



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

MIKROLEVIEN HYÖDYNTÄMINEN JÄTEVESIEN KÄSITTELYSSÄ

Samuli Heikkilä

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Heinäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

Mikrolevien hyödyntäminen jätevesien käsittelyssä

Samuli Heikkilä

Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 33 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Tiina Leiviskä, Ville-Hermann Sotaniemi

Kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää mikroleviä hyödyntävien jätevedenpuhdistusprosessien toimintaperiaatteita, mikrolevien kasvuun vaikuttavia tekijöitä ja mikrolevien mahdollisuuksia teollisuuden raaka-aineena. Tutkimus on kirjallisuuskatsaus, jossa aineistona on käytetty aikaisempaa mikrolevätutkimusta ja tieteellistä kirjallisuutta. Lisäksi työssä on tekijän tuottamaa kuvamateriaalia.

Työssä tarkastellaan mikroleviä hyödyntävien jätevedenpuhdistusprosessien taloudellisuutta, tehokkuutta, ja soveltuvuutta laajamittaiseen käyttöön Suomessa ja muualla maailmassa. Tutkielmassa käydään läpi, miten mikrolevät poistavat saasteita jätevedestä, ja mitkä tekijät vaikuttavat puhdistustulokseen. Kandidaatintyössä pohditaan myös tulevaisuuden tutkimuskohteita mikrolevien hyödyntämisessä.

Tutkimuksesta voidaan päätellä, että mikroleviä hyödyntävät jätevedenpuhdistusprosessit ovat kustannustehokkaita ja poistavat jätevedestä monia ravinteita ja epäpuhtauksia paremmin kuin bakteerit. Mikroleviä hyödyntävät jäteveden käsittelymenetelmät eivät myöskään kuluta yhtä paljon kemikaaleja, tai tuota hiilidioksidia (CO_2) kuten aktiivilietemenetelmä. Mikrolevät ovat yhteyttäviä eliöitä ja suosivat yleensä yli $15^\circ C$ lämpötiloja, minkä vuoksi mikrolevien hyödyntäminen ympärivuotisessa jätevesien käsittelyssä voi olla haastavaa arktisilla ja subarktisilla alueilla. Mikrolevälajeja on valtavasti, ja lajien ominaisuudet ja tarpeet vaihtelevat suuresti, jolloin optimaalisia tuloksia voi olla vaikea saavuttaa. Osa mikrolevien kasvatusmenetelmistä vaativat myös paljon vettä, ja mikrolevien erottaminen jätevedestä voi olla kallista tai hidasta.

Mikrolevät keräävät itseensä paljon arvokkaita ravinteita jäteveden käsittelyn yhteydessä, ja mikroleviä voidaan käyttää teollisuudessa tärkeiden tuotteiden, kuten lannoitteiden ja

biopolttoaineiden valmistuksessa. Mikrolevien korkean proteiinipitoisuuden vuoksi siitä voidaan myös valmistaa ravintolisiä tai eläinrehua.

Mikrolevien soveltuvuutta jätevesien käsittelyyn tutkitaan aktiivisesti ympäri maailmaa ja puhdistusmenetelmät tulevat odotetusti muuttumaan tehokkaammiksi tulevaisuudessa. Mikroleviä hyödyntävissä jätevedenpuhdistus menetelmissä on kuitenkin vielä paljon tutkimuskohteita, eikä täysimittaisista mikroleviä hyödyntävistä jätevedenpuhdistuslaitoksista ole juuri tutkimustuloksia.

Asiasanat: Mikrolevä, Jätevesi, Jätevedenpuhdistus, Biopolttoaine

ABSTRACT

The Use of Microalgae in Wastewater Treatment

Samuli Heikkilä

University of Oulu, Degree Programme of Process and Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2022, 33 pp.

Supervisor(s) at the university: Tiina Leiviskä, Ville-Hermanni Sotaniemi

The goal of this bachelor's thesis is to investigate the mechanics of the use of microalgae in wastewater treatment, the factors that affect the growth of microalgae and the uses of microalgae as raw material for industries. This study is a literature review where previous microalgae research and scientific literature has been used, as well as images produced by the author.

The review addresses the sustainability, applicability, and economic impact of microalgae-based wastewater treatment methods in Finland and worldwide. The review explains the mechanics of pollutant removal by microalgae, and the factors effecting the performance of microalgae-based wastewater treatment. The review also discusses future research in the use of microalgae.

Based on research, wastewater treatment using microalgae are cost-effective and remove many pollutants and nutrients from the wastewater better than bacteria. Processes utilizing microalgae rarely demand as many chemicals as treatment using bacteria and produces oxygen instead of carbon dioxide. Microalgae are photosynthesizing organisms and mostly thrive in temperatures over 15°C, which is why using microalgae for year-round wastewater treatment might be challenging in arctic and subarctic areas. There is a vast number of different species of microalgae and getting optimal results in a wastewater treatment process can be difficult for that reason. Some methods of microalgae cultivation require large quantities of water and separating the algae from the water can be slow or expensive. Microalgae accumulate large amounts of valuable nutrients during wastewater treatment and can be used to produce important products, such as fertilizers or biofuels. The applicability of microalgae in wastewater treatment is studied worldwide and treatment methods will expectedly become more effective and suitable for large scale

treatment plants in the future. There are many objects of research left in microalgae-based wastewater treatment and little data from large scale wastewater treatment plants utilizing microalgae.

Keywords: Microalgae, Wastewater, Wastewater treatment, Biofuel

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

Johdanto	7
1 Mikrolevät	8
2 Mikrolevien kasvatus	9
2.1 Avoimet systeemit	9
2.2 Fotobioreaktori-systeemit	10
2.3 Solid-state fotobioreaktorit	12
3 Mikrolevien hyödyntäminen jätevesien puhdistamisessa	13
3.1 Metallit	15
3.2 Fosfori ja typpi	17
3.3 Taudinaiheuttajat ja vaaralliset kemikaalit	18
3.4 Mikrolevien erottaminen käsittelystä jätevedestä	18
4 Mikrolevien hyödyntäminen jätevesien puhdistamisen jälkeen	20
4.1 Mikrolevien hyödyntäminen biopolttoa inetuotannossa	20
4.2 Mikrolevien hyödyntäminen maataloudessa ja ravintona	21
5 Mikrolevien edut ja haasteet jäteveden käsittelyssä	24
5.1 Mikrolevien hyödyntäminen kylmissä ilmastossa	24
5.2 Kestävyys ja ympäristövaikutukset	25
6 Tulevaisuuden tutkimuskohteita	27
7 Päätelmät	29
LÄHDELUETTELO	31

MERKINNÄT JA LYHENTEET

COD	kemiallinen hapenkulutus (chemical oxygen demand)
BOD	biologinen hapenkulutus (biological oxygen demand)
HRAP	rengaskanava-allas (high-rate algae pond)
ATP	Adenosiinitrifosfaatti
ADP	Adenosiinidifosfaatti
PAC	polyalumiinikloridi
PAM	polyakryyliamidi

JOHDANTO

Maailmassa on jatkuvasti pulaa puhtaasta ja turvallisesti käytettävästä vedestä. Teollisuus, maatalous ja kotitaloudet tarvitsevat valtavia määriä puhdasta vettä, eikä kuivilla tai köyhillä alueilla aina ole mahdollisuutta tarpeeksi laajaan jäteveden käsittelyyn. Perinteiset jäteveden käsittelymenetelmät kuluttavat paljon energiaa ja maailmassa yleisimmin käytetty, bakteerien toimintaan perustuva, puhdistusmenetelmä tuottaa myös kasvihuonekaasuja ja vaatii lähes aina kemikaaleja riittävän puhdistustuloksen saavuttamiseksi.

Yksisoluiset vedessä elävät mikrolevät kykenevät käyttämään jätevedessä olevaa orgaanista ainesta ravintonaan kasvaakseen ja lisääntyäkseen, mutta saavat yleensä tarvitsemansa energian yhteyttämisestä, minkä vuoksi ne tuottavat happea hiilidioksidin sijaan ja ovat vihreämpi vaihtoehto bakteereille. Mikrolevät myös poistavat jätevedestä tehokkaasti monia saasteita, joita bakteerit eivät poista, kuten raskasmetallit ja taudinaiheuttajat. Mikrolevät omaavat myös monia muita edullisia ominaisuuksia, kuten suuren proteiini- ja rasvaprosentin niiden painoon nähden. Näiden ominaisuuksien ansiosta mikroleviä voidaan jäteveden käsittelyn jälkeen hyödyntää monissa käyttökohteissa, kuten biopolttoainetuotannossa.

Mikrolevien mahdollisuuksia jätevesien käsittelyssä on alettu tutkia laajasti vasta viime vuosina, joten täysmittaisia mikroleviä hyödyntäviä jätevedenpuhdistuslaitoksia ei vielä juuri ole. Mikrolevien mahdollisuuksia kuitenkin tutkitaan runsaasti niiden monien edullisten ominaisuuksien ansiosta, ja tutkimukset lupailevat taloudellisempaa, monipuolisempaa ja hiili neutraalia vaihtoehtoa bakteereihin perustuvalle aktiivilietemenetelmälle.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään mikroleviä hyödyntäviin jätevedenpuhdistusteknologioihin, mikrolevien kasvatukseen ja mikrolevien mahdollisuuksiin edistää kestäväää taloutta aiempaa kirjallisuutta hyödyntäen. Jätevedenpuhdistusteknologioiden soveltuvuutta, tehokkuutta ja taloudellisuutta tarkastellaan erityisesti pohjoismaisesta näkökulmasta, mahdollisena korvaajana yleisesti käytössä olevalle aktiivilietemenetelmälle.

1 MIKROLEVÄT

Mikrolevät (Kuva 1) ovat mikroskooppisia aiotumallisia organismeja, jotka kykenevät fotosynteesiin ja lisääntyvät jakautumalla. Mikroleväsoluja ympäröi soluseinä ja solukalvo, niillä on tuma, fotosynteesiin tarvittavia viherhiukkasia ja muita soluelimiä. Mikrolevät käyttävät fotoneista saatavaa energiaa, hiilidioksidia ja niiden kasvualustasta saatavia ravinteita kasvaakseen ja lisääntyäkseen, ja tuottavat sivutuotteena happea (O₂). Monet mikrolevät ovat autotrofeja, eli ne tuottavat itse tarvitsemansa energian ja saavat orgaanisesta aineesta vain kasvuun tarvittavia ravinteita. Osa mikrolevistä on kuitenkin miksotrofisia ja kykenevät myös hyödyntämään orgaanista ainesta myös energian saantiin. Vain orgaanisesta aineesta energiansa saavia eliöitä kutsutaan heterotrofeiksi, ja ne saavat kasvuun tarvitsemansa energian muun muassa glukoosista. Mikrolevät tarvitsevat valosta ja pimeää aikaa toimiakseen normaalisti. Valoisana aikana autotrofiset mikrolevät muodostavat adenosiinitrifostaattia (C₁₀H₁₆N₅O₁₃P₃) eli ATP:tä ja NADPH-oksidaasia, jotka ovat solun energiatalouden kannalta oleellisia yhdisteitä. Pimeänä aikana mikrolevät keskittyvät biokemialliseen synteesiin ja tuottavat kasvuun tarvittavia molekyylejä. Heterotrofiset ja miksotrofiset mikrolevät kykenevät kasvamaan tauotta niin kauan kuin niillä on saatavilla tarpeeksi kasvuun tarvittavia yhdisteitä ja ravintoa. (Chai et al. 2021, Yousuf 2019)

Mikrolevien painosta merkittävä osa on vettä, mutta kuivapainosta yleensä noin 30–50 % on proteiinia, 20–40 % on hiilivetyjä ja 8–15 % on lipidejä (Yusuf 2019). Kasvuolosuhteet kuten valoisan ajan pituus ja ravinteiden saatavuus voivat kuitenkin muuttaa leväsolun koostumusta huomattavasti (Ferro et al. 2018). Tiettyjen ravinteiden puute voi saada leväsolut esimerkiksi valmistamaan suuria määriä lipidejä ja jopa moninkertaistamaan lipidien osuuden solun kuivapainosta.



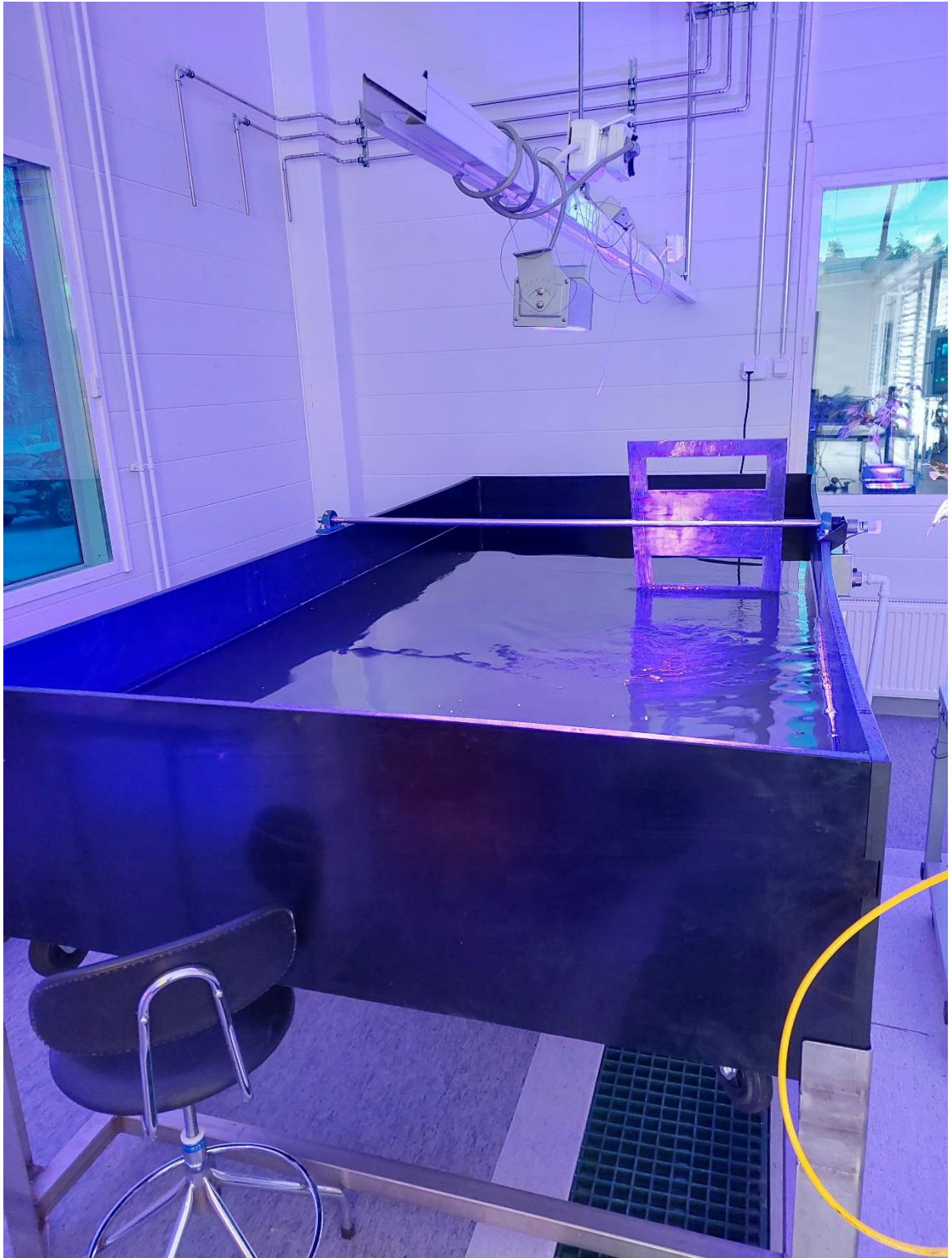
Kuva 1. Mikroleväkasvustoja erlenmayer pulloissa, Oulun Yliopisto, Oulu

2 MIKROLEVIEN KASVATUS

2.1 Avoimet kasvatussysteemit

Avoimet kasvatussysteemit ovat matalia, yleensä alle 0,5 metriä syviä sementistä valettuja, tai muovilla vuorattuja altaita, jotka saavat mikrolevien kasvuun tarvittavan hiilen ilman hiilidioksidista. Avoimia systeemejä käytetään kaupallisessa mikrolevien tuotannossa niiden helppokäyttöisyyden, ja alhaisten kustannuksien vuoksi. Avoimien systeemien huonona puolena ovat kuitenkin muun muassa veden haihtuminen, veden saastuminen ja huonommat mahdollisuudet vaikuttaa kasvutekijöihin, kuin suljetuissa systeemeissä. Avoimet kasvatussysteemit voidaan jakaa sekoittamattomiin ja sekoitettaviin altaisiin. Sekoittamattomat altaat ovat yksinkertaisimpia systeemejä, joissa mikroleviä voidaan kaupallisesti tuottaa. Ne ovat kuitenkin alttiita samoille ilmiöille kuin luonnon seisovat vedet, kuten huonosta kaasunvaihdosta johtuville ongelmille. Lisäksi sekoittamattomat altaat ovat mikroleville huonompi kasvualusta kuin sekoittavat altaat. (Zuccaro et al. 2019, kowthaman et al. 2021).

Sekoittavissa systeemeissä altaassa olevaa vettä sekoitetaan siipirattailla tai lastoilla (Kuva 2). Sekoittaminen saa veden ravinteet jakautumaan tasaisemmin, ja edistää ilman hiilidioksidin liukenemista veteen. Ilman sekoitusta pinnalla oleva levä saa valoa enemmän kuin se kykenee hyödyntämään, kun taas pinnan alla oleva levä ei saa tarpeeksi valoa kasvaakseen optimaalisesti. Sekoituksen ansiosta altaat tuottavat suurempia määriä mikrolevää verrattuna sekoittamattomiin altaisiin. Suosituin sekoittavan kasvatussysteemin malli on HRAP-allas eli "high rate algal pond", toiselta nimeltään rengaskanava-allas ("Raceway pond"), jossa siivet kierrättävät vettä juoksuradan muotoisessa kasvualtaassa. (Hossain & Mahlia 2019, Zhou et al. 2019)



Kuva 2. Yksinkertainen sekoittava-allas, CircLab. Ii

2.2 Fotobioreaktori-systeemit

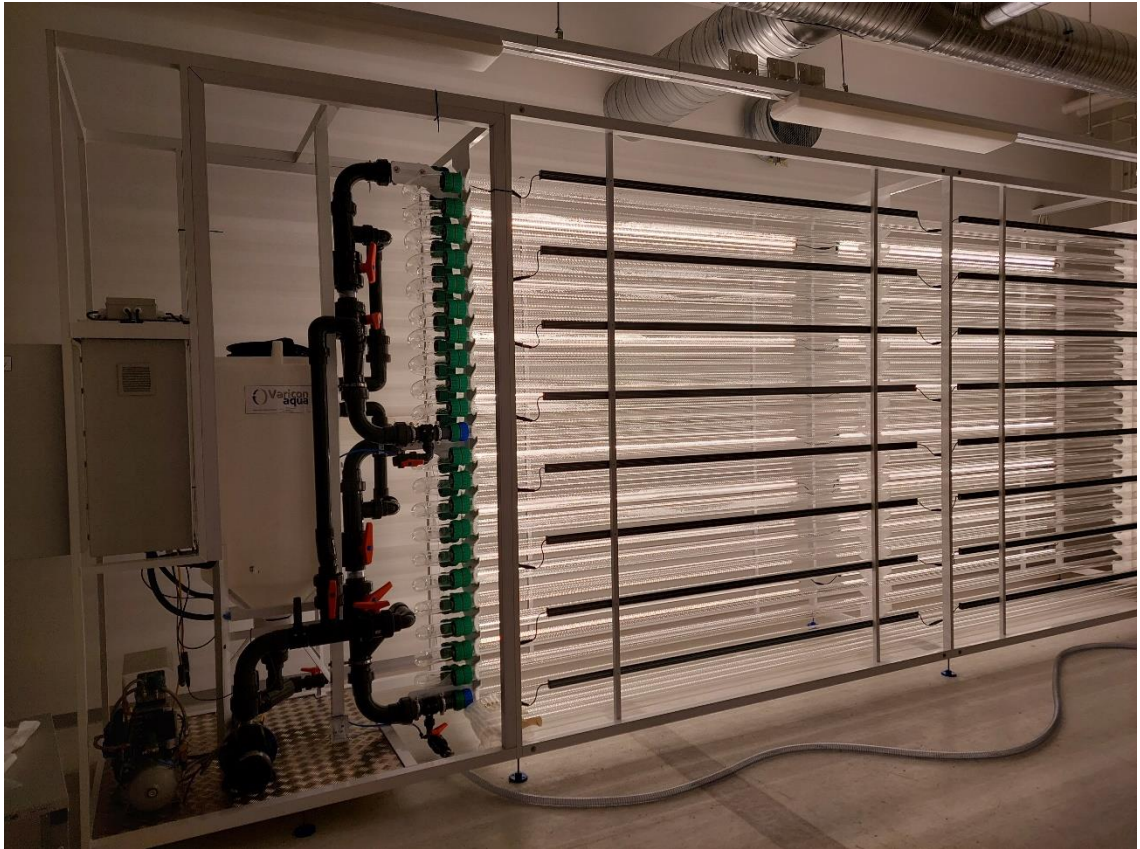
Fotobioreaktorit ovat usein suljettuja systeemejä, joiden kasvuolosuhteita, kuten ravinteiden määrää, pH:ta, valon intensiteettiä ja valoisan ajan pituutta pystytään säätämään huomattavasti helpommin kuin avoimien systeemien. Fotobioreaktorit ovat

käyttökustannuksiltaan kalliimpia kuin avoimet systeemit, mutta kasvuolosuhteet oikein säädettyinä niissä voidaan saavuttaa suurempi levämassa suhteessa käytettyyn vesimassaan, ja tuote on lisäksi puhtaampaa. (Hossain & Mahlia 2019)

Kolonnifotobioreaktorit ovat muovisia tai lasisia lieriöitä, joiden korkeus on maksimissaan noin neljä metriä, ja halkaisija on maksimissaan 20 cm, jotta myös kolonnin keskiössä olevat solut saavat tarpeeksi valoa. Kolonnifotobioreaktoreja käytetään bioprosesseissa ja jätevesien käsittelyssä niiden alhaisten käyttökustannusten takia. Kolonnifotobioreaktoreiden tehokkuus ja suurin mahdollinen biomassan tuotantonopeus ovat riippuvaisia kolonnin mitoista, valon intensiteetistä, pinta-alasta ja levälajille ominaisesta kaksinkertaistumisajasta. Kolonnifotobioreaktoreihin pumpataan hiilidioksidia kuplina, tasaisin väliajoin. Hiilidioksidikuplat sekoittavat vettä, tasaavat eroja levän valolle altistumisessa, laskevat pH:ta, auttavat lämmönsiirrossa ja tarjoavat leville niiden kasvuun tarvittavan hiilen. (Zuccaro et al. 2019)

Litteät fotobioreaktorit ovat läpinäkyvästä materiaalista valmistettuja, usein litteitä suorakulmaisia reaktoreita, joiden valaistu pinta-ala on suuri tilavuuteen verrattuna. Litteiden fotobioreaktorien toimintaperiaate on muuten hyvin samanlainen kuin kolonnifotobioreaktorien, joissa kaasukuplia käytetään massan sekoittamiseen ja ravinteiden säätelyyn (Kowthaman et al. 2021). Litteiden fotobioreaktorien etuna on niiden lämpötilan säätelyn helppous. Veden suihkuttaminen valaistulle pinnalle tai reaktorin asettaminen veteen on tehokas ja edullinen menetelmä systeemin lämmönsäätelyyn (Zuccaro et al. 2019).

Putkimaiset fotobioreaktorit (Kuva 3) koostuvat läpimitaltaan yleisesti alle 6 cm paksuista läpinäkyvistä putkista, joissa mikrolevät ja ravinne-liuos kiertävät pumpun avulla. Putkien reunoilla tai välissä voi olla säädeltäviä lamppeja valoisan ajan ja valointensiteetin säätelyä varten, tai fotobioreaktori voi hyödyntää myös pelkästään luonnonvaloa. Putkimaisten fotobioreaktorien putket voivat olla järjestettynä moninaisiin asentoihin, ja putkien yhteenlaskettu pituus voi olla jopa yli 100 metriä valonsaannin tehostamiseksi. Monet putkimaiset fotobioreaktorit eivät hyödynnä kaasukuplia sekoittamaan mikrolevämassaa, mikä voi johtaa levien myrkyttymiseen korkean happikonsentraation takia, jos liuos ei sekoitu riittävästi (Zuccaro et al. 2019).



Kuva 3. Putkimainen fotobioreaktori, CircLab, Ii.

2.3 Solid-state fotobioreaktorit

Sekä avoimet että suljetut kasvatusmenetelmät vaativat usein valtavia määriä vettä teollisella tasolla riittävän biomassan tuottamiseen. Solid-state fotobioreaktoreilla pyritään vähentämään veden kulutusta mikrolevien kasvatuksessa käyttämällä kasvualustana sen sijaan tukimateriaalia, joka sisältää pieniä määriä ravinteita sisältävää liuosta. Solid-state menetelmällä biomassan tuotanto ja fotosynteesin tehokkuus ovat korkeita, ja levän kerääminen solid-state reaktoreista on helppoa muihin fotobioreaktoreihin verrattuna. Solid-state reaktorin huono puoli on sen keskitasoa korkeammat kulut per kasvatettu yksikkö biomassaa (Zuccaro et al. 2019).

3 MIKROLEVIEN HYÖDYNTÄMINEN JÄTEVESIEN KÄSITTELYSSÄ

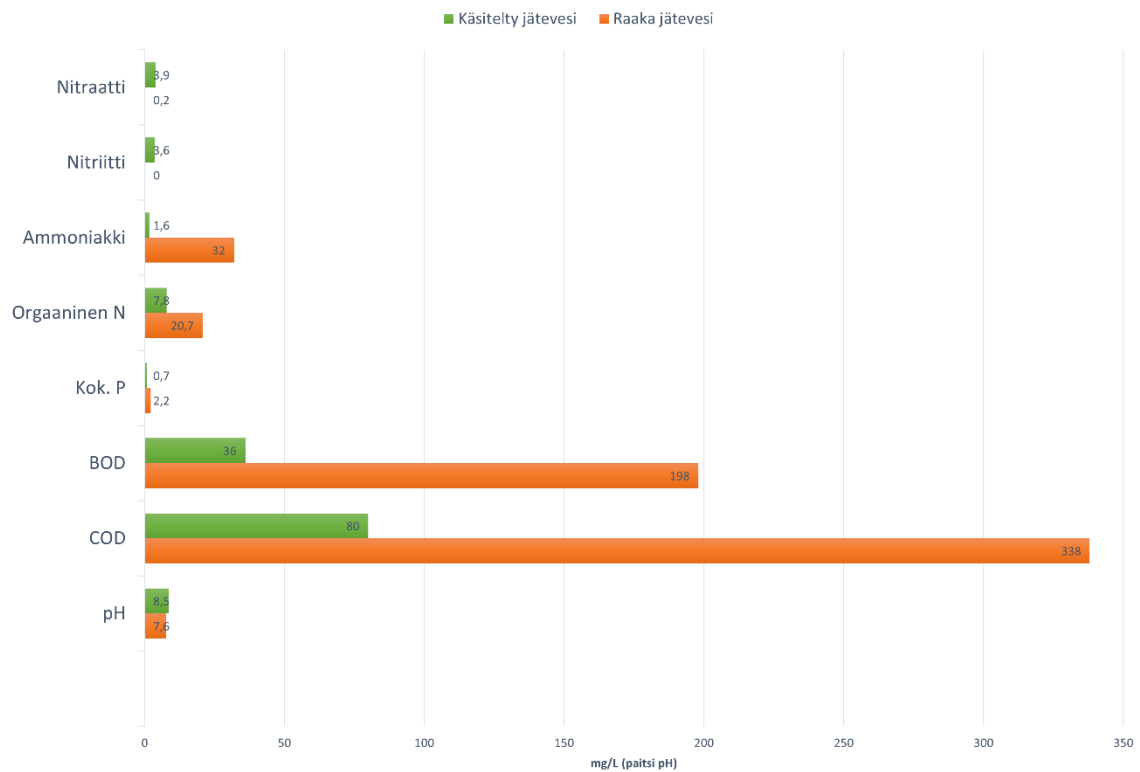
Jätevesissä on runsaasti erilaisia ihmisille ja luonnolle haitallisia yhdisteitä, jotka on poistettava ennen kuin jätevesi voidaan käyttää uudelleen tai johtaa luontoon. Raskasmetallit, taudinaiheuttajat, lääkeaineet, sekä rehevöitymistä aiheuttavat fosfori ja typpi (N) ovat vain osa jätevesissä ongelmallisina määrinä olevista yhdisteistä ja alkuaineista. Mikrolevien hyödyntäminen jätevesien puhdistamisessa on lupaava menetelmä epäpuhtauksien poistoon ja maataloudelle tärkeiden alkuaineiden, fosforin ja typen, talteenottoon ilman kemikaaleja tai kallista laitteistoa. (Chai et al. 2021)

Monissa kunnallisissa jätevedenpuhdistamoissa käytetään aktiivilietemenetelmää puhdistamaan jätevettä. Aktiivilietemenetelmässä esiselkeytyksen jälkeen vedessä olevien mikrobien annetaan käyttää jätevedessä olevaa orgaanista ainetta ravintonaan, sitoen epäpuhtaudet itseensä. Mikrobien kuoltua ne uppoavat altaan pohjalle muodostaen lietettä, jonka jälkeen jätevesi käsitellään vielä kemiallisesti, esim. pH:n sääteliseksi. Puhdas vesi voidaan palauttaa käsittelyn jälkeen luonnolliseen vedenkiertoon. Menetelmä muistuttaa osin mikroleviä hyödyntävää jätevedenpuhdistusta, sillä molemmissa yksisolujen eliöiden annetaan käyttää epäpuhtauksia ravintonaan. (Luhtaniemi 2017)

Mikroleviä hyödyntävässä yhdyskuntajätevesien puhdistuksessa jätevesi ohjataan esiselkeytyksen jälkeen jatkuvatoimisesti sekoittavaan ”kilparata-altaaseen” (raceway pond), jossa siihen lisätään puhdistuksessa käytettävää mikrolevää. Jäteveden annetaan viipyä altaassa yli vuorokauden, minä aikana mikrolevät poistavat vedestä epäpuhtauksia. Riittävän epäpuhtauksien poiston jälkeen jätevesi ohjataan separaattoriin, jossa mikrolevä poistetaan jätevedestä flokkulaatiolla ja veteen lisätään tarpeellisia kemikaaleja, kuten polyalumiinikloridia (PAC) ja polyakryyliamidia (PAM). (Kohlheb et al. 2020)

Egyptissä on tutkittu mikrolevien mahdollisuuksia helpottaa maan vesipulaa puhdistamalla yhdyskuntajätevesiä HRAP systeemeillä suoraan esimerkiksi maatalouden käyttöön, palauttamatta vettä ensin luonnon kiertokulkuun. Matruhin kuvernoraattiin rakennettiin kolme hehtaarin kokoista aiempaan pilottikokeeseen perustuvaa ulkoilmassa olevaa HRAP- allasta, joiden toimintasyyvyys on 0,3 metriä ja viipymäaika 10 päivää. Systemin runsaslukuisin levälaji oli *Microcystis flos-aqua*, mutta myös muita levälajeja esiintyi kasvustoissa. (El-Mekkawi et al. 2021)

Altaiden toimintaa tutkittiin 24 kuukauden ajan, jonka jälkeen mikrolevien avulla käsitellyn jäteveden COD:n ja BOD₅:n todettiin laskeneen mikroleväkäsittelyn jälkeen keskimääräisesti 258 mgO₂/L ja 162 mgO₂/L. Kokonaisfosfori vähentyi 1,5 mgPO₄/L, orgaaninen typpi 12,9 mgN₂/L ja ammoniakki (NH₃) 30,4 mgNH₃/L. Käsitellyn veden nitriitti- (NO₂⁻) ja nitraattipitoisuudet (NO₃⁻) nousivat kuitenkin 3,6 mgNO₂/L ja 3,7 mgNO₃/L. Veden pH nousi myös 0,9 yksikköä. (El-Mekkawi et al. 2021)



Kuva 4. Matruhin kuvernoraatissa mitatut keskimääräiset arvot käsittelemättömälle ja puhdistetulle jätevedelle 24 kuukauden ajalta (El-Mekkawi et al. 2021).

Kokeissa käytetyn laitoksen rakennuskustannukset olivat yhteensä 8730 \$ laitteisto ja asennuskulut mukaan luettuna. Laitoksen kokonaiskäyttökustannukset olivat 12,8 \$/d ja netto tulo 4.35 \$/d. Laitos kulutti 86 KJ energiaa per kuutio käsiteltyä jätevettä, joka kului veden pumppaamiseen ja sekoittamiseen. Hyvän puhdistustuloksen ja alhaisten kustannusten lisäksi käsittelyssä syntynyt mikrolevämassa olisi ollut mahdollista hyödyntää raaka-aineena polttoainetuotannossa. Mikrolevien avulla käsitelty jätevesi voidaan käyttää maanviljelyssä, kun taas laajasti Egyptissä käytössä olevissa hapetusaltaissa puhdistettu vesi pumpataan aavikolle, missä se voi vaarantaa pohjavettä. HRAP teknologiaa hyödyntävä Matruhin jätevedenpuhdistuslaitos hyödyntää siis vihreämpää teknologiaa kuin monet käytössä olevat perinteiset puhdistuslaitokset, ja on

myös levätuotannosta saatavien tulojen vuoksi taloudellisesti kannattava. (El-Mekawi et al. 2021)

3.1 Metallit

Yksi aktiivilietemenetelmälle ongelmallinen haitta-aine on raskasmetallit. Raskasmetallit ovat luonnossa suurina määrinä vahingollisia eliöille, ja tuhoavat biologisessa jätevedenpuhdistuksessa käytettäviä mikrobeja (Tuomala 2018). Raskasmetallit myös vaikeuttavat puhdistuksessa syntyvän lietteen hyötykäyttöä (Tuomala 2018). Mikrolevien on todettu tehokkaasti vähentävän raskasmetallien määrää jätevedessä sitomalla raskasmetalleja sekä eläviin että jo kuolleisiin leväsoluihin. Mikroleväsolujen pinnalla on useita erilaisia funktionaalisia ryhmiä, jotka kykenevät sitomaan eri metalleja, poistaen ne jätevedestä. Kationit leväsolu adsorboi funktionaalisia ryhmiä, kuten hydroksyyli-, karboksyyli- ja aminoryhmiä sisältävään solupintaan. Leväsolut kykenevät siirtämään tarpeellisia metalleja solunkalvon sisälle soluelimiin ja sitomaan akkumuloituvan solunsisäisen ja solun pinnalla olevat metallit ligandeilla, kuten fytokelatiineilla. Ainoastaan tietyt mikrolevälajit kykenevät kuitenkin kasvuun raskasmetallipitoisissa vesissä, ja tehokkaaseen metallien poistoon monien eri metallien suhteen. Myös kasvuolosuhteet, kuten pH, ravinteiden määrä ja metallien pitoisuudet vaikuttavat merkittävästi levälajien kykyyn poistaa metalleja jätevedestä. (Naaz et al. 2021, Chai et al. 2021)

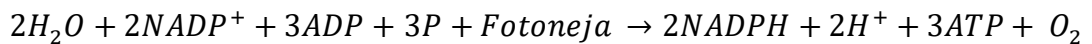
Metallien poistoa jätevedestä on testattu muun muassa *Desmodesmus* ja *Chlorella sorokiniana*- levälajeilla Pohangin kaupungin jätevedessä Koreassa. Molempien lajien suorituskykyä testattiin sekä käänteisosmoosilla käsitellyssä jätevedessä, sekä kiintoainepoistolla käsitellyissä jätevesissä. Kahdeksan päivää kestäneen käsittelyn jälkeen *Desmodesmus* ja *Chlorella sorokiniana* olivat vähentäneet jätevesinäytteen metallipitoisuuksia merkittävästi, erityisesti sinkin (Zn), mangaanin (Mn) ja koboltin (Co) pitoisuudet olivat laskeneet (Taulukko 1.). *Spirulina*-suvun lajikkeella saavutettiin punaista LED-valoa käytettäessä jopa 100 % kromin (Cr) poisto Yamuna-joen vedessä. (Do et al. 2021, Kumar, N et al. 2021 a)

Taulukko 1. Metallien pitoisuuksien lasku prosentteina Pohangin jätevesinäytteissä 8 päivän mikroleväkäsittelyn jälkeen (Do et al. 2021).

	Primäärikäsitelty jätevesi, <i>Desmodesmus</i>	Käänteisosmoosilla käsitelty jätevesi, <i>Desmodesmus</i>	Primäärikäsitelty jätevesi, <i>C.sorokiniana</i>	Käänteisosmoosilla käsitelty jätevesi, <i>C.sorokiniana</i>
Mn	100 %	100 %	100 %	98 %
Zn	100 %	73 %	100 %	64 %
Rb	53 %	5 %	24 %	1 %
Ni	23 %	46 %	37 %	50 %
Al	Ei havaittu	100 %	Ei havaittu	100 %
Co	20 %	60 %	31 %	62 %
Li	2 %	18 %	16 %	13 %

3.2 Fosfori ja typpi

Fosfori (P) on ravinne ja yksi tärkeimmistä rehevöitymistä aiheuttavista alkuaineista. Sitä päätyy jätevesiin esimerkiksi maatalouden ja paperiteollisuuden päästöinä. Fosforilla on tärkeä rooli myös leväsolun kasvussa, aineenvaihdunnassa ja energian varastoinnissa, mistä johtuen mikrolevät poistavat jätevedestä fosforia kasvaessaan ja lisääntyessään. Epäorgaanisen fosforin translokaatio tapahtuu mikrolevän solukalvolla. Solun aineenvaihdunnan seurauksena epäorgaaninen fosfori liitetään orgaanisiin yhdisteisiin, kuten ADP:hen, monovetyfosfaattina (HPO_4^{2-}) ja divetyfosfaattina (H_2PO_4^-) ADP:n muodostuminen ATP:ksi kaavion 1 mukaan vaatii fosforin lisäksi energiaa fotonien muodossa. ATP:n muodostumiseen vaadittavan energian solu voi saada yhdisteiden hapettumisen, mitokondrioiden toiminnan tai yhteyttämisen seurauksena. (Chai et al. 2021, Zhou et al. 2019)



Kaavio 1. ADP:n reaktio ATP:ksi fotosynteesissä.

Orgaanista typpeä pääsee jätevesiin esimerkiksi maatalouden seurauksena. Typpi on tarpeellinen alkuaine monissa elämälle välttämättömissä yhdisteissä, kuten entsyymeissä, proteiineissa, ATP:ssa, ADP:ssa ja lehtivihreässä. Aitotumaiset leväsolut kykenevät redusimaan epäorgaanisessa muodossa olevan typen solukalvon pinnalla nitraatiksi, nitriitiksi ja lopulta aminohapoiksi, eli typen orgaaniseen muotoon. Typen redusointiin osallistuu ATP:n muodostumisreaktioon osallistunut NADP, joka luovuttaa elektroneja typen redusointiin ammoniakiksi. Solulimassa ammoniakki muuttuu solun aineenvaihdunnan kautta aminohapoiksi. Leväsolut pystyvät hyödyntämään monia yhdisteitä typenlähteenään, kuten ammoniakkia ja ureaa ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). Ammoniakki on mikroleville helposti hyödynnettävä typen lähde, ja mikrolevät hyödyntävät sitä tehokkaasti. Liallinen ammoniakkin määrä saattaa kuitenkin haitata leväsolujen yhteyttämistä. (Chai et al. 2021, Zhou et al. 2019, Zuccaro et al. 2019)

Kiinassa *Chlorella vulgaris* levälajiketta kasvatettiin Shenzhen kaupungin jätevesissä, minkä seurauksena veden kokonaisfosforikonsentraatio laski 5,2 mg/L arvoihin 0–0,6 mg/L ja kokonaistypnikonsentraatio laski 44,0 mg/L välille 2,1–5,4 mg/L (El-Mekkawi et al. 2021). Mikrolevien kasvun kannalta otollisissa olosuhteissa fosforin- ja typenpoisto ovat siis erittäin tehokkaita, ja riittäisivät ympäristönsuojelulain (13.1.2017/19) 154 b §

mukaiseen perustason puhdistusvaatimukseen, mikä on kokonaisfosforille 70 % ja kokonaistypen osalta 30 % (YSL 16:154 b §).

3.3 Taudinaiheuttajat ja vaaralliset kemikaalit

Jätevedessä on paljon haitallisia bakteereja, kuten *Salmonella enterica*, jotka ovat ihmisille ja eliöille vaarallisia. Bakteerit ja mikrolevät kilpailevat samoista ravinteista jätevedessä, ja kilpailun ansiosta mikroleville otollisissa olosuhteissa bakteerikannat kuolevat ravinnon puutteeseen. Jotkin mikrolevälajit, kuten *Synechocystis sp.* myös tuottavat myrkyjä ja pitkäketjuisia rasvahappoja, joiden on todettu olevan vaarallisia taudinaiheuttajille. Mikrolevien fotosynteesin seurauksena jäteveden pH-arvo yleensä kohoaa solun vapauttamien *OH*-ionien seurauksena. Kohonnut pH-arvo ja pH:n vaihtelet voivat myös hidastaa taudinaiheuttajien toimintaa tai aiheuttaa taudinaiheuttajien kuoleman. (Chai et al. 2021)

Intiassa on lisääntyvien saasteiden ja maatalouden takia kuivakauden aikaan pula makeasta vedestä. Monissa vesistöissä elää antibiooteille vastustuskykyisiä bakteereja, mikä entisestään vähentää turvallisesti käytettävissä olevan veden määrää. Kolkatassa sijaitsevasta lammesta eristettiin *Pseudochlorella pringsheimii*-lajin mikrolevää, jonka suorituskykyä testattiin monille eri antibiooteille immuuneja koliformisia bakteerikasvustoja vastaan. Tutkimuksessa havaittiin, että vaikka kolmella kymmenestä jätevedessä olevista bakteerikannoista oli merkittävä vastustuskyky antibiootteja ja raskasmetalleja kohtaan. Koliformisten bakteerien kokonaismäärä jätevedessä putosi havaitsemattoman pieneksi mikrolevien vaikutuksesta viidessä vuorokaudessa. (Kumar, V et al. 2021 b)

3.4 Mikrolevien erottaminen käsitellystä jätevedestä

Yksisoluisten mikrolevien erottaminen jätevedestä käsittelyn jälkeen on yksi merkittävimmistä ongelmista mikrolevien hyödyntämisessä. Erotusmenetelmät voivat nostaa kuluja, olla energiantensiivisiä tai rajoittaa laitoksen kapasiteettia, koska biomassan osuus kasvatusliuoksessa on yleensä alhainen. Mikroleväsoluilla on myös yleensä negatiivinen varaus, mikä pitää solut usein erillään toisistaan. (Zhou et al. 2019)

Sedimentaatio ei erotusmenetelmänä vaadi energiaa, mutta levälajista riippuen sedimentaationopeus vaihtelee välillä 0,008–11 g/(L*h). Mikrolevien sedimentaatio on siis hidasta, ja sopiva erotusmenetelmä vain tietyille suurikokoisille tai suuritiheyksisille lajikkeille. Sentrifugointi sen sijaan on nopea ja tehokas erotusmenetelmä, mutta kuluttaa niin paljon energiaa, että levämässän sentrifugointiin kuluva energia olisi moninkertainen levästä valmistetun biodieselin sisältämään energiaan verrattuna. Hyödyntämällä sentrifugointia muiden menetelmien kuten suodatuksen jälkeen laskisi sentrifugoinnin kuluttama energia huomattavasti. (Zhou et al. 2019, kowthaman et al. 2021)

Vähemmän energiaa kuluttavia menetelmiä ovat esimerkiksi flokkulaatio ja suodatus. Flokkulaatiolla voidaan saavuttaa jopa 95 % erotustehokkuus noin tunnissa, mutta flokkulaatiossa käytettävät rauta- ja alumiinisuolet, sekä polymeerit estävät mikrolevien käytön elintarvike- ja lannoitetuotannossa. *Chlorella vulgaris* soluja tutkivassa kokeessa todettiin, että leväsolujen laskeutumiseen vaikuttavat flokkien muoto, koko ja tiheys, jotka nopeuttivat levän vajoamista pohjalle. Veden virtaus ja sekoittaminen edistävät leväsolujen flokkulaatiota. Sopivalla sekoituksella leväsolut törmäilevät toisiinsa enemmän ja muodostavat veteen enemmän pohjalle vajoavia flokkeja. Kalvosuodatus on sopiva erotusmenetelmä, jos mikrolevien tiheys on matala, mutta kiinteitä partikkeleita sisältävät vedet eivät sovellu kalvosuodatukseen, koska jäteveden sisältämät partikkelit tukkivat kalvosuodattimen. (Zhou et al. 2019) (Li et al. 2021)

4 MIKROLEVIEN HYÖDYNTÄMINEN JÄTEVESIEN PUHDISTAMISEN JÄLKEEN

4.1 Mikrolevien hyödyntäminen biopolttoainetuotannossa

Biopolttoaineita kuten biodieseliä, biokaasua ja bioetanolia voidaan valmistaa maassa kasvavien kasvien, kuten rypsin ja maissin sijaan tehokkaammin mikrolevistä. Biodieseltuotannon kannalta tärkeä lipidipitoisuus voi olla mikrolevillä jopa 80 % niiden kuivapainosta kasvuolosuhteet oikein optimoituina, ja mm. biokaasun ja bioetanolin kannalta tärkeä hiilivetyjen määrä on myös mikrolevissä korkea. Mikrolevien etu tyypillisiin biopolttoaineiden raaka-aineisiin, kuten sokeriruokoon on niiden nopea lisääntyminen ja massan moninkertaistuminen. Monet kasvatusmenetelmät myös vievät huomattavasti vähemmän pinta-alaa kuin monisoluisien kasvien kasvattamiseen tarvittavat pellot, ja soveltuvat myös viljelykelvottomille alueille. Mikrolevien kasvusykli on erittäin lyhyt, ne tuottavat tavanomaisiin viljelykasveihin verrattuna 15–300-kertaisen määrän öljyä suhteessa viljeltyyn pinta-alaan, eivätkä mikrolevät ole yhtä riippuvaisia vuodenajasta. Mikrolevät vaativat vähemmän kasvupinta-alaa, ja lisääntyvät nopeasti, joten tuotannon siirtäminen sisätiloihin kylmän kauden ajaksi esimerkiksi pohjoismaissa olisi helpompaa kuin tavanomaisten öljykasvien. Arvioiden mukaan, jos Intia käyttäisi 10 % jätevedestään mikrolevätuotantoon se voisi korvata yli 45 % dieselkulutuksestaan mikroleviin pohjautuvilla biopolttoaineilla (Kumar et al. 2021 b). Ainoastaan tietyt mikrolevälajit kuitenkin saavuttavat erittäin korkeita öljypitoisuuksia, ja lisäksi leväkasvustot ovat herkkiä saastumiselle. Monia biopolttoaineita, kuten bioöljyä ja vetyä, voidaan valmistaa biomassasta termokemiallisilla prosesseilla, mutta mikrolevien korkean vesipitoisuuden takia termokemiallisten prosessien hyödyntämisen kannattavuus on kyseenalaista. (Yusuf 2019) (Jämsä et al. 2017) (Yousuf 2019)

Biokaasutuotannossa syntyvä raakakaasu sisältää metaanin lisäksi hiilidioksidia, sekä jäämiä vedestä, hapesta ja rikkivedystä. Erityisesti metaanin ja hiilidioksidin suhdetta on tärkeää säädellä, koska raakakaasun metaanipitoisuus voi vaihdella 55 %-70 % välillä ja lähes loput kaasusta on palamatonta hiilidioksidia. Moottorit ja voimalat voivat vaatia polttoaineekseen kaasua, jonka metaanipitoisuus on jopa yli 90 %, joten metaanipitoisuuden nostaminen on tärkeää. Mikrolevien biologisen hiilidioksidin kulutuksen ansiosta jätevedenpuhdistuksessa syntyvästä lietteestä valmistetun biokaasun hiilidioksidipitoisuutta voitaisiin vähentää jopa 90 %. Biokaasutuotannon biologista

hapenkulutusta voidaan myös vähentää lisäämällä mädätysprosessiin mikroleviä (Srinuanpan et al. 2019). Useassa tutkimuksessa on todettu mikrolevien lisäävän mädätysprosessin metaanituotantoa, toisaalta biokaasu on halvempaa kuin leväbiomassa, joten pelkän levämassan mädättäminen ei ole taloudellisesti varteenotettava vaihtoehto. Mikroleviä raaka-aineena käyttävän biodieseltuotannon sivutuotteena syntyvä öljytön leväbiomassa sen sijaan on otollista raaka-ainetta mädätykselle, ja syntyvää biokaasua voidaan hyödyntää kattamaan osa biodieseltuotannon vaatimasta energiasta. Mikrolevien hyödyntäminen ei kuitenkaan sovellu kaikille jätevesille, ja tulokset heikkenevät, mikäli hyödynnettävä jätevesi ei tarjoa mikroleville riittävän hyvää kasvualustaa. Kasvua haittaavien yhdisteiden, kuten liiallisten raskasmetallien, konsentraatio ja veden sameus huonontavat merkittävästi leviä hyödyntävien menetelmien tehokkuutta. (Catone et al. 2021, Yusuf 2019)

Prosesseja myös muiden hiilivetytypoltoaineiden valmistamiseen on kehitetty, ja leväbiodieselistä voidaan valmistaa kaikkia perinteisiä petrolipohjaisia polttoaineita hiilivetyketjujen pituutta muokkaamalla. Hiilivetyjen lisäksi mikroleviä voidaan hyödyntää syanobakteerien tavoin vetytuotannossa. Mikrolevät hyödyntävät vesimolekyylien hapettumisessa vapautuvia elektroneja pelkistämään H^+ -ioneja vetymolekyyleiksi. Mikroleväsolut kykenevät tuottamaan vetykaasua myös hyödyntämällä glykolyysissä, eli soluliman ATP-ta tuottavassa reaktiossa, vapautuvia elektroneja pelkistämään H^+ -ioneja. Mikrolevät kykenevät myös muodostamaan vetyä anaerobisesti, käymistä muistuttavassa reaktiossa, mutta kaikki kolme reaktiota vaativat tarkkaa valoisan ajan säätelyä ja hapetonta ympäristöä. Vetykaasun saanto pitäisi kuitenkin moninkertaistaa, jotta menetelmästä tulisi käyttökelpoinen, vaikka mikrolevät kuten *Chlamydomonas reinhardtii*, tuottavatkin vetyä tehokkaammin kuin syanobakteerit. (Yusuf 2019, Catone et al. 2021)

4.2 Mikrolevien hyödyntäminen maataloudessa ja ravintona

Mikrolevät keräävät jätevesien käsittelyn yhteydessä itseensä paljon ravinteita, joita hyödynnetään myös maataloudessa. Mikrolevämassaa mädättämällä voidaan valmistaa biokaasun lisäksi ravinnerikasta sivutuotetta, jota voidaan käyttää maataloudessa lannoitteena. Lannoittamalla maa mikrolevämassalla, tai siitä valmistetuilla lannoitteilla kaikki mikroleväsolujen itseensä keräämät ravinteet päätyvät jälleen maaperään viljelykasvien hyödynnettäväksi. *Spirulina platensis*-lajin mikrolevän käyttö lannoitteena

on tuottanut samanlaisia tuloksia kuin kaupallisten lannoitteiden käyttö (Catone et al. 2021).

Joidenkin mikrolevien ruoka-aineita muistuttavan aminohappokoostumuksen, sekä korkeiden proteiini-, hiilihydraatti- ja lipidipitoisuuksien ansiosta mikrolevistä voitaisiin valmistaa myös eläinrehua. Esimerkiksi *Nannochloropsis oceanica*-lajin kalorimääräksi todettiin tutkimuksissa 6,43 kcal/g kalankasvatuksen jätevesissä kasvatettuna, ja 4,9 kcal/g kunnallisessa jätevedessä kasvatettuna. Tutkimuksen mukaan biomassa kelpaisi siipikarjan- ja kalankasvatukseen (Catone et al. 2021). Mikrolevistä valmistettuja ravinnelisiä on jo nyt myynnissä kaupoissa, ja mikrolevien korkean proteiinipitoisuuden vuoksi ne voivat olla nopeasti kasvatettava proteiinin lähde. Ihmisravinnoksi kasvatettaessa jäteveden saasteita olisi kuitenkin tarkasti seurattava, jotta levä olisi varmasti ihmisravinnoksi kelpaavaa, ja esimerkiksi raskasmetallien päätyemiseltä ihmiskehoon välttyttäisiin.

Mikroleviä on mahdollista kasvattaa monissa maatalouden jätevesissä, ja mikrolevien avulla valtavia määriä ravinteita voitaisiin saada takaisin hyötykäyttöön, vähentäen samalla ympäristölle ja kunnalliselle jätevedenpuhdistukselle aiheutuvaa kuormitusta. Maito-, siipi-, lihakarjan ja kalan kasvatuksessa syntyvät jätevedet ovat esimerkkejä tuotannoista, jotka tuottavat rasvoilla, proteiineilla, hapoilla ja ravinteilla saastunutta jätevetä. Eläinten kasvatuksessa syntyvän veden COD ja BOD ovat myös yleensä erityisen korkeita. Mikrolevien avulla voitaisiin puhdistaa kunnallisen jätevedenhuollon ulottumattomissakin olevilla alueilla jätevesiä ravinteista, metalleista ja orgaanisesta aineksesta, sekä samalla vähentää biologista- ja kemiallista hapenkulutusta jopa yli 80 %:lla. (Goswami et al. 2021)

Mikrolevien korkean proteiini- ja rasvapitoisuuden lisäksi mikrolevät sisältävät monia yhdisteitä, joilla on todettu olevan positiivisia terveysvaikutuksia, kuten terveellisiä lipidejä, vitamiineja ja peptidejä. Kyseisillä yhdisteillä on monia anti-inflammatorisia, antimikrobisia ja provitamiinisia vaikutuksia. Lisäksi mikrolevien sisältämällä polysakkarideilla on todettu olevan virusten toimintaa ehkäiseviä vaikutuksia, ja polysakkaridit estävät esimerkiksi SARS-CoV-2-viruksen, eli COVID-19 tautia aiheuttavan viruksen toimintaa. SARS-CoV-2-viruksen pinnalla olevat proteiinit tarttuvat kiinni erityisen tiukasti tiettyihin polysakkarideihin, mikä estää virusta infektoimasta ihmissolua. Jäteveden käsittelyssä kasvatettuja mikroleviä pystytään kuitenkin harvoin

hyödyntämään ihmisravinnoksi jätevedessä olevien terveydelle haitallisten yhdisteiden takia, jotka siirtyvät jätevedestä leväsoluihin. Jätevedessä olevien haitallisten aineiden lisäksi flokkulaatiota edistävät kemikaalit ovat usein myrkyllisiä, joten ravinnoksi kasvatettaessa mikroleville on hyödynnettävä vaihtoehtoisia erotusmenetelmiä. (Kwon, P. S. 2020) (Goswami et al. 2021)

5 MIKROLEVIEN EDUT JA HAASTEET JÄTEVEDEN KÄSITTELYSSÄ

5.1 Mikrolevien hyödyntäminen kylmissä ilmastoissa

Kylmässä ilmastossa mikrolevien käyttöä jätevedenpuhdistuksessa rajoittavat talvella huomattavasti valon määrä ja lämpötila. Liika pimeys rajoittaa leväsolujen kykyä yhteyttää, ja vähäinen valo yleensä johtaa hitaampaan aineenvaihduntaan ja jakautumiseen. Jatkuva valon vähyys voi johtaa myös solun vaipumiseen horrosta muistuttavaan tilaan. Lämpötilan lasku alle optimaalisen kasvulämpötilan vähentää solujen jakautumista, ja 10°C:n lasku lämpötilassa voi vähentää jakautumisnopeutta jopa 50 %. Lämpötilan laskun seurauksena solujen muoto ja koko voivat myös muuttua levälajista riippuen. (Ferro et al. 2018)

Pohjois-Ruotsista, Uumajasta eristetyllä levälajilla suoritetussa kokeessa mitattiin leväkasvuston kasvun pysähtymistä eri lämpötiloissa ja valaistusolosuhteissa. Lämpötilassa 25°C ja jatkuvassa valossa kasvusto saavutti maksimikokonsa 13 päivässä, talviolosuhteissa 15°C ja 6 tunnin valoisalla ajalla 40–45 päivässä, 5°C lämpötilassa ja jatkuvassa valossa 20–30 päivässä ja jatkuvassa pimeydessä 25°C lämpötilassa kasvusto saavutti maksimikokonsa 50–65 päivässä. Kaikkien mikroleväkasvustojen biomassat saavuttivat maksimikoossaan kuitenkin samanlaisia massoja kuin jatkuvassa valossa ja 25°C lämpötilassa, ja olosuhteet vaikuttivat lähinnä kasvunopeuteen. (Ferro et al. 2018)

Baltian meren rannikolta kylmästä ilmastosta eristetyillä mikrolevillä suoritetussa tutkimuksessa todettiin, että yli viikon kestävän sopeutumisaajan jälkeen mikrolevät poistivat noin 10°C lämpötilassa ravinteita ja kasvattivat biomassaa yhtä tehokkaasti kuin huoneenlämmössä. Poikkeuksena ravinteiden poistoon olivat typpi, jonka poisto oli huomattavasti hitaampaa kylmissä olosuhteissa, ja fosfori, jonka poisto sen sijaan oli nopeampaa kylmissä olosuhteissa. Erot johtuvat oletettavasti lämpötilariippuvaisista reaktioista, ammoniakkin ja nitriitin hapettumisesta, joiden hidastuessa alhaisemmissa lämpötiloissa typen ja fosforin suhde jätevedessä muuttuu, ja typen suurempi konsentraatio tehostaa fosforin poistoa jätevedestä. (Jämsä et al. 2017)

Itämerestä eristetyllä *Scenedesmaceae*-sukuun kuuluvalla viherlevälajikkeella suoritetuissa kylmän ilmaston pilottikokeissa lajike vähensi yhdyskuntajäteveden COD-

arvoa huomattavasti. COD laski EU:n yhdyskuntajätevesien käsittelydirektiivissä (UWWTD) 91/271/ETY määrätyle tasolle viidessä vuorokaudessa. Kokeissa havaittiin Itämerestä eristetyn lajikkeen saavuttavan myös fosforin- ja typenpoistolle vaaditut rajat, kun taas EU direktiivissä vaadittuja arvoja ei saavutettu näytteissä, joissa hyödynnettiin sekalaisesti eri leviä ja bakteereja Itämerestä eristetyn Scenedesmeaceae-sukuun kuuluvan levän sijaan. (Jämsä et al. 2017)

5.2 Kestävyys ja ympäristövaikutukset

Mikroleviin pohjautuva jätevesienkäsittely on monin tavoin kestävämpää kuin perinteiset käsittelymenetelmät. Lähes kaikki kustannukset mikroleviä hyödyntävässä jätevedenpuhdistuksessa tulevat jäteveden pumppaamisesta, mikrolevien kasvatukseen kuluista ravinteista, mikrolevien erottamisesta käsitelystä jätevedestä ja kylmissä olosuhteissa lämmityksestä. HRAP:t eivät esimerkiksi vaadi aktiivilietemenetelmän tavoin ilmastusta. Mikroleviä hyödyntävä jätevesien käsittely kuluttaa huomattavasti vähemmän kemikaaleja ja energiaa. Saksassa tehtyjen arvioiden mukaan vuoden 2020 HRAP-teknologialla jätevesienkäsittely olisi $0,08 \text{ €/m}^3$ halvempaa kuin aktiivilietemenetelmällä, ja sähkönkulutus olisi 78 % alhaisempi. Arviota tukee Matruhissa tehty koe, jossa mikroleviin perustuvaa jätevedenpuhdistusta tutkittiin taloudellisesta näkökulmasta koetta varten rakennetussa puhdistuslaitoksessa. *Microcystis flos-aqua*-levää ja viherleviä hyödyntävään laitokseen sijoitetun pääoman tuottoasteeksi arvioitiin 97,3 %. Lisäksi suurikokoisen laitoksen yhteenlaskettu energiankulutus olisi vain $0,02 \text{ kWh m}^{-3}$, hiilidioksidinkulutus 647.8 tonnia vuodessa ja hapentuotanto olisi 470,4 tonnia vuodessa (El-Mekkawi et al. 2021). Mikroleviä hyödyntävät jätevedenpuhdistuslaitokset voisivat pilottien ja tutkimusten perusteella olla erittäin ympäristöstävällinen ja energiatehokas jätevedenpuhdistusmenetelmä. (Kohlheb et al. 2020).

Monet teolliset prosessit tuottavat hiilidioksidia, jota voidaan hyödyntää mikrolevien hiilen lähteenä. Käyttämällä teollisuudessa syntynyttä hiilidioksidikaasua mikroleviä hyödyntävässä jätevedenpuhdistuksessa olisi mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. Aktiivilietemenetelmässä bakteerien toiminta sen sijaan tuottaa hiilidioksidia ja muita kasvihuonekaasuja, kuten N_2O :ta. Aktiivilieteprosessi on kuitenkin joidenkin tutkimusten mukaan hieman HRAP-menetelmää tehokkaampi poistamaan jätevedestä ravinteita (Kohlheb et al. 2020).

Mikroleviä hyödyntävästä jätevesienkäsittelystä syntyvää biomassaa voidaan käyttää teollisuuden raaka-aineena. Verrattuna aktiivilietemenetelmässä syntyvään liejuun mikrolevät ovat sivutuotteena paljon monipuolisempia. Ravintolisät, lannoitteet ja biopoltoaineet ovat esimerkkejä arvokkaista tuotteista joiden valmistukseen mikrolevät soveltuvat nopean kasvun, sekä korkean rasva- ja ravinne pitoisuuden vuoksi erittäin hyvin (Yousuf, A. 2019). Mikrolevien käyttömahdollisuuksia rajoittaa kuitenkin jäteveden laatu, joka saattaa estää mikrolevien käytön joissain kohteissa. Mikrolevät maksavat takaisin osan kasvatuksen ja jätevedenpuhdistuksen aiheuttamista kuluista ja tarjoavat samalla teollisuudelle ei-neitseellisiä raaka-aineita.

6 TULEVAISUUDEN TUTKIMUSKOhteITA

Mikrolevien kasvatuksesta ja sen käytöstä jätevesien puhdistuksessa on tehty jo useita tutkimuksia, mutta pilottikokeista täysimittaiseen tuotantoon siirtyminen aiheuttaa usein leville epäihanteelliset olosuhteet, eikä pilottikokeiden kasvunopeuksia tai veden puhtautta saavuteta (Chai et al. 2021). Teollisen mittakaavan kasvatukseen tarvitaan vielä tutkimusta ja optimointia. Erityisesti mikrolevien soveltuvuutta kylmien alueiden jätevedenpuhdistukseen ei ole vielä testattu labra- ja pilottikokeita suuremmassa mittakaavassa riittävästi. Mikrolevälajien väliset erot ja optimaalisten jäteveden käsittelytulosten saavuttamiseen vaikuttavat olosuhteet vaativat vielä paljon lisää tutkimusta. Myös menetelmissä, joilla mikrolevistä valmistetaan biopolttoaineita, on paljon paranneltavaa. Esimerkiksi pyrolyysiä hyödyntävää menetelmää monien biopolttoaineiden valmistamiseen on tutkittu, sillä pyrolyysi mahdollistaisi märän biomassan hyödyntämisen biopolttoainetuotannossa (Goswami, et al. 2021).

Mikrolevien geenimanipulointia on pidetty yhtenä mahdollisena ratkaisuna parantamaan mikrolevien ominaisuuksia. Geenimanipulaatio ei kuitenkaan välttämättä ole tehokas menetelmä ennen kuin kasvatukseen käytettävät mikrolevät ja kasvatusmenetelmät ja mikroleviä käyttävät prosessit ovat vakiintuneet (Chai et al. 2021). Käyttötarkoitusten ja kasvatukseen käytettävien mikrolevien ominaisuuksien muuttaminen voivat muuttua. Esimerkiksi raskasmetallien sietokyvyn nostaminen ja solukoon kasvattaminen jätevedestä erottamisen helpottamiseksi ovat ominaisuuksia, joihin voitaisiin geenimanipulaatiolla vaikuttaa. Geenimanipulaatioon liittyy kuitenkin riskejä, kuten geenimanipuloitujen lajien karkaaminen luontoon.

Hybridisysteemit joissa hyödynnetään sekä aktiivilietemenetelmää, että mikroleviä vaativat vielä paljon tutkimusta, mutta ensimmäiset kokeet antavat lupaavia tuloksia tehokkaammasta ja vähemmän energiaa kuluttavasta jätevedenpuhdistusmenetelmästä. Mikroleviin pohjautuvan jätevedenpuhdistuksen tavoin myös hybridisysteemeissä on vielä paljon optimoitavaa. Nykyisiä malleja on tehtävä yksinkertaisemmiksi, prosessivaiheita voidaan mahdollisesti yhdistää ja mikrolevien keräämistä voidaan tehostaa. (Saúco et al. 2021)

Mikrolevätutkimusta on tehty viime aikoina monissa Suomen yliopistoissa, kuten Itä-Suomen yliopistossa, Oulun yliopistossa ja Helsingin yliopistossa. Mikrolevien kasvatusta on testattu niin louhosten reaktiivissa, kuin kiertovesikalankasvattamojen

jätevesissä, jossa vedet saataisiin puhdistettua edullisemmin ja ympäristöystävällisemmin, luomalla samalla teollisuudelle raaka-aineita. Mikrolevätutkimukseen panostetaan kuitenkin myös muualla, esimerkiksi Iissä sijaitsevassa Micropoliksessa olevassa CircLab-laboratoriossa, jossa on mikrolevien kasvatukseen soveltuva pilottilaitteisto. CircLabissa on sekä avoin kasvatusallas (kuva 2), putkimainen fotobioreaktori (kuva 3), sekä levän ja veden erottamiseen soveltuva sentrifugi. CircLab-hankkeessa testattiin vuosien 2019 ja 2022 aikana mikrolevien kasvatusta kaivosvedessä, avoimessa kasvatusaltaassa. Kokeessa tutkittiin, kuinka hyvin jäteveden sisältämiä ravinteita voidaan puhdistaa kaivosvedestä mikrolevien avulla ja saada näin myös uusiokäyttöön.

7 PÄÄTELMÄT

Mikroleviä hyödyntävien jäteveden käsittely menetelmien on todettu poistavan vedestä tehokkaasti monia saasteita ja haitallisia aineita tarkoitukseen sopivalla mikrolevälajilla ja leville otollisissa kasvuolosuhteissa. Erityisesti mikrolevien kyky poistaa jätevedestä metalleja ja taudinaiheuttajia tekee mikrolevistä sopivan menetelmän myös alueilla, joissa saasteita on jätevedessä paljon. Mikrolevien hyödyntäminen vedenpuhdistusprosessissa vähentää ulkoisen energian tarvetta verrattuna moniin laajasti käytössä oleviin menetelmiin, ja säästää puhdistusprosesseissa käytettäviä kemikaaleja. Jätevesien käsittelyssä mahdollisesti käytettäviä mikroleviä ei kuitenkaan tunneta yhtä hyvin kuin bakteereja, joten prosessin hallinta ja optimointi voi olla vaikeampaa. Mikrolevän erottaminen käsitellystä jätevesimassasta kuluttaa valtavia määriä energiaa, ja osa menetelmistä kuluttaa enemmän energiaa kuin mikrolevistä voitaisiin tuottaa. Mikäli solid-state-fotobioreaktoreiden kaltaista kiinteää kasvualustaa voitaisiin hyödyntää jätevedenkäsittelyssä levien hyödyntämisestä tulisi merkittävästi kannattavampaa ja energiatehokkaampaa, sillä levän erottamiseen vedestä kuluvat kemikaalit tai energia säästyisi.

Jätevesien puhdistuksessa syntyvää biomassaa voitaisiin käyttää korvaamaan merkittäviä määriä eri fossiilisia polttoaineita suuren lipidipitoisuuden ja viljelykelpoisen maan säästymisen vuoksi. Erityisesti biodieselin tuotannossa mikroleviä voitaisiin alkaa hyödyntää merkittävässä mittakaavassa jo lähivuosina, ja mikroleväbiodiesel voi olla merkittävässä roolissa petrolipohjaisten polttoaineiden vähentämisessä. Muiden biopolttoaineden tuotannosta on lupaavia merkkejä, mutta jatkotutkimukselle on valtavasti tarvetta niiden kannattavuuden selvittämiseksi. Jätevedessä kasvatettujen mikrolevien hinta on kilpailukykyinen fossiilisten polttoaineiden kanssa, koska tarvittavat ravinteet saadaan jätevedestä. Polttoaineiden lisäksi mikrolevistä voidaan valmistaa eläinrehua tai ihmiskäyttöön soveltuvia positiivisia terveysvaikutuksia omaavia ravintolisiä, mikäli jätevedessä olleiden haitallisten aineiden pitoisuudet ovat alhaisia.

Kylmien olosuhteiden kokeiden tuloksista voidaan päätellä, että mikrolevien käyttö jätevedenpuhdistuksessa on mahdollista leville ankarista olosuhteista riippumatta. Talvisaikaan nopeat lämpötilan laskut ja pakkasen kuitenkin estävät ulkoilma-alaisten käytön, jolloin jätevedenpuhdistus olisi tehtävä sisätiloissa kontrolloidussa lämpötilassa. Sisätiloissa sen sijaan auringonvalo jouduttaisiin mitä luultavimmin korvaamaan

valaisimilla, joista yhdessä lämmityksen kanssa saattaa muodostua huomattavaa energiankulutusta ja kustannuksia.

Mikroleviin pohjautuvat jätevesien käsittelymenetelmät vaativat vielä paljon tutkimusta saavuttaakseen toistuvasti ja teollisessa mittakaavassa tutkimusten ja pilottikokeiden saavuttamia tuloksia solujen lipidipitoisuuksissa, sekä jätevesien puhdistustuloksissa. Mikrolevät ovat tutkimusten perusteella kuitenkin kestävä ja vihreä ratkaisu jäteveden käsittelyyn, ja lisäksi kustannustehokkaampi kuin monet nykyiset menetelmät. Jäteveden käsittelyssä syntyvää mikrolevämassaa hyödyntämällä voitaisiin myös korvata osa biopolttoaineiden tuottamiseen kuluva kasvimassasta. Vapautuva viljelysmaa voitaisiin käyttää ruokakasvien viljelyyn ja helpottaa maailman ruokapulaa.

LÄHDELUETTELO

Catone, C.M., Ripa, M., Geremia, E. & Ulgiati, S. 2021, "Bio-products from algae-based biorefinery on wastewater: A review". *Journal of environmental management*, vol. 293, 112792.

Chai, W.S., Tan, W.G., Halimatul Munawaroh, H.S., Gupta, V.K., Ho, S. & Show, P.L. 2021, "Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review". *Environmental Pollution*, vol. 269, 116236

Do, J.-., Jo, S.-., Yeo, H.-., Shin, D.H., Oh, H., Hong, J.W. & Yoon, H.-. 2021, "Biological treatment of reverse osmosis concentrate by microalgae cultivation and utilization of the resulting algal biomass". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 42, 102157

El-Mekkawi, S.A., Doma, H.S., Ali, G.H. & Abdo, S.M. 2021, "Case study: Effective use of Microphytes in wastewater treatment, profit evaluation, and scale-up life cycle assessment". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 41, 102069

EUR-Lex. (2014). Neuvoston direktiivi 91/271/ETY, annettu 21 päivänä toukokuuta 1991, yhdyskuntajätevesien käsittelystä.

Ferro, L., Gorzsás, A., Gentili, F.G. & Funk, C. 2018, "Subarctic microalgal strains treat wastewater and produce biomass at low temperature and short photoperiod". *Algal Research*, vol. 35, S. 160-167.

Goswami, R.K., Mehariya, S., Verma, P., Lavecchia, R. & Zuorro, A. 2021, "Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, 101747

Hossain, N. & Mahlia, T.M.I. 2019, "Progress in physicochemical parameters of microalgae cultivation for biofuel production". *Critical reviews in biotechnology*, vol. 39, no. 6, S. 835-859.

Jämsä, M., Lynch, F., Santana-Sánchez, A., Laaksonen, P., Zaitsev, G., Solovchenko, A. & Allahverdiyeva, Y. 2017, "Nutrient removal and biodiesel feedstock potential of green

alga UHCC00027 grown in municipal wastewater under Nordic conditions". *Algal Research*, vol. 26, S. 65-73.

Kohlheb, N., van Afferden, M., Lara, E., Arbib, Z., Conthe, M., Poitzsch, C., Marquardt, T. & Becker, M.-. 2020, "Assessing the life-cycle sustainability of algae and bacteria-based wastewater treatment systems: High-rate algae pond and sequencing batch reactor", *Journal of environmental management*, vol. 264, 110459.

Kowthaman, C.N., Senthil Kumar, P., Arul Mozhi Selvan, V. & Ganesh, D. 2022, "A comprehensive insight from microalgae production process to characterization of biofuel for the sustainable energy". *Fuel*, vol. 310, 122320

Kumar, N., Hans, S. & Srivastava, A. 2021, "Chromium bioremediation from river Yamuna using cyanobacteria at white and red illumination wavelengths". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 44, 102416.

Kumar, V., Jaiswal, K.K., Verma, M., Vlaskin, M.S., Nanda, M., Chauhan, P.K., Singh, A. & Kim, H. 2021, "Algae-based sustainable approach for simultaneous removal of micropollutants, and bacteria from urban wastewater and its real-time reuse for aquaculture". *Science of the Total Environment*, vol. 774, 145556.

Kwon, P.S., Oh, H., Kwon, S.-., Jin, W., Zhang, F., Fraser, K., Hong, J.J., Linhardt, R.J. & Dordick, J.S. 2020, "Sulfated polysaccharides effectively inhibit SARS-CoV-2 in vitro". *Cell Discovery*, vol. 6, no. 1.

Li, L., Chen, W., Wang, Y., Zhang, Y. & Chen, H. 2021, "Effect of hydrodynamics on autoflocculation and gravity sedimentation of *Chlorella vulgaris*". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43.

Luhtaniemi, S. 2017, "Lämpötilan vaikutus aktiivilieteprosessin toimintaan ja ohjaukseen", kandidaatintyö, Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201705031645>.

Naaz, F., Bhattacharya, A., Mathur, M., Bano, F., Pant, K.K. & Malik, A. 2021, "Exploration of heavy metal uptake potential of three algal strains/consortia in suspended and attached growth systems". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43.

Saúco, C., Cano, R., Marín, D., Lara, E., Rogalla, F. & Arbib, Z. 2021, "Hybrid wastewater treatment system based in a combination of high rate algae pond and vertical constructed wetland system at large scale". *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43.

Srinuanpan, S., Cheirsilp, B. & Kassim, M.A. 2019, "Oleaginous microalgae cultivation for biogas upgrading and phytoremediation of wastewater". *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, S. 69-82.

Tuomala, E. 2018, "Raskasmetallipitoisten jätevesien käsittelyvaihtoehtojen vertailu", opinnäytetyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018112017525>.

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527.

Yousuf, A. 2019, "Microalgae cultivation for biofuels production". *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. United Kingdom: Academic Press, is an imprint of Elsevier. S. 1-82.

Yusuf, C. 2019, "Introduction to algal fuels". *Biomass, biofuels and biochemicals: Biofuels from algae* (2nd ed.). S. 1-31.

Zhou, W., Lu, Q., Han, P. & Li, J. 2019, "Microalgae cultivation and photobioreactor design". *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. United Kingdom: Academic Press, is an imprint of Elsevier. S. 31-50.

Zuccaro, G., Yousuf, A., Pollio, A. & Steyer, J. 2019, "Microalgae cultivation systems". *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. United Kingdom: Academic Press, is an imprint of Elsevier. S. 11-29.