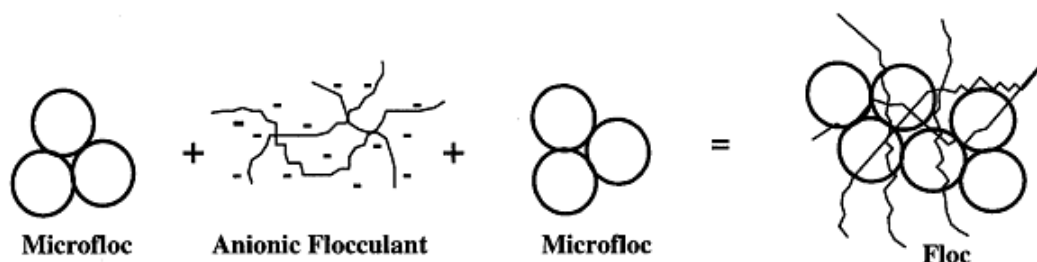
tilavuuksien käsittelyä biomassan korjuuksi. Biomassan korjuu riippuu myös siitä, kuinka monta eri levälajia kasvatustilauksessa on, jolloin eri levälajien erottelu voi olla vaikeaa. Korjuukustannukset voivat muodostaa jopa kolmasosan leväbiomassan tuotantoprosessin kokonaiskustannuksista. Biomassan korjuu koostuu usein useista vaiheista, joiden tavoitteena on erottaa kiinteä biomassanesteestä. Yleinen käytäntö on mekaaninen vedenerotus, joka voidaan suorittaa sentrifugoinnin, suodatuksen tai levän sedimentaation avulla. Usein näitä prosesseja edeltää flokkulaatiovaihe. Joissakin tapauksissa käytetään myös flootaatiota apuna korjuussa. Kerätty leväbiomassa on yleensä kuivattava lämpökäsittelyllä ennen kuin se voidaan hyödyntää. [21.]

5.1 Sentrifugointi

Sentrifugi on laite, joka käyttää keskipakovoimaa tutkittavan partikkelien erotteluun. Laboratoriosentrifugit jaetaan yleisesti niiden saavuttaman kierrosnopeuden (rounds per minute, RPM) perusteella hitaisiin, keskinopeisiin ja ultrasentrifugeihin. Laite valitaan käyttötarkoituksen mukaan, ja sen koko ja malli vaikuttavat saavutettavaan sentrifugaalivoimaan (RCF) ja erottelutehokkuuteen. Sentrifugoinnin erottelukyky perustuu partikkelien sedimentoitumiseen sentrifugaalivoimakentässä tiettyjen nopeuksien avulla. Sedimentoituminen riippuu partikkelien koosta, muodosta, tiheydestä ja ympäröivästä väliaineesta. Käytettävät sentrifugointimenetelmät voidaan jakaa karkeasti differentiaalisentrifugointiin ja gradienttisentrifugointiin. [22.] Tyypillisesti mikrolevänkasvatuksessa sentrifugointiprosessi edustaa 20–30 %:a kokonaisbiomassan tuotantokustannuksista. Yleisin korjuuteknikka *C. vulgarikselle* on sentrifugointi (5 000 rpm, 15 min), tehokkaan hyötysuhteen (95 %) vuoksi. Lisäksi prosessi on nopea ja soveltuu suurien tilavuuksien käsittelyyn. Lisäksi *C. vulgariksen* rakenne sallii suuren sentrifugointistressin aiheuttamatta vaurioita rakenteelle prosessin aikana. [19, s. 5.]

5.2 Flokkulaatio

Flokkulaatio on prosessi, joka edistää suurten partikkeliryhmien muodostumista (kuva 3). Tämän toteuttamiseksi nesteeseen lisätään kemiallinen saostin, joka toimii avainroolissa sakkautumisessa. Tämä saostin vaikuttaa partikkeleiden pintaominaisuuksiin ja sähköiseen varaukseen, jolloin seurauksena on partikkelien kasaantuminen. Flokkulaatiota käytetään monissa sovelluksissa, kuten vesihuollossa, vesikäsitteilylaitosten flokkulaatiossa ja näytteen käsittelyssä. [23.]



Kuva 3. Flokkulaatioprosessi, jossa partikkelipesäke reagoi anionisen saostimen kanssa muodostaen partikkelikasauman. [23.]

Mikrolevän kasvun eksponentiaalisen vaiheen aikana levien solupinnat latautuvat negatiivisesti, mikä aiheuttaa hylkimisreaktion. Tämä ilmiö johtuu solupintojen varauksista, jotka hylkivät toisiaan, ja se vaikeuttaa solujen lähentymistä. Kun mikrolevien kasvu saavuttaa stabiilin tai laskevan vaiheen, negatiivinen pintavaraus alkaa vähentyä. Tämä puolestaan mahdollistaa solujen lähentymisen ja ryhmittymisen yhteen, mikä johtaa ilmiöön, jota kutsutaan autoflokkulaatioksi. Autoflokkulaatiota voidaan havaita, kun solut alkavat muodostaa pieniä rykelmiä tai flokkulantteja. Ilmiö liittyy useisiin tekijöihin, kuten kohonneeseen pH-arvoon. Kohonneen pH-arvon taustalla voi olla hiilidioksidin, nitraatin ja fosfaatin assimilaatio. Assimilaatio tarkoittaa ravinteiden, kuten hiilidioksidin, nitraatin ja fosfaatin, käyttämistä solujen kasvuun ja elintoimintoihin. [19, s. 5.]

Kun pH-arvo nousee, se voi vaikuttaa solujen pinnanvarausten muutoksiin ja siten mahdollistaa solujen lähentymisen ja autoflokkulaation. Autoflokkulaatio on

tärkeä ilmiö, joka voi vaikuttaa mikrolevien käyttäytymiseen ja niiden kykyyn muodostaa suurempia rakenteita vedessä. Kyseinen menetelmä on edullisempi kuin tavallinen flokkulaatio, mutta vie aikaa. Yleisesti ottaen mikroleväviljely on hyvin vakaata, ja autoflokkulaation todennäköisyys on vähäinen. Saostumisen nopeuttamiseksi pH-arvoa tulee nostaa. Tehokkain emäksinen yhdiste on natriumhydroksidi (NaOH). Teollisessa mittakaavassa kalkin käyttö on saostamisessa todettu olevan tehokas. Tämä liittyy magnesiumioniin (Mg^{2+}) hydrolysoituneesta magnesiumhydroksidistä ($Mg(OH)_2$), joka saostuu ja vetää mukanaan negatiivisesti varautuneita mikroleväsoluja. Flokkulaatioaineena on tutkittu myös kitosaania, joka on osoittanut parhaimman tehokkuuden pH 7:ssä, jolloin mikrolevistä saatiin kerättyä talteen 90 %. Lisäksi bioflokkulaattit yhdessä yhteisflokkulantin ($CaCl_2$) kanssa pystyvät tehokkaaseen saostumiseen pH 11:ssä. Flokkulaatiota käytetään joskus esikorjuuvaiheessa helpottamaan tai täydentämään muita sadonkorjuumenetelmiä, kuten sentrifugointia tai suodatusta. [19, s. 5.]

5.3 Flotaatio

Flotaatio on mineraalien käsittelyssä käytetty menetelmä, jonka avulla erotellaan ja keskitetään malmeja muuttamalla niiden pintoja hydrofobiseen tai hydrofiiliseen tilaan eli pinnat joko hylkivät tai houkuttelevat vettä. Flotaatioprosessi kehitettiin kaupallisessa mittakaavassa varhain 1900-luvulla poistamaan erittäin hienoja mineraalipartikkeleita. Flotaatiosta on tullut laajimmin käytetty menetelmä monien mineraalien erottamiseksi. [24.]

Flotaatiosta ei ole paljon näyttöä kannattavuudesta mikrolevän suhteen, mutta menetelmä perustuu hajallaan olevien mikroilmakuplien avulla solujen vangitsemiseen. Flotaatio voi myös tapahtua luonnollisesti, kun lipidipitoisuus mikrolevissä kasvaa. *C. vulgarikselle* on kokeiltu flotaatiota käyttämällä otsonikaasua (0,05 mg/g biomassaa). Kyseinen menetelmä ei vaadi synteettisiä kemikaaleja kuten flokkulaatio, mutta sen taloudellista kannattavuutta ei vielä tiedetä teollisessa mittakaavassa. [19, s. 5.]

5.4 Suodatus

Suodatus sisältää jatkuvan virtauksen syötön liuokseen, jossa mikrolevä tiivistyy suodattimelle, kunnes se saavuttaa tietyn tiheyden. *C. vulgariksen* pienen koon vuoksi perinteinen suodatus ei sovellu sen käyttöön. Sen sijaan ultrasuodatus tai mikrosuodatus on toimivampi vaihtoehto. Liukenemattomista yhdisteistä aiheutuva likaantuminen on yksi suurimmista rajoituksista ultrasuodatusprosessin aikana, mutta *C. vulgarikselle* tämä ilmiö on todettu vähäiseksi. Lisäksi mikrosuodatuksessa ja ultrasuodatuksessa vaikuttavat erilaiset parametrit, kuten suodattimen tyyppi, kalvonpaine, virtausnopeus, virtauksen turbulenssi, poikittainen virtaus ja kasvuvaihe. [19, s. 5.]

6 Konversio ja tuotteet

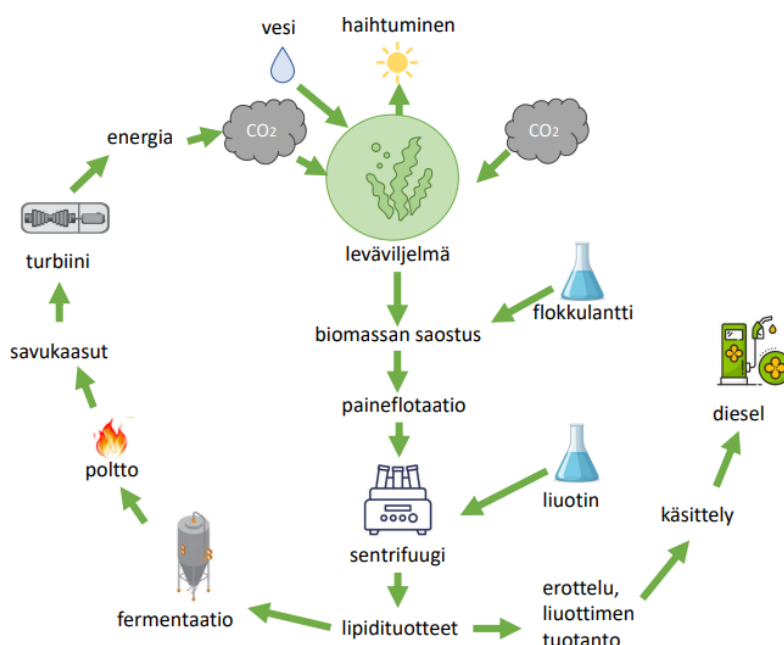
Maailmanlaajuisen energiankulutuksen kasvun ja ympäristöhaasteiden lisääntymisen myötä on tarpeen etsiä kestäviä ja ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja perinteisille energialähteille ja tuotteille. Tässä luvussa käsitellään *C. vulgariksen* monipuolisiin sovellusmahdollisuuksiin.

6.1.1 Bioenergia

Kolmannen sukupolven biopolttoaineet ovat lupaavia ratkaisuja uusiutuvan energian maailmassa. Näihin polttoaineisiin kuuluvat esimerkiksi biodiesel, bioetanoli ja vety, jotka voidaan tuottaa erilaisista biologisista lähteistä. Yksi mielenkiintoisimmista vaihtoehdoista on bioenergian tuottaminen mikro-organismeista, kuten mikrolevistä ja bakteereista. [25, s. 1–2.]

Mikrolevästä saatava öljy voi olla jopa 80 % kuivapainosta, mikä tekee siitä erityisen houkuttelevia bioenergian tuotannon raaka-aineena. Mikrolevän kasvunopeus ja vähäiset ravinnontarpeet tekevät niistä tehokkaita biomassan tuottajia. Suurimuotoisen viljelyn avulla voidaan saavuttaa huomattavaa energiantuotantoa pienellä pinta-alalla, eikä mikrolevien viljely kilpaile ruoantuotannon kanssa. [25, s 1–2.]

Vaikka mikrolevän viljely biopolttoaineeksi sisältää teknisiä haasteita, kuten korkeat kustannukset biomassan tuotannossa ja keräämisessä, tutkimus ja kehitys ovat johtamassa uusiin kannattaviin ratkaisuihin. Suljetut bioreaktorit, jäteveden hyödyntäminen biomassan tuottamiseen, tehokkaiden kantojen etsiminen ja edistyksellinen kehitystyö tarjoavat mahdollisuuksia parantaa tuotannon kustannustehokkuutta. Kolmannen sukupolven biopolttoaineet tarjoavat lupaavan tien kohti uusiutuvaa ja ympäristöystävällistä energiantuotantoa, vähentäen samalla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. [25, s. 1–2.] Lohkokaaviossa (Kuva 4) esitetään järjestelmä biomassan valmistamiseksi ja sen myöhempää hyödyntämistä varten [26].



Kuva 4. Järjestelmä leväbiomassan valmistamiseksi ja sen myöhempää hyödyntämistä varten biodieselin valmistuksessa [26].

Venäläiset tutkijat El-Naggar ym. tutkivat pyrolyysiprosessia, joka sisältää orgaanisten yhdisteiden termokemiallisen hajoamisen ilman hapen läsnäoloa. Pyrolyysi voidaan suorittaa joko korkeissa lämpötiloissa tai matalissa lämpötiloissa. Korkealämpötilapyrolyysissä (jopa 900 °C) syntyy pääosin kiinteitä polttoaineita, kun taas matalalämpötilapyrolyysissä muodostuu enemmän kaasuja. Tutkimuksessa keskityttiin mikroleväbiomassan pyrolyysiin ja todettiin C.

vulgaris mikrolevällä nopeaa pyrolyysiä, joka osoittautui lupaavaksi vaihtoehdoksi biopolttoaineiden tuotannon tehostamiseksi. [26, s. 15–17.]

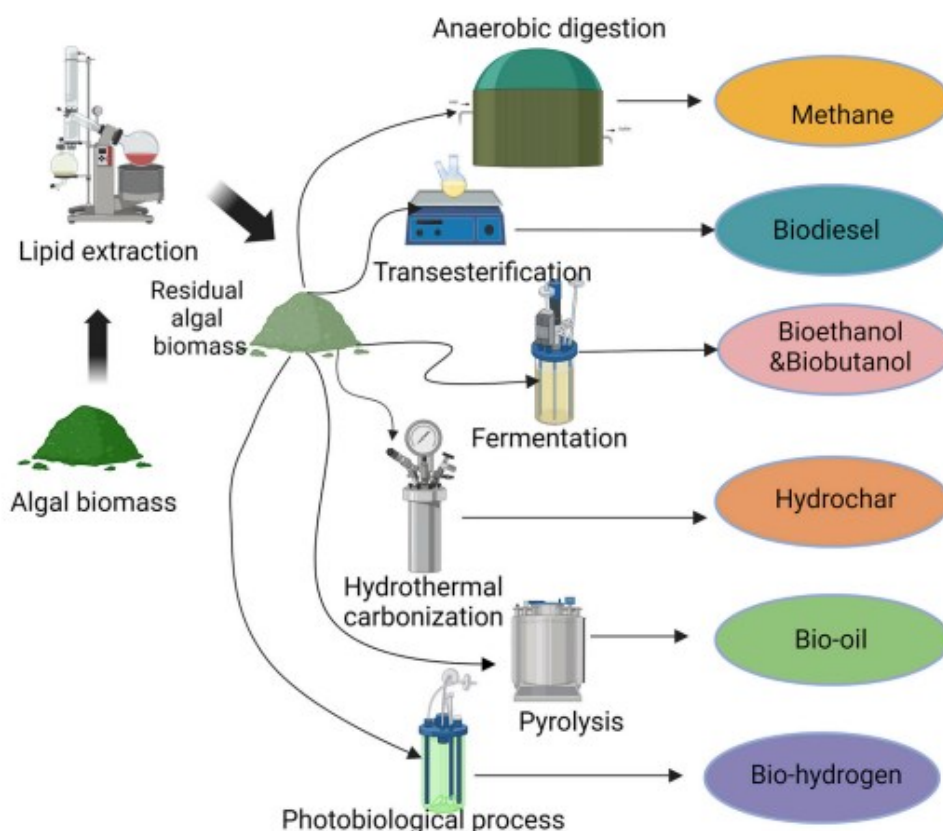
Toisessa El-Naggar ym. tutkimuksessa valittiin kuusi eri levätyyppiä ja tutkittiin niiden termistä muuntautumista hitaassa pyrolyysissä. Levävalinta perustui kykyyn kestää erilaisia ympäristöolosuhteita ja korkeaan lipidipitoisuuteen kuivapainossa. Tulosten perusteella havaittiin, että eri levätyypeillä oli erilaisia termisiä ominaisuuksia, ja niiden energiasisältö vaihteli. *C. vulgaris* osoittautui hyväksi vaihtoehdoksi kaasun tuottamiseen. [26, s. 15–17.]

6.1.2 Muut sovellukset

C. vulgaris on yksi eniten viljellyistä viherlevistä, ja sen käyttöalue on laaja. Sitä hyödynnetään lääke- ja kosmetiikan valmistuksessa, terveystuotteena sekä rehu-lisäaineena. *C. vulgaris* sisältää arvokkaita ravintoaineita, kuten mineraaleja ja vitamiineja 10 %, kuitua 5 %, hiilihydraatteja 20 %, rasvaa 20 % ja proteiinia noin 45 % (kuivapainoon suhteutettuna). [27, s. 2.]

Mikrolevän polysakkarideilla on monia merkittäviä sovelluskohteita, jotka ulottuvat maataloudesta lääketieteeseen ja farmasiaan. Nämä luonnonmukaiset biopolymeerit ovat monipuolisesti muokattavissa, biologisesti yhteensopivia sekä vakaita, ja ne hajoavat ympäristöystävällisesti. Polysakkarideja hyödynnetään myös laajasti kaupallisesti, esimerkiksi juomien, rehujen, elintarvikkeiden, emulgointiaineiden, sakeuttajien ja stabilointiaineiden valmistukseen. Niillä on myös biologisia vaikutuksia, kuten syöpää ja viruksia ehkäiseviä, kolesterolitasoja alentavia, antioksidanttisia ja veren hyytymistä ehkäiseviä ominaisuuksia. *C. vulgaris* tuottaa ulkoisia polysakkarideja, jotka on todettu kokeellisesti eläinkokeissa tehokkaiksi yskänärsytystä hillitsevinä aineina, ne ehkäisevät tulehdusta sekä laajentavat keuhkoputkia. Mikrolevien polysakkarideilla on myös suuri potentiaali kosmetiikkateollisuudessa, missä niitä käytetään antioksidantteina ja kosteuttavina aineina. [27, s. 2.]

Leväbiomassasta syntyy myös sivutuotteita, kun levän pääasiallisen hyödyntämisen lisäksi jalostetaan tai prosessoidaan biomassaa edelleen, jotta siitä saadaan muita arvokkaita tuotteita. Mikrolevistä saatavan biomassan nettotuoton parantamiseksi on ehdotettu kumuloituvaa lähestymistapaa, jossa pyritään maksimoimaan resurssien käytön tehokkuus ja minimoimaan jätteen tuotanto hyödyntämään jäännösbiomassaa edelleen arvokkaissa tuotteissa (Kuva 5). [28, s. 3.]



Kuva 5. Jäännösbiomassan hyödyntäminen arvokkaiksi tuotteiksi. [28].

7 Ympäristövaikutukset ja talous

Elinkaariarviointi on arvokas työkalu ympäristövaikutusten määrittämiseksi, jotta voidaan arvioida kokonaisvaltaisia ympäristövaikutuksia. Tällä hetkellä arvokkaita tuotteita saadaan mikroleväbiomassasta. Bioenergiatuotanto mikrolevistä on edelleen kilpailukyvyttöä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, mikä johtuu

korkeasta energiankulutuksesta sadonkorjuussa, öljyn uuttamisessa ja biomassan muuntamisessa. [29.]

7.1 Mikrolevän elinkaariarviointi

Mikroleväbiomassan tuotantoon liittyvien eri viljely- ja sadonkorjuuvaihtoehtojen arvioinnilla pyritään tehostamaan biomassan tuotantoprosessia. Mikrolevistä on tutkittu hydrotermisen liuotuksen (HTL) ja mikrolevän pyrolyysin ympäristösuorituskykyä laimentimien tuottamiseksi. Tulokset osoittavat, että HTL-prosessi tarjoaa ympäristöhyötyjä. Tämän on todettu johtuvan siitä, että tässä prosessissa märkää biomassaa ei kuivata, mikä vähentää energiantarvetta ja kasvihuonepäästöjä, joita syntyy biomassan kuivaamisessa. [29.]

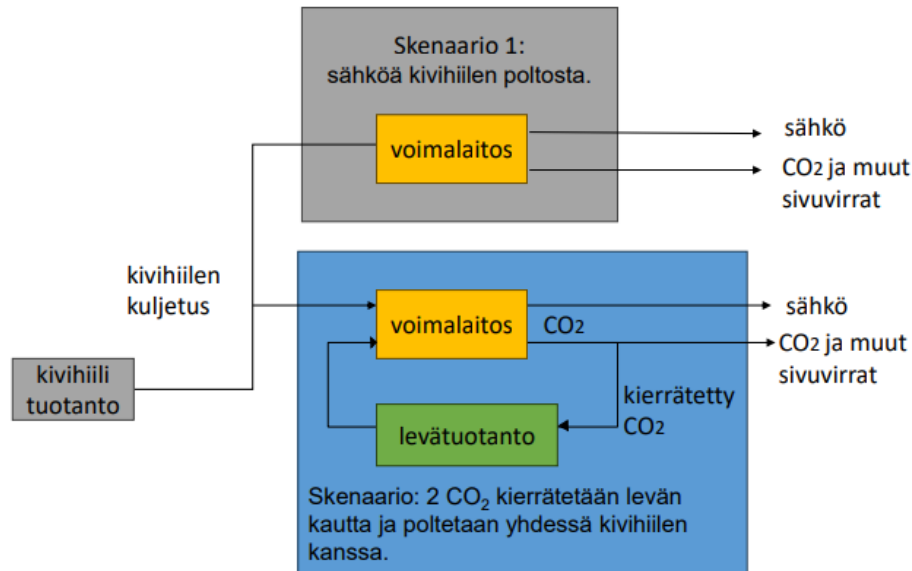
Lisäksi on tutkittu mikrolevien kemiallisten reittien taloudellista kannattavuutta bioenergian tuottamiseksi. Tutkimuksessa havaittiin, että polttoaineiden hinnat olivat 3,39 dollaria litraa kohti biokemiallisessa reitissä ja 2,75 dollaria litraa kohti termokemiallisessa reitissä. On myös tutkittu, että hintoja voidaan alentaa pienentämällä biomassan raaka-aineen kustannuksia, vähentämällä tuhka-ainepitoisuutta ja parantamalla HTL-polttoaineiden tuottoa. [29.]

Tällä tavoin arvioidaan eri vaihtoehtoja mikroleväbiomassan tuotannossa sekä niiden ympäristövaikutuksia että taloudellista kannattavuutta biopolttoaineen tuottamiseksi. Vaikka mikroleväbiomassasta saatavien energiatuotteiden potentiaali ja elinkaariarvioinnin kyky auttaa ymmärtämään prosessien ympäristövaikutuksia ovat yleisessä tiedossa, analyysit, jotka sisältävät skaalaamisen ja lupaavat tekniikat kuten HTL, ovat vielä harvinaisia kirjallisuudessa. [29.]

7.2 Hiilidioksidin kierrätys

Elinkaarianalyysissä (LCA) tutkimuksessa tarkasteltiin CO₂:n kierrätystä mikrolevien tuotannossa ja sen vaikutuksia ympäristöön. Tulokset osoittavat merkittäviä eroja kahden skenaarion (kuva 6) välillä:

- Skenaario 1: Käytetään pelkkää kivihiiltä polttoaineena
- Skenaario: 2 CO₂ kierrätetään levän kautta ja poltetaan yhdessä kivihiilen kanssa. [30, s. 33.]



Kuva 6. Skenaarion 1 ja 2:n prosessikaaviot [30].

Suoran ruiskutusprosessin käytössä savukaasu kuljetetaan suoraan leväaltilsiin ja havaittiin alempia kokonaisvaikutuksia levien samanaikaisessa poltossa seuraaville osa-alueille:

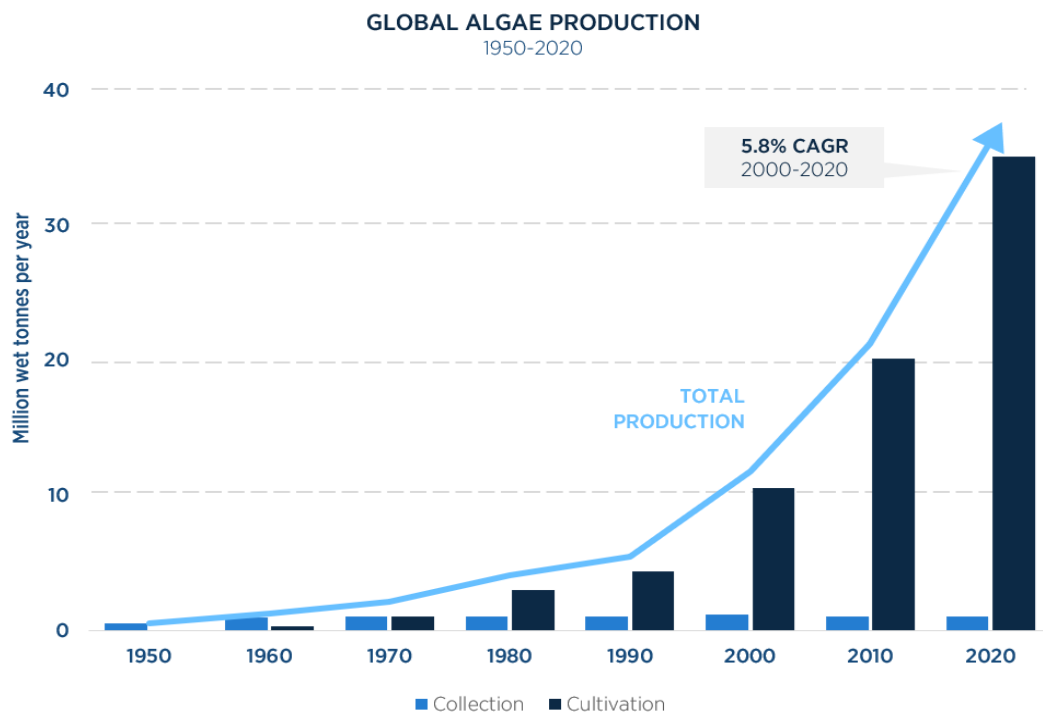
- rikkioksidi- (SO_x) ja typpioksidi (NO_x) -päästöt
- hiukkaspäästöt
- CO₂- ja metaanipäästöt
- fossiilisen energian kulutus [30, s. 39.]

Häkä- ja hiilivetykaasupäästöt, lukuun ottamatta metaania, pysyivät tilastollisesti samoina. Kuitenkin levien samanaikaisessa poltossa havaittiin myös suurempia vesistö-päästöjä, mikä näkyi kemiallisessa hapenkulutuksessa (COD). [30, s. 39.] Skenaarioiden neljä arviointikategoriaa antoi ristiriitaisia tuloksia. Nämä kategoriat olivat kasvihuonekaasupotentiaali, luonnonvarojen ehtyminen, ilman

happamoitumispotentiaali ja rehevöitymispotentiaali. Vähäiset hiilidioksidin ja metaanin päästöt ovat tavoitteellisia, koska ne vähentävät ilmaston lämpenemisen vaikutuksia. Alhaisemmat arvot havaittiin levien samanaikaisen polton skenaariossa verrattuna pelkkään kivihiilen polttoon happamoitumispotentiaalın arvioinnissa. Rehevöitymisriskipotentiaalın arvot ovat korkeammat lannoitteiden kulutuksen vuoksi levien tuotannossa. Levien samanaikaisen polton skenaario vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja ilman epäpuhtauksien kuormitusta. Kuitenkin nämä hyödyt on tasapainotettava lisääntyneen maakaasun ja öljyn käytön sekä korkeamman rehevöitymisriskin kanssa. [30, s. 40.]

7.3 Taloudellinen kannattavuus

Mikroleväteollisuus tuottaa vuosittain noin 7 000 tonnia kuivaa biomassaa ja tulot ovat noin 3,8–5,4 miljardia dollaria. Luvut osoittavat kiinnostuksen biomassan käyttämiseen. On myös tiedossa, että useissa hallitusohjelmissa on mainittuna taloudellinen tuki tutkimukseen, minkä avulla voidaan kehittää ratkaisuja ilmaston lämpenemisen torjumiseen. Lisäksi on yrityksiä ja organisaatioita, jotka kehittävät mikroleviin perustuvia tuotteita ja teknologioita, joista ExxonMobil-yhtiö erottuu tavoitteillaan tuottaa vuoteen 2025 mennessä 10 000 tynnyriä päivässä biopolttoainetta mikrolevistä. [31.] Maailmanlaajuinen kiinnostus levien viljelyä kohtaan kasvaa voimakkaasti ja kehityskaari on nähtävissä kuvassa 7 [32].



Kuva 7. Levätuotannon kasvu vuodesta 1950 lähtien [32].

Chlorella-markkinoiden arvo vuonna 2022 oli 285,75 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria (MUSD). Lisäksi ennustetaan (taulukko 4), että maailmanlaajuiset Chlorella-markkinat kasvavat noin 6,3 prosentin vuosivauhtia ennustejakson aikana. [31.]

Taulukko 4 Mikrolevien markkinoiden ennuste [31.]

Perusvuosi	2022
Ennustejakso	2023–2029
Markkinakoko vuonna 2022	285,75 MUSD
Ennustejakso 2023–2029	6,3 %
Markkinakoko vuonna 2029	438,26 MUSD

Tyyppi	jauhe, neste, tabletti, uute
Sovellus	ravintolisät, elintarvikkeet ja juomat, eläinten rehu, kosmetiikka
Teknologia	autotrofinen, avoin allas, suljettu fotobioreaktori, heterotrofinen
Lähde	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella pyrenoidosa</i> tai <i>Sorokiniana</i> , muut

Chlorella-markkinoiden kasvua ajaa kasvava kiinnostus kasviproteiineihin ja vegeaaniruokavalioon. *Chlorella* ja muut leväpohjaiset lisäaineet ovat proteiinirikkaita ja voivat parantaa elintarvikkeiden ravintoarvoa. Lisäksi Aasian maissa, kuten Kiinassa ja Japanissa, *Chlorellaa* käytetään laajasti ruoissa, mikä edistää sen kasvavaa suosiota. Chlorella-markkinoiden kasvua odotetaan tapahtuvan Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Yksi haaste Chlorella-markkinoille on korkea tuotantokustannus, erityisten kasvatusolosuhteiden vuoksi, ja COVID-19-pandemian vaikutus markkinoihin toimitusketjujen häiriintyessä. [31.]

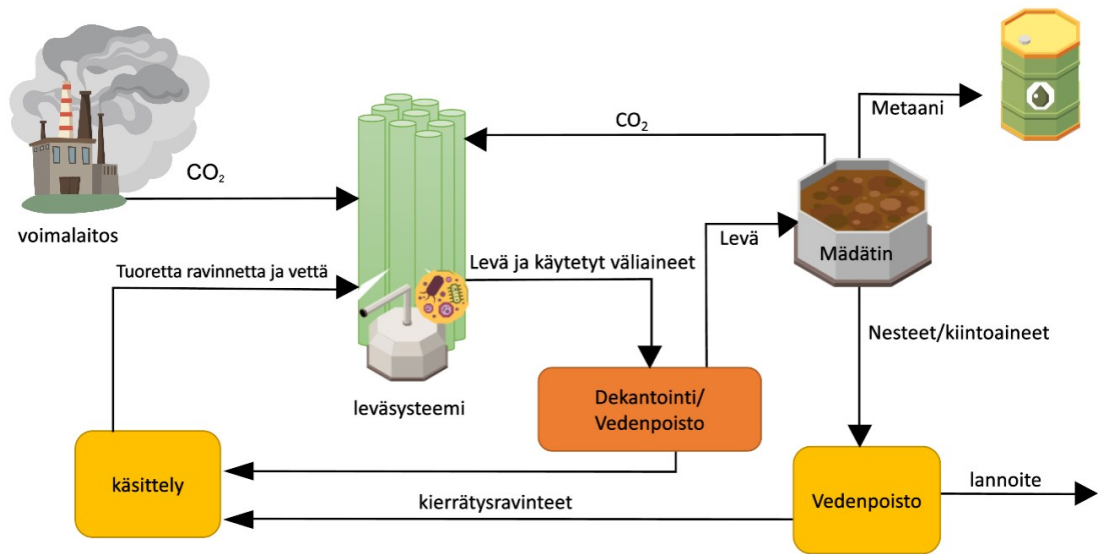
8 Teollinen mittakaava

Mikrolevien teollisen mittakaavan kasvattaminen on tyypillisesti monimutkaista, vie paljon aikaa ja siihen liittyy merkittäviä riskejä, kuten viljelyn epäonnistuminen ja saastuminen. Tässä osuudessa esitellään kahta erilaista lähestymistapaa mikrolevien teolliseen tuotantoon. Ensimmäinen lähestymistapa perustuu suunniteltuun allaskasvatukseen, jossa mikroleviä kasvatetaan tuotantolaitosten läheisyydessä. Toisessa esimerkissä esitellään mikrolevän kasvatusta moduulirakenteiden avulla, joka tarjoaa joustavuutta ja tehokkuutta mikrolevätuotantoon.

8.1 Levätuotantoa polttolaitoksilla

Kentuckyn yliopistotutkijat ovat työskennelleet levänviljelyjärjestelmien parissa hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, erityisesti kivihiihivoimaloista. Tutkijat ovat

mallintaneet prosessia, joka alkaa voimalaitokselta ohjaten hiilidioksidia mikroleväjärjestelmään (Kuva 8). Mikrolevä ja käytetyt väliaineet siirtyy dekantointiin, ja ne erotetaan toisistaan. Tämän jälkeen mikrolevä siirtyy mädättimeen, jossa se hajotetaan anaerobisesti metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Metaani voidaan käyttää energialähteenä, kun taas hiilidioksidi siirtyy takaisin mikroleväsystemiin. Tällä tavoin hiilidioksidi saadaan kierrätettyä takaisin järjestelmään. [33.]

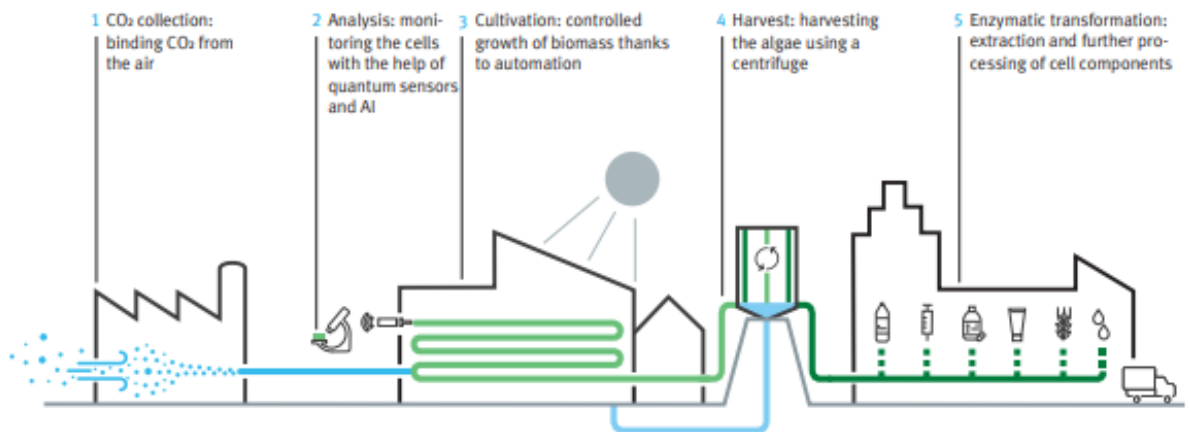


Kuva 8. Hiilidioksidin kierrätysprosessi voimalaitokselta metaanintuotantoon tai lannoitteeksi [33].

Kentuckyn yliopiston opiskelijat ja henkilökunta ovat pilotoineet tämän mallin pohjalta suljettua fotobioreaktorijärjestelmää, jossa mikrolevää kasvatetaan muoviputkissa. Järjestelmää on mahdollista laajentaa lisäämällä putkia. Pilotti on asetettu Kentuckyn energiatutkimuskeskukseen, jossa voimalaitoksen itäpuolella sijaitsee 19 000 litran syöttösäiliö, jossa on kaksi sentrifugipumppua, jotka syöttävät hiilidioksidia ja ravinteita leväkasvustoon. Levä kerätään korjuusäiliöön, josta se voidaan käyttää metaanin tuottamiseen, eläinrehuksi tai biodieselin valmistukseen. [33.]

8.2 Festo BionicCellFactory

BionicCellFactory on teknologia, jonka teknologiayritys Festo on kehittänyt automaation avulla kasvattamaan biomassaa suurella mittakaavalla tehokkaasti ja resursseja säästään. Tämä teknologia tarjoaa kestävä vaihtoehdon raakaöljylle. BionicCellFactory esittää kattavan ratkaisun, jossa saatua biomassaa voidaan käyttää kemian, elintarviketeollisuuden ja lääketieteellisuuden tarpeisiin. Kokonaisuudessaan BionicCellFactory koostuu kuvan 9 mukaisesti viidestä erillisestä moduulista. [34.]



Kuva 9. BionicCellFactoryn prosessi hiilidioksidin talteenotosta levän tuotteistamiseksi [34].

Moduuli 1 käsittelee hiilidioksidin keräämistä ilmasta ja sen puhdistusta leväviljelmiin. Koska ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on alle yhden prosentin, tarvitaan CO₂-keräysmoduuli, joka suodattaa ilmasta hiilidioksidia ja lisää sen leväkulttuureihin. Tämä saavutetaan käyttämällä CO₂-sitovia rakeita, jotka voivat imeä ja vapauttaa hiilidioksidia riippuen ympäristön olosuhteista. Kun rakeet ovat sitoneet tarpeeksi hiilidioksidia, ne kuumennetaan kaasun vapauttamiseksi, joka jäädytetään väliaikaiseen säiliöön ja siirretään sitten bioreaktoriin. [34.]

Moduuli 2 keskittyy leväviljelmän analysointiin ja seurantaan. Analyysimoduulissa käytetään optista mikroskopiaa, tekoälyä ja kvanttitekniologiaa. Digitaalinen mikroskoopi tuottaa jatkuvasti kuvia, joita analysoidaan tekoälyn avulla. Lisäksi kvanttianturi mittaa leväsolujen kokoja ja määriä. Näiden analyysien avulla voidaan reagoida prosessitapahtumiin ennakoivasti ja puuttua niihin tarvittaessa. [32.]

Moduuli 3 keskittyy levien kasvattamiseen ja viljelyyn optimaalisissa olosuhteissa. Levät kasvavat putkijärjestelmässä, jossa niiden kasvua seurataan jatkuvasti antureilla. Tarvittavat ravinteet, kuten kalium, fosfori ja typpi, syötetään järjestelmään, ja lämpötila pidetään sopivana lauhduttimien avulla. Ilman annostelua säätelee massavirtasäätö ja pietsosähköventtiilitekniikka. Tämä varmistaa, että levät saavat optimaaliset olosuhteet fotosynteesille. [34.]

Moduuli 4 vastaa leväsadon korjuusta ja erottamisesta vesiympäristöstään. Tämä tehdään käyttämällä sentrifugia, joka pyörimisnopeus on 10 000 RPM. Sentrifugin avulla levät erotetaan vedestä, ja vesi palautetaan prosessiin. Levät siirtyvät tästä prosessista entsyymien käsittelyyn. [34.]

Moduuli 5 on viimeinen vaihe, jossa leväsatoa käsitellään entsyymeillä. Tämä prosessi mahdollistaa leväkomponenttien, kuten tärkkelyksen, proteiinin, väriaineen ja leväöljyn erottelun. Entsyymit auttavat soluseinien avaamisessa ilman raskasmetalleja. Saadusta leväöljystä voidaan valmistaa ravintolisiä, kosmetiikkaa, energianlähteitä tai biopohjaisia muoveja, kun taas leväjäännökset voidaan hyödyntää eläinrehuna tai lannoitteena. [34.]

9 Johtopäätökset

Tämän työn pohjalta voidaan todeta, että *C. vulgarixsen* käyttö hiiliensidonnassa, on potentiaalinen keino hiilidioksidipäästöjen hallintaan ja samalla arvokkaiden tuotteiden valmistamiseen. On tärkeää kuitenkin tunnistaa siihen liittyviä haasteita ja ottaa huomioon mahdolliset negatiiviset vaikutukset. Keskeisimmät haasteet ovat leväkannan ylläpito, optimointi ja taloudellinen kannattavuus.

Mikrolevien kasvuympäristöt ovat herkkiä muutoksille ja ravinnelähteiden hallinta voi olla monimutkaista. Tuotannon valvonta, sadonkorjuu ja polttoaineeksi jalostus edellyttävät huolellista seuranta ja hallintaa. Ympäristönäkökulmasta on tärkeää huomata, että levien kasvatus suuremmalla skaalalla voi myös vaikuttaa paikallisiin ekosysteemeihin. Tämän lisäksi on olennaista löytää kestäviä ratkaisuja jäännösmassan hyödyntämiseen, mikäli niitä prosessin aikana syntyy.

Onnistunut hyödyntäminen vaatii ymmärrystä optimaalisista kasvatusolosuhteista ja panostusta prosessin suunnitteluun. Kehittämällä biomassan korjuun ja kuivauksen taloudellisesti kannattavaksi sekä lisäämällä tutkimusta elinkaari-analyysin ja ympäristövaikutusten ympärillä, löytyy *C. vulgariksella* potentiaalinen mahdollisuus biologisena hiilensitojana.

Lähteet

- 1 Hiilinieluista huolehtiminen. Verkkoaineisto. Ilmasto-opas. <<https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilinieluista-huolehtiminen>>. Luettu 2.10.2023.
- 2 Arenasa, Francisco & Vaz-Pinto, Fátima. 2014. Marine Algae as Carbon Sinks and Allies to Combat Global Warming.
- 3 Haoyang, Cai. 2018. Algae-Based Carbon Sequestration. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- 4 Singh, Jyoti & Dhar, DW. 2019. Overview of Carbon Capture Technology: Microalgal Biorefinery Concept and State-of-the-Art.
- 5 Hiilen kierto. Ilmasto.nyt. Oppimateriaali. Digicampus
- 6 Lehtonen, Juha; Järnefelt, Vafa; Alakurtti, Sami; Arasto, Antti; Hannula, Ilkka; Harlin, Ali; Koljonen, Tiina; Lantto, Raija; Lienemann, Michael; Onarheim, Kristin; Pitkänen, Juha-Pekka & Tähtinen, Matti. 2019. The Carbon Reuse Economy: Transforming CO₂ from a pollutant into a resource. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
- 7 Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? Verkkoaineisto. Euroopan parlamentti. <<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>>. Päivitetty 8.9.2022. Luettu 12.11.2023.
- 8 Onyeaka, Helen; Miri, Taghi; Oibileke, KeChrist; Hart, Abarasi; Anumudu, Christian & Al-Sharify, Zainab T. 2021. Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. Carbon Capture Science & Technology, Volume 1.
- 9 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Verkkoaineisto. Ilmasto-opas. <<https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi>>. Luettu 2.10.2023.
- 10 About CCUS. 2021. Verkkoaineisto. IEA <<https://www.iea.org/reports/about-ccus>>. Luettu 5.10.2023.
- 11 G. Calvert, Jack. 1990. Glossary of atmospheric chemistry terms. Pure and Applied Chemistry.
- 12 Cheng-Hsiu, Yu; Chih-Hung, Huang & Chung-Sung, Tan. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. Aerosoli- ja ilmanlaatututkimus. National Tsing Hua University.
- 13 Suokas, Joonatan. 2021. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Kandidaatintyö. Oulun yliopisto. Jultika-kanta.

- 14 Yleistä kaasuista. Verkkoaineisto. Linde. <https://www.linde-gas.fi/fi/products_ren/gas_school/index.html>. Luettu 21.11.2023.
- 15 Fractional distillation of air. Verkkoaineisto. Dynamic Science. <<http://www.dynamicscience.com.au/tester/solutions1/chemistry/gas/fractionaldistillationofair.htm>>. Luettu 3.3.2023.
- 16 Keskitalo, Esa. 2013. Savukaasujen hiilidioksidin talteenotto-prosessin vaikutukset olemassa olevaan monipolttoaine-CHP-voimalaitokseen. Insinööri-yö. Oulun yliopisto. Jultika-kanta.
- 17 Politaeva, N.; Ilin, I.; Velmozhina, K.; Shinkevich, P. 2023. Carbon Dioxide Utilization Using *Chlorella* Microalgae. Raportti. <<https://doi.org/10.3390/environments10070109>>.
- 18 Chisti, Yusuf. 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, Volume 25, Issue 3.
- 19 Safi, Carl; Zebib, Bachar; Merah, Othmane; Pontalier, Pierre-Yves; Vaca-Garcia, Carlos. 2014. Morphology, composition, production, processing, and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 35.
- 20 Hannon M, Gimpel J, Tran M, Rasala B, Mayfield S. 2010. Biofuels from algae: challenges and potential. Biofuels.
- 21 Rimppi, Heli. 2009. Leväbiomassan tuotanto energiataroituksiin: teknologian nykytila, haasteet ja mahdollisuudet Suomen olosuhteissa. Kandidaatintyö. LUT-yliopisto.
- 22 Sentrifugointi. Solunetti. Verkkoaineisto. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/sentrifugointi/>>. Luettu 15.11.2023
- 23 What is Flocculation? Difference between Coagulation & Flocculation. Colgedunia. Verkkoaineisto. <<https://colgedunia.com/exams/what-is-flocculation-difference-between-coagulation-and-flocculation-chemistry-articleid-5496>>. Luettu 15.11.2023.
- 24 Flotation. Verkkoaineisto. Britannica. <<https://www.britannica.com/technology/flotation-ore-dressing>>. Luettu 15.11.2023
- 25 Cancela, Ángeles; Álvarez, Xana; Sánchez, Ángel; Ortiz & Luis; Somoza, Luis. 2019. Microalgae cultivation and harvesting for bioenergy production. Bioresource Technology Reports.
- 26 Iglina, T.; Iglin, P. & Pashchenko, D. 2022. Industrial CO₂ Capture by Algae: A Review and Recent Advances.
- 27 El-Naggar, N.E.A. & Hussein, M.H. Shaaban-Dessuuki. 2020. Production, extraction, and characterization of *Chlorella vulgaris* soluble polysaccharides and their applications in AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth. Scientific Reports vol. 10.

- 28 Munisamy Sambasivam, Kavitha; Kuppan, Praveen; Shashirekha, Viswanaathan; Tamilarasan, Krishnamurthi & Abinandan, Sudharsanam. 2023. Cascading utilization of residual microalgal biomass: Sustainable strategies for energy, environmental, and value-added product applications. Bio-resource Technology Reports, Volume 23.
- 29 Miranda, AM; Hernandez-Tenorio, F; Ocampo, D; Vargas, GJ & Sáez, AA. 2022. Trends on CO₂ Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis. Raportti. <<https://doi.org/10.3390/molecules27154669>>.
- 30 Kadam, Kiran L. 2001. Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life Cycle Basis. Raportti. <<https://doi.org/10.2172/783405>>.
- 31 Chlorella Market- Global Industry Analysis and Forecast. 2022. Verkkoaineisto. MMR. <<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/chlorella-market/147101/>>. Luettu 19.12.2023.
- 32 The unfolding seaweed revolution. Verkkoaineisto. Ergo Strategy Group. <<https://ergostrategygroup.com/insights/the-algae-revolution/>>. Luettu 19.12.2023.
- 33 Crofcheck, Czarena; Graham, Tabitha; Montross, Michael. 2013. Algae-Based CO₂ Mitigation for Coal-Fired Power Plants. Biosystems and Agricultural Engineering.
- 34 BionicCellFactory, cultivation of biomass on an industrial scale. Verkkoaineisto. Festo. <https://www.festo.com/PDF_Flip/corp/Festo_BionicCellFactory/en/index.html>. Luettu 20.12.2023