

**Mikromuovit jätevedenpuhdistamoilla –
fotosynteettisten mikrolevien mahdollisuudet
mikromuovien poistamisessa**

TkK-tutkielma

Turun yliopisto

Bioteknologian laitos

Biotekniikka

Huhtikuu 2024

Saana Lahdenperä

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TIIVISTELMÄ

TURUN YLIOPISTO

Bioteknologian laitos

SAANA LAHDENPERÄ: Mikromuovit jätevedenpuhdistamoilla – fotosynteettisten mikrolevien mahdollisuudet mikromuovien poistamisessa

TkK-tutkielma, 29 s.

Biotekniikka

Huhtikuu 2024

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -järjestelmällä.

Mikromuovit ovat muoveja, jotka ovat halkaisijaltaan alle 5 mm. Niin merästä, maaperästä kuin juomavedestä on löydetty mikromuoveja. Avainasemassa mikromuovien hallinnassa sekä toisaalta mikromuovien vesistöön päästäjinä ovat jätevedenpuhdistamot, joiden läpi kulkee suuria määriä vettä jatkuvasti. Jätevedenpuhdistamot poistavat suurimman osan mikromuoveista jo esi- ja primäärikäsittelyn aikana. Ongelmaksi ovat kuitenkin osoittautuneet kaikkein pienimmän kokoluokan mikromuovit, jotka pääsevät jätevedenpuhdistusprosessista läpi. Noin 10 µm mikromuovit saattavat päästä jo solukalvon läpi, ja mikromuovien kertyminen ja säilyvyys aiheuttavat huolta, etenkin kun tehokkaita poistamismenetelmiä ei välttämättä ole.

Voivatko fotosynteettiset mikrolevät auttaa mikromuovien poistamisessa? Mikromuovien on havaittu sitoutuvan mikrolevien pintaan, jolloin niiden biosorptiota voitaisiin hyödyntää ratkaisuisissa. Mikrolevillä on myös muita mahdollisia mekanismeja, kuten bioakkumulaatio ja biohajottaminen, joiden avulla ne voisivat poistaa mikromuoveja jätevedestä. Mikrolevät erittävät solunulkoisia polymeerisiä aineita (engl. extracellular polymeric substances, EPS), jotka ovat osana biofilmin muodostamisesta. Mikromuovien on huomattu muodostavan mikroleväbiofilmiä kanssa heteroagregaatteja, jotka voitaisiin poistaa jätevedestä helpommin. Mikroleviä voitaisiin myös hyödyntää kalvobioreaktorien (engl. membrane bioreactor, MBR) kehittämisessä. MBR:t poistavat mikromuoveja jätevedenpuhdistustekniikoista tehokkaimmin mutta silti pienimmät muovit jäävät tällä hetkellä poistamatta. Kalvofotobioreaktorit (engl. membrane photobioreactor, MPBR) voivat toimia tapana liittää mikrolevät osaksi jätevedenpuhdistusprosessia.

Fotosynteettiset mikrolevät ovat kiinnostuksen kohteena sillä ne voivat hyödyntää valoenergiaa ja hiilidioksidia. Mikrolevien hyödyntäminen kiinnostaa niiden mahdollisen energiatehokkaan tuotannon takia. Soveltamalla fotosynteettisiä mikroleviä vedenpuhdistukseen voitaisiin samanaikaisesti puhdistaa vettä ja jopa poistaa epäpuhtauksia, kuten mikromuoveja, sekä kasvattaa biomassaa, jota voidaan myös käyttää raaka-aineena kolmannen sukupolven biopolttoaineisiin.

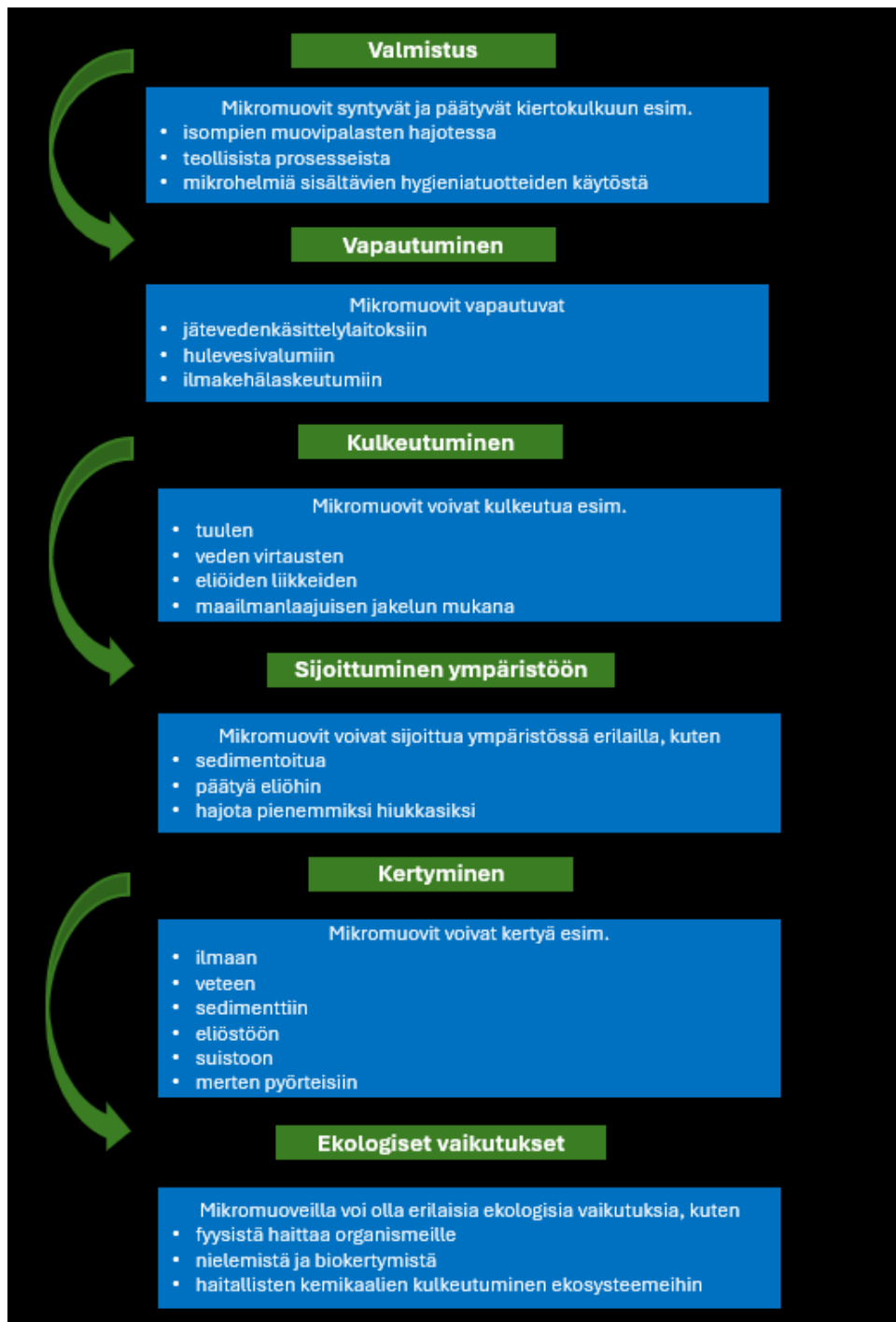
Asiasanat: mikromuovit, jätevedenpuhdistus, fotosynteettiset mikrolevät, biosorptio, MBR, MPBR, EPS, biofilmi, biohajottaminen

Sisällys

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Johdanto | 2 |
| 2 Jätevedenpuhdistamoiden peruseriaatteet ja mikromuovit jätevedenpuhdistamolla ... | 6 |
| 3 Fotosynteettisten mikrolevien mekanismit mikromuovien poistamiseksi | 9 |
| 3.1 Biosorptio ja bioakkumulaatio | 9 |
| 3.2 Biohajottaminen | 11 |
| 3.3 Biofilmin muodostaminen ja EPS:ät | 13 |
| 4 Fotosynteettiset mikrolevät mikromuovien poistossa jätevedenpuhdistamoilla..... | 15 |
| 5 Yhteenveto | 21 |
| Kirjallisuus | 25 |

1 Johdanto

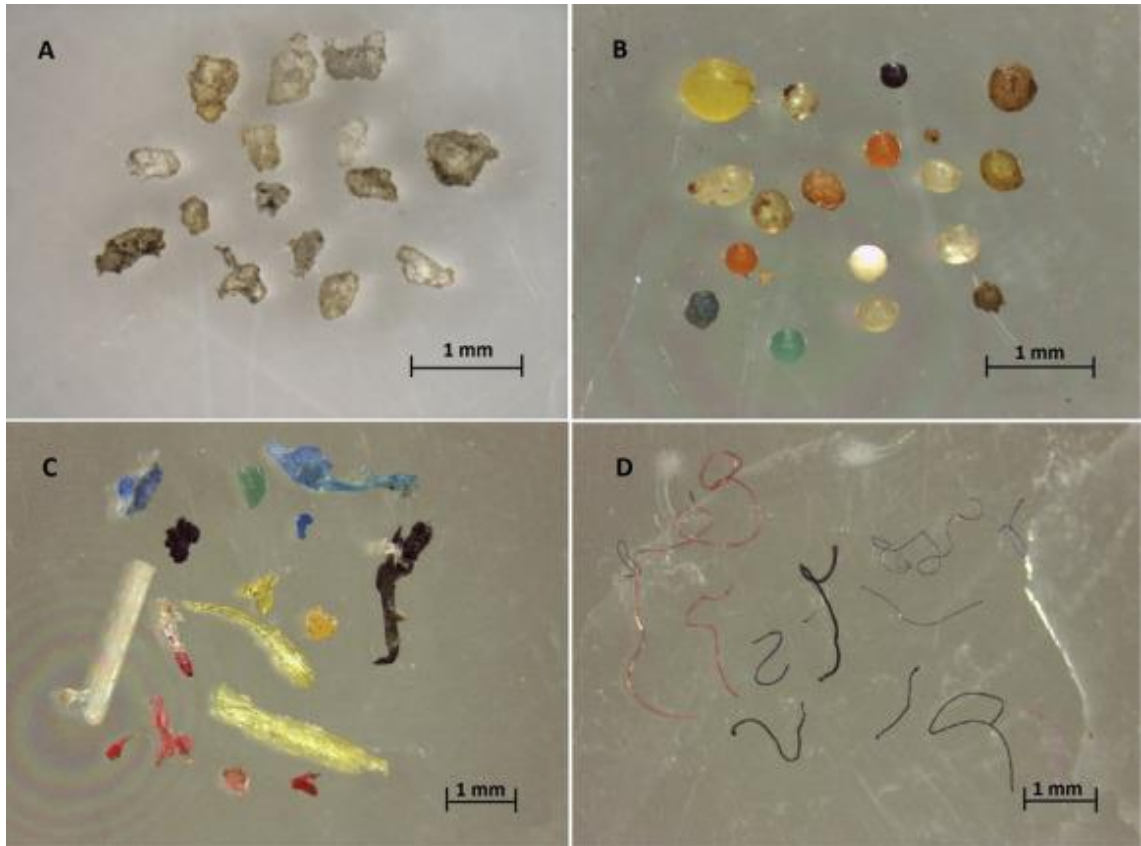
Viimeisten 70 vuoden aikana muovien tuotanto on ollut jyrkässä kasvussa: vuonna 1950 maailmassa tuotettiin vain 2 miljoonaa tonnia muovia, kun nykypäivänä määrä on yli 450 miljoonaa tonnia (Ritchie ja muut 2023). Muovit ovat synteettisiä polymeerejä, jotka ovat käytössä laajalti monissa sovelluksissa esimerkiksi elintarvikepakkauksissa, rakentamisessa ja lääketieteellisissä välineissä (Ahmed ja muut 2022). Muovit ovat halpoja materiaaleja ja niillä on monia edullisia ominaisuuksia, kuten suuri lujuuspainosuhte, mikä on etuna esimerkiksi tavaroiden kuljetuskustannusten alentamisessa. Esimerkiksi polyeteenitereftalaattipullot (engl. Polyethylene terephthalate, PET) vähentävät kuljetuksiin liittyvää energian tarvetta 52 % verrattuna lasipulloihin. (Narancic ja muut 2020.) Hyödyllisyydestään huolimatta muovien tuotantomäärien kasvamisen ohella myös muovijätteen määrä on kasvanut. Huonosti käsitellyt muovit, joita ei kierrätetä, polteta tai säilytetä suljetuilla kaatopaikoilla, päätyvät ympäristöön. Esimerkiksi valtameriin päätyy vuosittain yhdestä kahteen miljoonaa tonnia muovia (Ritchie ja muut 2023). Vesiympäristöissä muovit pääsevät leviämään esimerkiksi hydrodynaamisten prosessien mukana aiheuttaen maailmanlaajuisia saastumista (Kuva 1) (Du ja muut 2021).



Kuva 1. Yleiskuvaa mikromuovien elinkaaresta ympäristössä. Kuva muokattu lähteestä (Jain ja muut 2023).

Suurempien muovikappaleiden pirstoutuessa syntyy pienempiä muovipalasia, mikromuoveja. Mikromuovit määritellään kokonsa perusteella yleensä muoveiksi, jotka ovat halkaisijaltaan alle 5 mm. Mikromuovit voidaan jakaa primäärisiksi ja sekundaarisiksi muovipartikkeleiksi niiden lähteiden perusteella (Kuva 2). Primääriset mikromuovit ovat muoveja, jotka on valmistettu tarkoituksenmukaisesti mikrokokoisiksi,

esimerkiksi kosmetiikkatuotteisiin lisätyt muovihelmet, kun taas puolestaan sekundaariset mikromuovit syntyvät, kun isommat muovinpalaset hajoavat ympäristössä. (Du ja muut 2021.) Mikromuoveja on havaittu maailmanlaajuisesti erilaisissa ympäristöissä, kuten maassa ja merissä. Nämä mikrokoon muovit ovat uhka vesieliöille, linnuille ja eläimille, jotka luulevat niitä ruoaksi ja nielevät muovin palasia. Mikromuovien nieleminen voi johtaa sisäisiin vaurioihin ja nälkiintymiseen tai kuolemaan. Esimerkiksi vesieliöiden kautta mikromuovit voivat päätyä myös ravintoketjuun, mikä herättää huolenaihetta mikromuovien vaikutuksesta myös ihmisterveyteen. Mikromuoveja on havaittu esimerkiksi vesijohtovedessä ja niiden on huomattu kerääntyvän myös maaperään, missä ne voivat vahingoittaa kasveja ja muita eliöitä. (Jain ja muut 2023.) Mikromuoveille jatkuva altistuminen herättää huolta, etenkin kun mikromuovit säilyvät ja kerääntyvät luonnossa eikä keinoja niiden tehokkaaseen poistamiseen ole (Prata ja muut 2021). Lisäksi muut haitalliset ympäristön epäpuhtaudet, kuten raskasmetallit ja liuennut orgaaninen materiaali, voivat myös sitoutua mikromuoveihin ja sitä kautta päästä ravintoketjuun. Esimerkiksi hydrofobisuus, ioniset vuorovaikutukset sekä vetysidokset ovat mikromuovin rakenteesta ja ominaisuuksista riippuvia voimia, jotka edesauttavat epäpuhtauksien sitoutumista mikromuoviin. (Rafa ja muut 2024.)



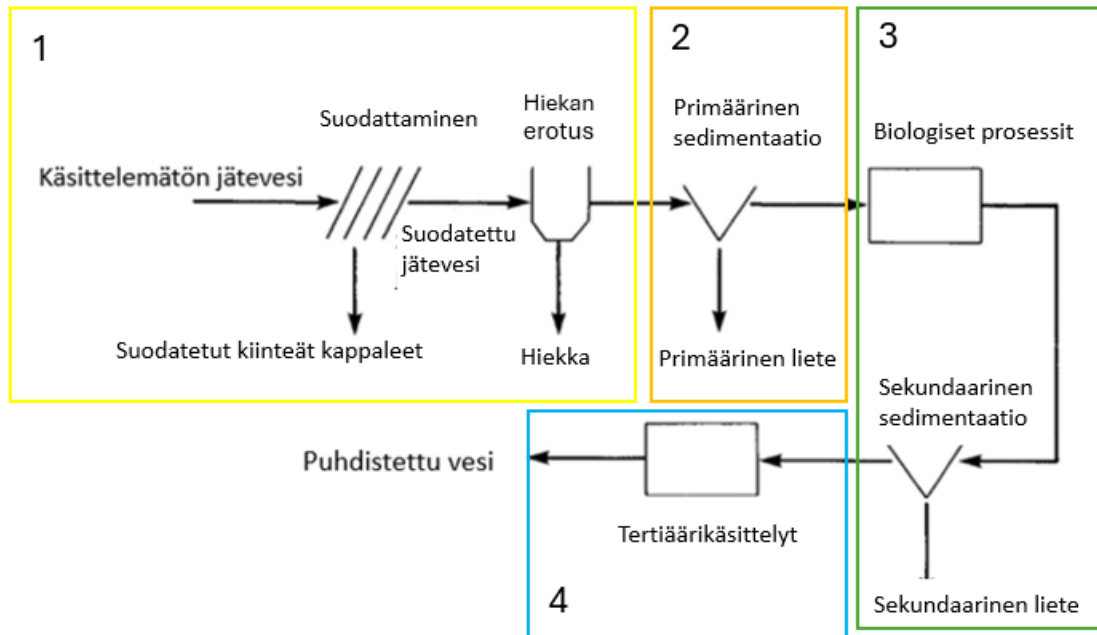
Kuva 2. Esimerkki Suomessa olevien jätevedenpuhdistamoiden ulostulovedestä löydetystä mikromuoveista. Havaittiin primäärisiä mikromuoveja (a, b) ja sekundaarisia mikromuoveja (c,d). Primääriset mikromuovit ovat mikrohelmiä, jotka ovat peräisin hygieniatuotteista. Sekundaariset mikromuovit ovat isompien muovien paloja tai synteettisiä tekstiilikuituja. Kuva on lähteestä (Talvitie, Mikola, Koistinen, ja muut 2017).

Jätevedenpuhdistamot toimivat yhtenä reittinä, jonka kautta mikromuovit voivat joutua mereen (Murphy ja muut 2016; Talvitie ja muut 2015). Jätevesien käsittely on maailmalajuisen haaste erilaisten muuttujien, kuten alueellisten olosuhteiden sekä epäpuhtauksien, kuten raskasmetallien, nitraattien ja fosfaattien sekä myös mikromuovien, takia. Nämä useat orgaaniset ja epäorgaaniset epäpuhtaudet niin kunnallis-, maatalous-, kuin teollisuusvesissä vaarantavat niin ravitsemuksemme kuin terveytemme. Siksi onkin tärkeää kehittää jätevedenpuhdistusmenetelmiä, joiden avulla voidaan päästä eroon epäpuhtauksista ja mahdollistaa puhtaan vedensaanti. Puhtaan veden saatavuus ja vesistöjen saastuminen on globaali ongelma. (Wollmann ja muut 2019.) Fotosynteettisiä mikroleviä tutkitaan yhä enemmän arvokkaiden tuotteiden, kuten biopolttoaineiden ja lannoitteiden, valmistuksessa (Barone ja muut 2020). Fotosynteettisten mikrolevien käyttäminen vedenpuhdistuksessa tarjoaisi keinon niin puhdistaa vettä kuin tuottaa biomassaa ja mahdollisesti uusia arvokkaita tuotteita

(Abdelfattah ja muut 2023). Onko fotosynteettisistä mikrolevistä myös mikromuovien poistajiksi? Tämän tutkielman tarkoitus on selvittää, voivatko fotosynteettiset mikrolevät auttaa mikromuovien poistossa jätevedenpuhdistamoissa.

2 Jätevedenpuhdistamoiden peruseriaatteet ja mikromuovit jätevedenpuhdistamolla

Jätevedenpuhdistamoiden tarkoitus on konvertoida jätevedessä olevat yhdisteet stabiileiksi lopputuotteiksi, jotka voidaan turvallisesti vapauttaa takaisin sisä- ja merivesiin aiheuttamatta haitallisia ekologia vaikutuksia, kuten ympäristön saastumista ja rehevöitymistä jätevesien seurauksena. Tarkoitus on myös turvata kansanterveys sekä varmistaa, että jätevedet hävitetään toistuvasti ja luotettavasti tarjoten taloudellinen jäteveden hävittämismenetelmä. Lisäksi tavoitteena on kierrättää ja kerätä talteen arvokkaat komponentit. Jätevedenpuhdistamoiden prosessit koostuvat pääasiassa erilaisista mekaanisista, kemiallisista ja biologisista prosesseista. (Gray 2004 s. 133.) Gray on kirjassaan lajitellut puhdistusprosessit viiteen kategoriaan: esikäsittelyyn (Kuva 3. nro 1), primääriseen (Kuva 3. nro 1), sekundääriseen (Kuva 3 nro 2), tertiääriseen (Kuva 3. nro 4) ja lietteen käsittelyyn.



Kuva 3. Yleinen jätevedenpuhdistamoiden asettelu. 1. Esikäsittely 2. Primäärinen käsittely 3. Sekundaarinen käsittely 4. Tertiäärinen käsittely. Muokattu lähteestä (Gray 2004 s. 138).

Esikäsittely koostuu prosesseista, joiden tarkoitus on puhdistaa ja hajottaa kiinteä aines ja hiekka sekä erottaa hulevesi. Mikäli öljyä ja rasvaa on suurissa määrin, myös ne pyritään poistamaan esikäsittelyn aikana. Primäärisen käsittelyn, yleensä sedimentaation, tarkoitus on poistaa laskeutuvat kiintoaineet, jotka erottuvat pohjalle lietteeksi. Sekundäärikäsittelyssä, joka on yleisesti biologista käsittelyä, hapetetaan liuenneet ja kolloidiset aineet mikro-organismien läsnä ollessa. Tertiäärinen käsittely on biologisesti käsitellyn jäteveden jatkokäsittelyä, jotta vähennetään biologista hapenkulutusta (engl. biological oxygen demand, BOD) ja poistetaan spesifiset myrkylliset aineet tai ravinteet, bakteerit sekä suspendoitunut kiintoaines. Lietteestä poistetaan vesi ja se loppusijoitetaan stabiloinnin jälkeen. Yleensä näistä prosesseista on koottu puhdistamolle tulevan veden puhdistustarpeiden mukainen puhdistusprosessi. Vedenpuhdistusprosessiin sisältyy yleensä siis mekaanista, biologista ja kemiallista käsittelyä. (Gray 2004 ss. 133–136.)

Jätevesien biologisessa käsittelyssä käytetään mikro-organismien, pääasiassa bakteerien ja alkueläinten, muodostamaa yhteisöä, eli niin sanottua aktiivilietettä, joka hajottaa ja kuluttaa jäteveden orgaanisia ja epäorgaanisia ravinteita (Galinha ja muut 2018). Tätä perinteistä jätevedenpuhdistuksen biologista käsittelyä kutsutaan

aktiivilietieteknologiaksi (engl. Conventional Activated Sludge, CAS), missä mikro-organismit ovat vapaana sekoittuneena jäteveteen. Sekundäärilaskeuttamisella jätevedestä erotetaan solut, minkä jälkeen kuitenkin solut palautetaan reaktoriin, jotta pidetään yllä korkeaa solutiheyttä ja jäteveden komponenttien hyödyntämistä ja veden puhdistusta (Kuva 3 nro 3). (Gray 2004 s. 147.)

Jätevedenpuhdistamot toimivat yhtenä reittinä, jota kautta mikromuovit voivat joutua mereen (Talvitie ja muut 2015). Jätevedenpuhdistamot voivat olla tehokas tapa hallita mikromuovien pääsyä ympäristöön. Jätevedenpuhdistamoiden esikäsittelyvaihe ja primäärinen vaihe voivat olla oleellisia prosesseja mikromuovien poistamisessa. On huomattu, että puhdistamot, joissa nämä vaiheet ovat tehottomampia saattavat vapauttaa enemmän mikromuoveja ympäristöön. (Murphy ja muut 2016.) Jätevedenpuhdistamoissa kehittyneillä loppuvaiheen jätevedenkäsittelytekniikoilla voidaan vaikuttaa mikromuovien määrään vedessä. Tertiäriveraiheen puhdistustekniikoilla, kuten liunneen ilman kierrätysprosessilla (dissolved air flotation, DAF), voidaan vähentää vesistöihin pääsevää mikromuovien määrää ja poistaa prosessin aikana DAF:in avulla jopa 95 % mikromuoveista. Kuitenkin vielä suurempaan poistoprosenttiin voidaan päästä kalvobioreaktoreilla (engl. Membrane bioreactor, MBR), jotka poistavat jopa 99,9 % mikromuoveista. MBR:tä käsittelevät primäärisesti puhdistettu jätevedettä, kun tertiäritekniikat puolestaan jo primääri- ja sekundaaripuhdistettua jätevedettä. MBR:llä voidaan korvata CAS-teknologia tai sen osa. Esimerkiksi Suomessa tehdyssä tutkimuksessa MBR korvasi CAS-systeemin jälkiselkeytyksen, joka normaalisti perustuu jäteveden hygienisointiin peretikkahappoliuoksella, jotta mikrobit saadaan poistettua. (Talvitie ja muut 2017.)

Jätevedenpuhdistamot poistavat jo esikäsittelyssä tehokkaasti suuremman kokoluokan mikromuoveja (>300 µm, 100–300 µm) mutta pienempi kokoisten (<100 µm) mikromuovien poistotehokkuutta pitäisi parantaa. (Talvitie, Mikola, Setälä, ja muut 2017). Koska vesiympäristöön päästetään jatkuvasti valtavia määriä vettä jätevedenpuhdistamoista, vapautuvien mikromuovien määrä tulisi huomioida. Erityisesti pienemmän kokoluokan mikromuovit (20–100 µm tai <20 µm) ja muovipohjaiset tekstiilikuidut pääsevät jätevedenpuhdistusprosessista läpi vesistöihin (Talvitie, Mikola,

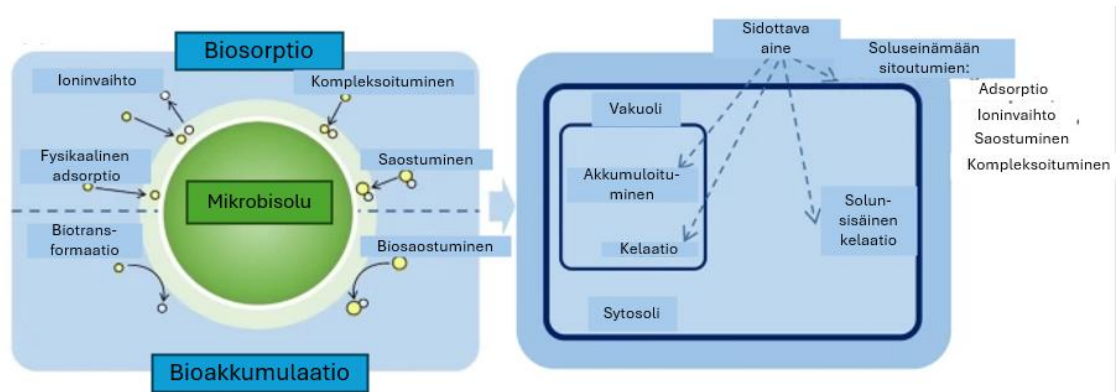
Setälä, ja muut 2017). Mikromuovit, jotka ovat alle 20 µm saattavat päästä elimiin, ja puolestaan noin 10 µm kokoiset mikromuovit saattavat pystyä läpäisemään solukalvoja ja pääsemään kaikkiin elimiin sekä mm. läpäisemään veri-aivoesteen (Campanale ja muut 2020). Mahdollisesti haitallisimmat mikromuovit ovat siis juuri sen kokoluokan muoveja, jotka pääsevät vedenpuhdistussysteemin läpi. Suurin osa jätevedestä poistetuista mikromuoveista päättyy nykyisten puhdistusprosessien aikana myös lietteeseen, minkä takia vielä enemmän mikromuoveja saattaa vapautua ympäristöön lietteen levittämisen kautta (Sun ja muut 2019).

3 Fotosynteettisten mikrolevien mekanismit mikromuovien poistamiseksi

3.1 Biosorptio ja bioakkumulaatio

Biosorptio (engl. biosorption) on passiivinen prosessi, jossa sorbenttina (engl. Sorbent) toimii biologinen materiaali, joka sitoo ja konsentroi epäpuhtauksia vedestä. Materiaali siirtyy nestefaasista kiinteäfaasiin sitoutumalla kiinteän aineen eli biologisen materiaalin pintaan. Biologisen materiaalina voi toimia elävät tai kuolleet mikro-organismit tai niiden komponentit. Biosorptiota ajaa sorbentin affiniteetti kohdemateriaaliin, ja biosorptioprosessi jatkuu kunnes saavutetaan tasapaino sorbenttiin adsorboituneen aineen ja nestefaasiin jäävän pitoisuuden välillä. Mikrolevillä soluseinä ja sen kemiallinen koostumus vaikuttavat biosorptioon ja mekanismiin, jolla biosorptio tapahtuu. Soluseinän erilaiset kemialliset ryhmät, kuten karboksyyli- ja hydroksyyli-ryhmät, toimivat sitoutumiskohteina. (Abdelfattah ja muut 2023.) Biosorbenttina käytettävä biomassa voidaan immobilisoida tai liittää osaksi kalvoa, jotta mikromuovien sitoutumista voidaan tehostaa. Kalvolla voidaan parantaa biosorbenttiä ja sorbaatin (engl. sorbate) eli sidottavan epäpuhtauden välistä kontaktia, mikä parantaa sorptiokinetiikkaa. Kun biosorbentti on kiinni kalvossa, voidaan välttää sen sekoittuminen jätevetteen sekä mahdollistaa ensisijaisen epäpuhtauden selektiivisen uuton. (Wenten ja muut 2020.)

Bioakkumulaatio (engl. bioaccumulation) on puolestaan aktiivinen aineenvaihduntaprosessi, jossa materiaalia otetaan solun sisälle. Bioakkumulaatiolla voidaan detoksifioida jätteitä ja poistaa epäorgaanisia ja orgaanisia epäpuhtauksia. Elävät solut ottavat epäpuhtaudet soluun sisään, minne ne kertyvät tai missä niitä metabolisoidaan harmittomiksi tai harmittomammiksi tuotteiksi. Bioakkumulaatio vaatii energiaa ja on hitaampaa kuin biosorptio. Bioakkumulaatio ja biosorptio ovat eri prosesseja mutta mekanismit vaihtelevat dynaamisesti, jolloin on vaikea määrittää soluun biosorptioiden ja bioakkumuloituvien epäpuhtauksien määrää. (Abdelfattah ja muut 2023.) Kuvassa 4 on havainnollistettu mekanismeja, jotka tapahtuvat biosorption ja bioakkumulaation yhteydessä.



Kuva 4. Biosorptioon liittyviä solunulkoisia mekanismeja ja bioakkumulaatioon liittyviä solunsisäisiä mekanismeja. Muokattu lähteestä (Wenten ja muut 2020).

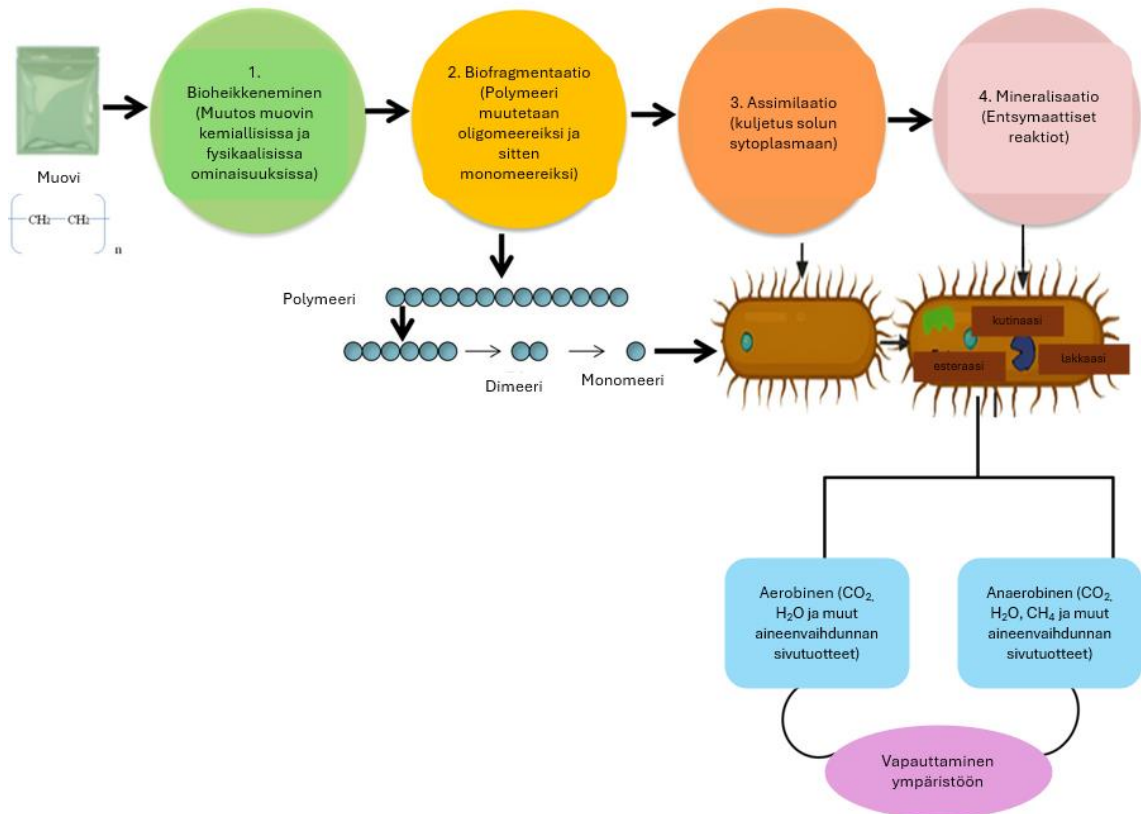
Biosorptio on siis bioakkumulaatiota edeltävä vaihe. Kaikki adsorboituneet molekyylit eivät kuitenkaan voi bioakkumuloitua. Epäpuhtaudet pääsevät soluun esimerkiksi passiivisella kulkeutumisella, avustetulla diffuusiolla tai aktiivisella kuljetuksella. Passiivinen kulkeutuminen soluun tapahtuu pitoisuusgradienttia pitkin korkeasta pitoisuudesta matalaan pitoisuuteen ilman energiaa. Avustetussa diffuusiolla epäpuhtaudet kulkeutuvat solukalvon läpi siirtäjäproteiinin avulla. Aktiivinen kuljetus kalvon läpi vaatii energiaa sillä molekyylit siirretään pitoisuusgradienttia vastaan. Fysikaalis-kemiallinen ympäristö on optimoitava mikrolevien bioakkumulaation parantamiseksi. Bioakkumulaatioon vaikuttaa solun ulkoiset ja sisäiset fysikaalis-kemialliset parametrit, kuten pH, lämpötila ja epäpuhtauksien pitoisuus. Bioakkumulaation parantamiseksi voidaan myös pyrkiä valitsemaan ja seulomaan

sellaiset mikrolevälajit, jotka kestävät korkeita pitoisuuksia epäpuhtauksia. (Abdelfattah ja muut 2023.)

Mikromuovien tarttumista mikroleviin on tutkittu (Nolte ja muut 2017; Sundbæk ja muut 2018). Mikroleväsolut, joiden pinnalla on runsaasti karboksyylihapporyhmiä, adsorptioivat mikromuoveja enemmän. Positiivisesti varautuneet polystyreenimikromuovit adsorboituvat mikrolevän pintaan tehokkaammin kuin negatiivisesti varautuneet. (Nolte ja muut 2017.) Yleisesti mikromuovien pinnan varaus vaikuttaa sitoutumiseen. Mikrolevien rakenteessa esiintyy anionisia polysakkarideja, mikä selittää positiivisesti varautuvien hiukkasten tehokkaamman sitoutumisen. (Padervand ja muut 2020.)

3.2 Biohajottaminen

Biohajottaminen (engl. biodegradation) on prosessi, jossa mikro-organismit hajottavat yhdisteet yksinkertaisimmiksi rakenneosiksi. Biohajottaminen tapahtuu useammassa vaiheessa (Kuva 5). Mikrolevien biohajottamisprosessi voi tapahtua joko solunulkoisesti tai sisäisesti. Hajottaminen voi tapahtua myös näiden yhdistelmänä, jolloin alkuperäinen hajottaminen tapahtuu solunulkoisesti mutta hajoamistuotteet jatkavat hajoamista edelleen solunsisällä. Solunulkoinen hajottaminen perustuu entsyymien ja solunulkoisten polymeeristen aineiden (engl. Extracellular polymeric substances, EPS) erittämiseen. (Sutherland ja Ralph 2019.) Biohajottaminen voi tapahtua aerobisesti tai anaerobisesti. Aerobisen hajoamisen seurauksena syntyy hiilidioksidia ja vettä, kun taas anaerobisessa hajotuksessa näiden lisäksi metaania (S. Sharma ja muut 2021).



Kuva 5. Biohajottamisprosessin eri vaiheet kuvattuna. Kuva on muokattu lähteestä (H. Sharma ja Neelam 2023).

Yleisesti biohajoaminen alkaa bioheikkenemisellä (engl. bio-deterioration). Abioottisten parametrien, kuten valon tai lämpötilan, seurauksena muovin makromolekyyli-rakenteen mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet heikentyvät. Vesiympäristöön päätyessään mikromuovin päälle voi kasvaa biofilmi. Kun biofilmi kasvaa muovin päälle, mikrobiyhteisö alkaa tuottaa solunulkoisia polymeerisiä aineita (engl. extracellular polymeric substances, EPS), jotka pääsevät muovin huokosiin ja aiheuttavat halkeamia. (Mishra ja muut 2023.) Mikrolevien on havaittu esimerkiksi kolonisoivan polyetyleenimuovipusseja (Chia ja muut 2020). Tämän jälkeen tapahtuu biofragmentoituminen (engl. biofragmentation) eli pitkien hiiliketjujen hajotus entsymaattisesti. Hapellisissa oloissa esimerkiksi oksygenaasi-entsyymeillä alkoholin muodostamiseksi lisätään hiiliketjuun happi. (Barone ja muut 2020.) Jotkin mikroorganismit, kuten PETAasia tuottava *Ideonella sakaiensis*, tuottavat solunulkoisia entsyymejä, jotka hajottavat muovipolymeerin oligo- tai monomeereikseen hyödyntääkseen mikromuovia hiilenlähteenään biomassan kasvattamiseen (Yoshida ja

muut 2016). Tätä seuraa solunsisäinen vaihe, nimeltä assimilatio, jossa solun ulkona hajotetut aineet käytetään esimerkiksi hapettamalla energian tuottoon ja biomassan kasvattamiseen. Mineralisaatiolla tarkoitetaan muovin täydellistä hajottamista, jossa lopputuotteena syntyy hapettuneita aineenvaihduntatuotteita, kuten hiilidioksidia ja vettä, joita aerobisesti biohajottavat mikro-organismit lopulta tuottavat. (Arpia ja muut 2021; Barone ja muut 2020.)

Mikrolevien mikromuovin hajottamistehokkuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi transformoimalla ne muovia hajottavia entsyymeitä koodaavilla geeneillä. Esimerkiksi *Chlamydomonas reinhardtii* (*C. reinhardtii* CC-124, lab strain) levässä on saatu onnistuneesti ilmennettyä PET:tiä hydrolysoivaa entsyymiä, PETAasia, ja sen katalyyttinen aktiivisuus todennettua (Kim ja muut 2020). *C. reinhardtii* transformointiin käytettiin vuonna 2016 löydetyn *Ideonella sakaiensis* 201-F6 PETAasi-geeniä. Seulomalla PET-ympäristössä kasvatettuja luonnollisia mikrobiyhteisöjä löydettiin *I. sakaiensis* -bakteeri, jonka huomattiin käyttävän PET:tä pääasiallisena energia- ja hiililähteenään. Kanta tuottaa kahta entsyymiä, jotka hydrolysoivat PET:tä ja reaktion välituotetta mono(2-hydroksietyyli)tereftaalihappoa. Jotta PET voidaan muuntaa kahdeksi suotuisammaksi monomeeriksi, teraftaalihapoksi ja etyleeniglykoliksi, tarvitaan molempia entsyymejä. (Yoshida ja muut 2016.)

3.3 Biofilmin muodostaminen ja EPS:ät

EPS:ät ovat polymeerejä, joita useat mikro-organismikannat syntetisoivat ympäristösignaalien vaikutuksesta (Costa ja muut 2018). EPS:ät koostuvat pääasiassa vedestä, polysakkarideista, proteiineista, lipideistä ja DNA:sta sekä lyysi- ja hydrolyysituotteista (Strieth ja muut 2021). EPS:sien polysakkaridit vaihtelevat rakenteelta ja koostumukselta. Ne voivat koostua yhdestä tai useammasta rakenteellisesta yksiköstä, ja näiden yksiköiden järjestys on uniikki jokaiselle erilaiselle EPS:lle. (Costa ja muut 2018). Proteiinit toimivat EPS-matriiseissa rakenteellisina komponentteina sekä solunulkoisina entsyymeinä (Decho 2011 ss. 359–362). EPS:ssä esiintyy geelimäisiä rakenteita, joissa polymeerimolekyylit ovat kasautuneet niin, että ne muodostavat verkostoja tai ne ovat kovalenttisesti ristisillottuneita (engl. crosslinked) verkostoja.

EPS:llä on erinomainen geelivyvyys, jota voidaan hyödyntää nano- ja mikromuovien poistamisessa. (Cunha ja muut 2020)

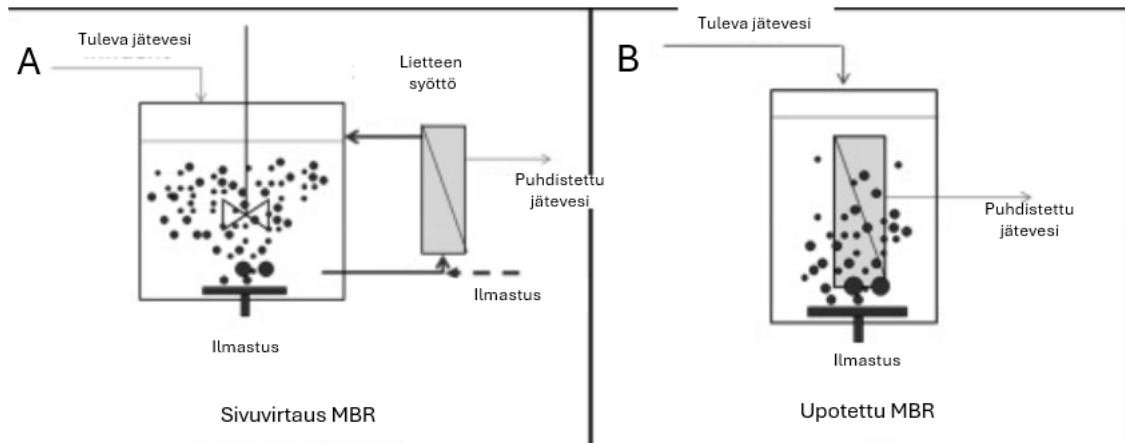
EPS:ien rakenteeseen kuuluu runsaasti negatiivisesti varautuneita aminohappoja, kuten asparagiini- ja glutamiinihappoja, jotka voivat luoda London voimia, sähköstaattisia vuorovaikutuksia ja vetysidoksia suspendoituneiden kiintoaineiden tarttumissa ja koheesiossa. Nämä ominaisuudet tekevät niistä myös potentiaalisia ehdokkaita biopohjaiseksi vaihtoehdoksi jäteveden käsittelyssä käytettäville vaarallisille hiutaloittamissuoloille ja synteettisille polymeereille. (Cunha ja muut 2020.) Suspendoitunut kiintoaine poistetaan yleensä hiutaloittamisaineilla, kuten alumiinisulfaattilla. Metallisuolojen on havaittu esimerkiksi jäävän mikroleväbiomassaan ja jämät voivat olla myrkyllisiä, jolloin hiutaloittamisaine tulee yleensä vielä poistaa prosessin lopussa ja se aiheuttaa lisäkustannuksia (Butler ja muut 2021). Synteettisten polymeeristen hiutaloittamisaineiden suurin ongelma on puolestaan niiden biologinen hajoamattomuus (C. S. Lee ja muut 2014). Nämä kemikaalit ja polymeerit voitaisiin korvata biopohjaisilla hiutaloittamisaineilla. Biohiutaloittamisaineita pidetään turvallisina ja biohajoavina, jolloin lietteen muodostuminen on vähäisempää eikä sekundäärisiä toksineja synny (Cunha ja muut 2020).

EPS:ät voivat olla rakenteeltaan erilaisia ja niiden tehtävät voivat vaihdella. Suurin osa EPS:ien toiminnoista liittyy kuitenkin solun suojaamiseen. EPS muodostaa matriisin solujen ympärille, ja on tärkeässä osassa biofilmien rakenteellisyydessä ja toiminallisuudessa. (Costa ja muut 2018.) Biofilmi on mikrobiyhteisö, joka elää pintaan kiinnittyneenä. Solut elävät niiden tuottamassa limamaisessa matriisissa, joka koostuu EPS:stä. (Strieth ja muut 2021.) EPS pitää solut yhdessä ja saa biofilmin tarttumaan pintaan. EPS-tuotannon voi käynnistää muutokset abioottisissa olosuhteissa, kuten lämpötilassa, pH:ssa ja suolapitoisuudessa. EPS voi kerätä muita ravinteita ja molekyylejä. Solunulkoisesti tuottuvat entsyymit jäävät EPS-matriisiin, jolloin ne voivat sitoa yhdisteitä vesifaasista ja mahdollistaa niiden käytön ravinne- ja energialähteinä metabolisoimalla yhdisteitä. (Costa ja muut 2018.)

EPS:iä on tutkittu metalli-ionien adsorptiossa, jotta EPS:ien avulla voitaisiin sitoa raskasmetalleja saastuneista ympäristöistä. Sitoutumiskohdat ja niiden kemiallinen rakenne, kuten metallipitoisuus, ionivahvuus ja pintaominaisuudet sekä EPS:ien haarauneisuus ja molekyylipaino vaikuttavat kykyyn sitoa raskasmetalleja. (Costa ja muut 2018.) Jotkin mikrolevät, kuten suolaisen veden *Gloeocapsa* sp. ja makean veden *Microcystis panniformis*, tuottavat EPS:iä. EPS:iä tuottavat mikrolevät voisivat toimia mikromuovien saastuttamien vesien bioremediaatiossa muodostamalla heteroagregaatteja mikromuovien kanssa. Heteroagregaatit sisältävät pääosin siis mikrolevää, mikromuoveja ja mikrolevien erittämää EPS:ää. Sekä makean että suolaisen veden mikroleville on potentiaalia kolonisoida mikromuovia ja tuottaa EPS:ää, jonka avulla ne muodostavat heteroagregaatteja. (Cunha ja muut 2019.)

4 Fotosynteettiset mikrolevät mikromuovien poistossa jätevedenpuhdistamoilla

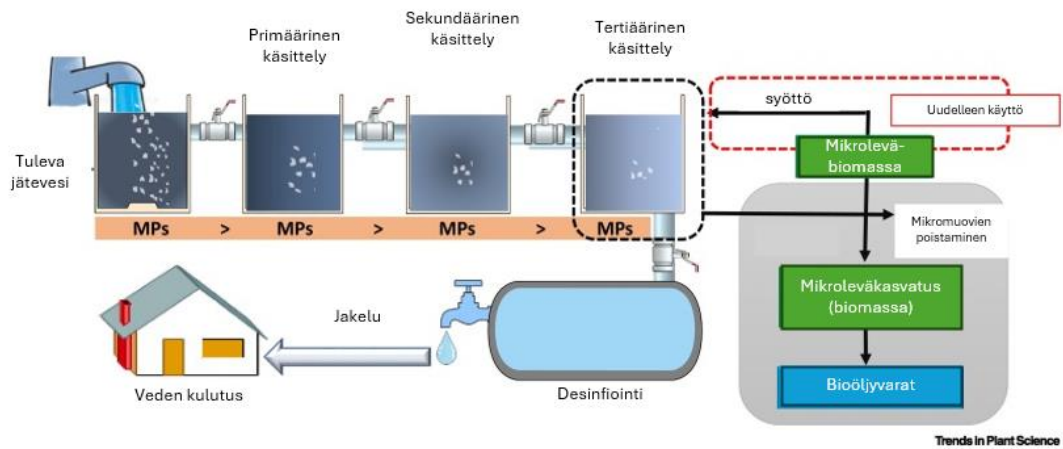
Kalvobioreaktorit (engl. membrane bioreactor, MBR) yhdistävät kalvoteknologiat biologiseen käsittelyyn. Perinteinen jätevedenpuhdistus prosessi käsittelee ensin kiintoaineen laskeuttamalla sen, ja sitten biologisesti hajotetaan orgaaninen aines aerobisissa oloissa ja lopulta laskeutetaan biomassa pois. MBR-järjestelmissä sen sijaan biomassa suodatetaan kalvon läpi. MBR:llä suodatetun veden laatu on parempi, jolloin tarve tertiäärisille käsittelylle saattaa laskea. MBR:istä on useita eri prosessikonfiguraatioita (Kuva 6), ja ne voivat korvata primäärilaskeutuksesta sekundaarikäsittelyyn asti perinteiset menetelmät (Judd 2008).



Kuva 6. Esimerkki kokoonpanot MBR:stä. Kokoonpano vaihtelee kalvojen sijoittelun ja niiden halutun toiminnan mukaan. A: Sivuvirtaus MBR-järjestelmissä kalvot on sijoitettu bioreaktorin ulkopuolella ja sekoitettu liuos pumpataan kalvomoduliin, josta puhdistettu jätevesi virtaa ulos. Liete kierrätetään bioreaktoriin. B: Upotetussa MBR:ssä kalvomoduli on suoraan sekoitusliuoksessa. Upotettu MBR vähentää energiankulutusta, joka liittyy sivuvirtauskokoonpanon kiertovesipumppuun, kun sitä ei tarvita upotetussa versiossa. Muokattu lähteestä (Judd 2008).

MBR:iä voidaan toisaalta käyttää myös tertiäärinä puhdistusmetodeina sen sijaan, että niillä korvataan koko perinteinen prosessi. Mikrolevien käyttäminen tertiäärikäsittelytekniikkana saattaa olla kannattavampaa myös siksi, että jätevesi sisältää tertiäärivaiheessa vähemmän myrkyllisiä kemikaaleja, jotka voivat häiritä mikroleväkasvatuksia (Kuva 7) (Manzi ja muut 2022). Mikromuovit vaikuttavat mikrolevien kasvuun heikentävästi. Vaikutus kasvuun riippuu mikromuovin koosta ja mikrolevälajin ominaisuuksista, kuten liikkuvuudesta ja soluseinän rakenteesta. Mikromuovit estävät valon pääsyä biofilmeihin ja vaikuttavat mikrolevien valonsaataavuuteen, mikä vaikuttaa puolestaan fotosynteesin tehokkuuteen. Mikromuovien aggregoitumista biofilmeihin voi vähentää myös mikromuovien aggregoituminen keskenään isommiksi mikromuovirykelmiksi. Suuremmat mikromuovit eivät yhtä todennäköisesti sitoudu pienempiin mikroleväsoluihin. Kuitenkin matalammissa pitoisuuksissa mikromuovit aggregoituvat keskenään vähemmän eivätkä siten muodosta isompia mikromuovikappaleita, jolloin niiden sitoutuminen mikroleväsoluihin on suurempi. (Cunha ja muut 2019.) Tällöin suurien mikromuovipitoisuuksien poistaminen aikaisemmissa jätevedenkäsittelyvaiheissa on kannattavaa, ja mikroleviä voisi hyödyntää tertiäärivaiheessa.

Mikromuovien poistaminen mikrolevillä jätevedenpuhdistamoissa



Kuva 7. Esimerkki mikrolevien integroimisesta jätevedenpuhdistukseen mikromuovien poistamiseksi. Kuvassa MP tarkoittaa mikromuovia (engl. microplastic). Muokattu lähteestä (Manzi ja muut 2022).

MBR:ssä voidaan käyttää erilaisia kalvoja, mutta tyypillisimmin jätevesien käsittelyssä käytetään mikro-suodatus- tai ultrasuodatuskalvoja. MBR-järjestelmästä tulevan jäteveden laatu riippuu käytetystä kalvosta, sillä kalvo määrittää mitkä komponentit jätevedestä pääsevät läpi. Esimerkiksi bakteerit voivat joko läpäistä tai pidättäytyä kokonsa ja kalvon koon mukaan. MBR:ssä biologinen väliaine koostuu useista erilaisista orgaanisista yhdisteistä, jotka ovat joko peräisin jätevedestä tai mikrobitoiminnasta. Solunulkoiset yhdisteet voivat olla joko kolloidisia tai liukoisia, ja niiden oletetaan olevan syy MBR-järjestelmien likaantumiseen. MBR:n suorituskykyä tulee seurata ja kehittää, jotta voidaan minimoida likaantumiset ja vähentää puhdistusvaatimuksia, mikä pidentäisi kalvojen käyttöikää. (Galinha ja muut 2018).

Yleensä suositaan elottoman biomassan käyttämistä biosorptioon sen sijaan että käytettäisiin bioakkumulaatioon elävää biomassaa. Eloton biomassaa ei vaadi jatkuvaa ravinteiden syöttöä ja biosorbenttia voidaan regeneroida ja käyttää uudelleen. Sorptioprosessi voidaan suorittaa joko panos- tai jatkuvatoimisena prosessina. Jätevedenpuhdistusprosessi on jatkuvatoimista. Biomassa on reaktorissa kosketuksissa puhdistettavan veden kanssa. Jotta biomassan sitomiskykyä voidaan parantaa, se

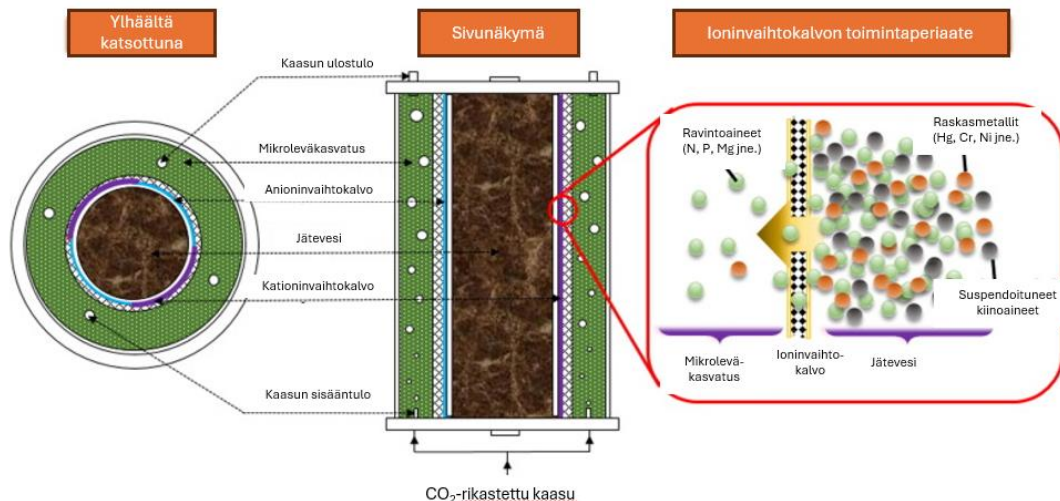
saatetaan käsitellä kemiallisesti, esimerkiksi ristosilloittamalla, tai immobilisoida käyttämällä esimerkiksi kapselointia eli upottamalla sorbentti läpäisevään geeliin. Kun biomassa on kyllästynyt sidottavalla epäpuhtaudella, se voidaan erottaa nesteestä sentrifugoimalla tai suodattamalla se ennen regenerointia. Immobilisoinnista aiheutuu kuitenkin lisäkustannuksia ja se vähentää funktionaalisten paikkojen määrää biomassan pinnalla sekä heikentää siten aineensiirtokinetiikkaa. Jotta nämä ongelmat voidaan välttää, yleensä biosorptiota sovelletaan kalvotekniikoiden kanssa integroituna systeeminä, eikä biomassaa siis immobilisoida. (Wenten ja muut 2020.)

MBR:n ja biosorptiobioreaktorin yhdistelmä voi olla toimiva epäpuhtauksien poistossa. Biomassa voidaan erottaa jätevedestä sitomalla biomassa kalvon pinnalle, mikä lisää biosorbentin ja adsorptiivan epäpuhtauden välistä kontaktipinta-alaa. Kalvon ja biosorption integroiminen voidaan toteuttaa erilaisilla kokoonpanoilla, kuten ei-diffuusiivisella tai läpäisevällä mallilla. Ei-diffuusiivisessa kokoonpanossa syöttöpuolen kalvon pinnalla kasvatetaan biofilmiä. Biosorptio ja suodattaminen tapahtuvat kalvon pinnalla samanaikaisesti päästäten puhdistetun veden kalvon läpi. Epäpuhtaus adsorboituu kalvon pinnalla olevaan biomassaan. Läpäisevässä kokoonpanossa on puolestaan käytössä valikoiva kalvo, joka poistaa vain tietyt epäpuhtaudet. Epäpuhtaudet diffundoituvat ensin selektiivisen kalvon läpi ja sitten adsorboituvat kalvon pinnan toisella puolella olevaan biosorbenttiin. Kalvo estää jätevettä olemasta suorassa kosketuksessa biomassan kanssa. Jäteveden olosuhteet ovat yleensä haastavat esimerkiksi korkean suolapitoisuuden takia. Tämä voi johtaa biosorbentin hajoamiseen tai suorituskyvyn hiekkemiseen, jolloin voi olla edullista eristää jätevesi kasvatuksesta.

Fotobioreaktorin ja MBR:n yhdistelmät voidaan luokitella kalvofotobioreaktoreiksi (engl. Membrane photobioreactor, MPBR). MPBR on siis järjestelmä, jossa perinteinen fotobioreaktori yhdistetään kalvoprosessiin fotosyntettisten mikrobien kasvattamiseksi. Verrattuna perinteiseen fotobioreaktoriin MPBR:ssä valon pääsy kasvatukseen on tehokkaampaa mikä mahdollistaa suuremman biomassan tuotantonopeuden, mikä puolestaan parantaa poistotehokkuutta ja hiilidioksidin sitomista. Yhdistämällä MBR-tekniologia fotobioreaktoriin voidaan pidättää mikroleväsolut kalvossa, jolloin estetään biomassan huuhtoutuminen ja siitä aiheutuvat keräämistarpeet ja niihin liittyvät

kustannukset. Lisäksi voidaan hallinnoida kiintoaineen pidättäytymisaikaa ja hydraulista pidättäytymisaikaa erikseen. (Honda et al., 2012; Marbelia et al., 2014.) Fotobioreaktorin ja MBR:n yhdistelmää on kokeiltu mikrolevien kasvattamiseen jätevedessä (Chang ja muut 2016).

Rengasmaisen ioninvaihtokalvo-fotobioreaktori (engl. ion exchange membrane photobioreactor, IEM-PBR) suunniteltiin käsittelemättömän jäteveden ravinteiden hyödyntämiseksi mikroleväkannan avulla ilman että kantaa esisopeutettiin olosuhteisiin (Kuva 8). Ioninvaihtokalvojen, anionin- ja kationinvaihtokalvojen, avulla voitiin erottaa mikrolevät jätevedestä, jolloin onnistuttiin poistamaan jäteveden negatiiviset vaikutukset, kuten ylimääräiset ravinteet ja kilpailijat, jotka vaikuttavat mikrolevien kasvuun heikentävästi. Yhdyskuntajätevedet ovat yleensä myös todella sameita, mikä voi heikentää valon pääsyä kasvustoon. Kuitenkin typpi ja fosfori pääsivät kasvatukseen ioninvaihtokalvoja pitkin. Havaittiin, että biomassantuotanto ja jäteveden ravinteiden poistotehokkuus olivat käytetyssä IEM-PBR:ssä korkeammat kuin perinteisessä PBR:ssä. Tutkittiin jätevesiä, jotka sisälsivät erilaisia epäpuhtauksia, kuten ylimääräisiä ravinteita, sameutta ja raskasmetalleja. (Chang ja muut 2016.) IEM-PBR voi siis toimia tehokkaana keinona viljellä mikroleviä epäpuhtauksia sisältävässä jätevedessä. Mikromuovien poistamiseen IEM-PBR:n tyylisiä MPBR-systeemejä ei olla kokeiltu. Mikrolevien on havaittu sitovan mikromuoveja vesistä, jolloin tämän tyylinen biosorptiomekanismia tukeva kasvatusjärjestelmä voisi kuitenkin toimia tapana liittää mikrolevät osaksi jätevedenpuhdistusprosessia. Mikrolevät voisivat hyödyntää jätevettä kasvualustana ja integroimalla sopivat kalvot pystyttäisiin keräämään mikroleviin biosorptiolla mikromuoveja. Mikrolevät voisivat mahdollisesti myös biohajottaa osan muoveista.



Kuva 8. Kuvassa mikrolevien jätevedessä viljelyyn kokeiltu rengasmaisen IEM-PBR. Muokattu lähteestä (Chang ja muut 2016).

Fotoautotrofisia mikroleviä on tutkitaan kestävämpänä ja vihreämpänä vaihtoehtona perinteisille bakteeripohjaisille jätevedenpuhdistusratkaisuille (Nirmalakhandan ja muut 2019). Fotosynteettisten levien käyttö jätevesien puhdistamisessa perustuu muun muassa niiden kykyyn käyttää energianaan niin orgaanista kuin epäorgaanista hiiltä sekä epäorgaanista typpeä ja fosforia kasvuunsa, minkä seurauksena kyseisten aineiden konsentraatiot vedessä vähenee. Yksi tärkeä hyöty fotosynteettisten mikrobien käyttämisessä on se, että ne tuottavat fotosynteesin avulla happea, jota puolestaan heterotrofiset organismit tarvitsevat hiilipitoisten materiaalien biologiseen hajottamiseen. (Mohsenpour ja muut 2021.) Mikäli mikrolevät esimerkiksi integroidaan tertiäärivaiheisenä puhdistuksena, voidaan miettiä olisiko mahdollista hyödyntää esimerkiksi fotoautotrofisten mikrolevien tuottamaa happea sekundäärikäsittelyssä, missä käytetään myös heterotrofisia bakteereja tai muuten käyttää sekaviljelmää tai fotomiksotrofiaan kykeneviä fotoautotrofisia organismeja.

MBR:ien kaltaiset kalvoteknologia ovat kuitenkin kalliita ja vaurioituvat helposti, mikä voi johtaa korkeisiin operointikustannuksiin. (Manzi ja muut 2022). Mikrolevien avulla voitaisiin muodostaa mikromuoveista isompia aggregaatteja, jolloin ne voitaisiin laskeuttaa pohjaan ja poistaa. On onnistuneesti suunniteltu *Pseudomonas aeruginosa*-bakteerissa ns. ”nappaa ja vapautaa” -mekanismi, jolla biofilmiä muodostamalla saadaan

aggregoitua mikromuoveja niin että ne uppoavat ja saadaan poistettua bioreaktoreista. Koska biofilmit ovat tarrautuvia, mikromuovien erottaminen niistä on hankalaa. Niinpä käytettiin apuna toista kantaa, joka tuottaa biofilmin hajoamista aktivoivia aineita ja saavat aikaan mikromuovien vapautumisen talteenottoa varten. Ratkaisu ei ole vielä kaupallisesti pätevä mutta kertoo mahdollisuuksista, joilla mikromuoveja voitaisiin kerätä. (Liu ja muut 2021.) Samantyylistä ratkaisua voisi yrittää mikrolevilla mutta se vaatii vielä lisätutkimuksia.

5 Yhteenveto

Jätevedenpuhdistamoiden olemassa olevat tekniikat poistavat suurimman osan mikromuoveista. Siitä huolimatta jätevesien suurien pitoisuuksien takia jäljelle jäävät määrät ovat vaikuttavia. Jätevedenpuhdistamot ovat avainasemassa mikromuovien kontrolloinnissa. Edistyneet käsittelytekniikat, kuten MBR:t, voivat parantaa mikromuovien puhdistusta. Fotosynteettisillä mikrobeilla on paljon edullisia ominaisuuksia, jotka tekevät niistä potentiaalisia mikromuovien poistajia. Biosorptio, bioakkumulaatio, biohajottaminen ja biofilmin muodostaminen EPS:sien avulla ovat mekanismeja, joita voitaisiin hyödyntää mikromuovien poistamiseen.

Fotosynteettiset mikrolevät voitaisiin integroida vedenpuhdistusjärjestelmään osana MBR-teknologiaa. Mikromuoveja saadaan testatuin MBR-teknologioin poistettua yli 99 % mutta pienimmät mikromuovit vaikuttavat pääsevän vielä ympäristöön ja aiheuttavan mahdollisia haittavaikutuksia, kun ne esimerkiksi kertyvät ravintoketjuun. MBR-teknologiat ovat myös kalliita, eivätkä ne laajasta levinneisyydestään huolimatta ole vielä kaikkialla käytössä. Fotosynteettisillä mikrolevilla on biologisia mekanismeja, kuten biosorptio, joilla ne voisivat käsitellä mikromuoveja poistaakseen ne vedestä. Kuitenkin esimerkiksi mikromuovien sitomismekanismeja ja niiden tehokkuutta mikrolevissä tulisi tutkia lisää, jotta löydetään sopiva keino hyödyntää niitä esimerkiksi rengasmaisessa IEM-PBR:ssä tehokkaan poiston aikaansaamiseksi (Kuva 8). Geneettinen muuntelu tehostamaan haluttuja ominaisuuksia ja esimerkiksi korkeita mikromuovipitoisuuksia kestävien lajien seulonta voisivat toimia tehostamisessa apuna. Mikromuovien sitomisen tehostamiseksi myös kalvovalintoja tulisi harkita. Joidenkin positiivisesti varautuneiden

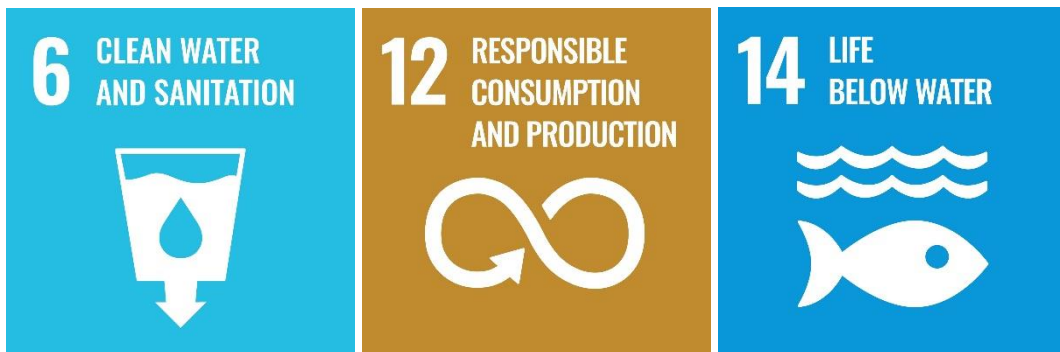
mikromuovihiukkasten, kuten polystyreenimikromuovien, on havaittu adsorboituvan mikrolevien pintaan tehokkaammin kuin negatiivisesti varautuneiden. Voisiko silloin olla mikromuovien poistamisen kannalta parempi käyttää kationinvaihtokalvoja? Toisaalta mikromuoveja on erilaisia, joten voi olla että molempia ioninvaihtokalvoja tarvitaan (Kuva 2 ja 8). MPBR:tä voisivat kuitenkin toimia keinona liittää mikrolevät vedenpuhdistusprosessiin mutta mikromuovien poistotehokkuus biosorptiolla saattaa vielä tarvita tutkimusta, ja mikromuovien biosorptioon perustuvien teknologioiden kehittämistä.

Mikroleviä voisi hyödyntää myös niiden EPS-tuotannon ja biofilmin muodostuksen takia ja kehitellä vastaavanlainen ”nappaa ja vapautaa” -systeemi kuin Liu ja muut (2021) tutkimuksessaan. Toimivia ratkaisuja mikromuovien puhdistamiseen mikrolevien avulla on siis vähän eivätkä ne ole vielä laajalti käytössä. Potentiaalia fotosynteettisillä mikrolevillä kuitenkin on mutta tutkimusta ja ideoiden jatkokehitystä vaaditaan vielä lisää, jotta mikroleviä voidaan saada tehokkaasti ja laajalti hyödynnettyä mikromuovien poistamisessa. Riittääkö jätevesienpuhdistamoiden tehostaminen mikromuovien poistamisessa vai tarvitaanko erilaisia liikkuvia ratkaisuja, jotka voidaan viedä esimerkiksi jokeen poistamaan mikromuoveja? Toimiiko MBR-pohjaiset teknologiat tähän? Entä ratkaisujen hinta; onko mahdollista implementoida ratkaisuja tarpeeksi laajalti ja saadaanko ne skaalattua kaupallisiksi ratkaisuksiksi? Tutkielman aikana mahdolliset heränneet jatkokysymykset liittyvät myös lietteeseen jäävään mikromuoviin ja sen poistamiseen tai poistotarpeeseen.

Ennen kaikkea fotosynteettisten mikrolevien tutkiminen myös mikromuovien poistamisessa houkuttaa niiden muiden hyötyjen takia. Mikrolevät elävät normaalistikin vesiympäristössä, joista mikromuovit jätevedenpuhdistamolla tulisi poistaa. Toki myös lietteen mikromuovien poistamisen tarvetta ja keinoja tulee tutkia, mikäli sovelletaan vedenpuhdistukseen sellaisia keinoja, jotka sitovat suurimmat pitoisuudet mikromuoveja lietteeseen. Näin käy perinteisessä puhdistusprosessissa (Kuva 3.). Fotosynteettiset mikrolevät pystyvät hyödyntämään valoenergiaa ja hiilidioksidia kasvattaakseen biomassaa ja niiden on todettu pystyvän kasvamaan jätevesissä. Mikroleväbiomassa onkin raaka-aine kolmannen sukupolven biopolttoaineissa, sillä sen kasvattaminen ei

vaadi sokereita esimerkiksi maissista vaan hyödynnetään suoraan auringonvaloa ja hiilidioksidia, ja pienellä alueella voidaan kasvattaa kohtuullisen paljon biomassaa (R. A. Lee ja Lavoie 2013). Fotosynteettisten mikrolevien hyödyntäminen voi auttaa saavuttamaan kestävä kehityksen tavoitteita toimimalla mahdollisesti energiatehokkaampina ja vihreämpinä ratkaisuin monenlaisiin ongelmiin, kuten vedenpuhdistukseen.

Yhdistyneet kansakunnat (engl. United Nations, YK) on asettanut kestävä kehityksen tavoitteet (engl. sustainable development goals, SDG), joiden tarkoituksena on toimia kiireellisenä kehotuksena toimia kaikkien maiden kanssa globaalisti yhteistyössä edistää Kestävä kehityksen Agenda 2030 eli kaikkien jäsenvaltioiden hyväksymää yhteistä suunnitelmaa ihmisten ja planeetan rauhalle ja hyvinvoinnille nyt ja tulevaisuudessa ("THE 17 GOALS | Sustainable Development" 2024). Edistämällä tehokkaampaa vedenpuhdistusta fotosynteettisten mikrolevien tutkimuksella pyritään tähtäämään esimerkiksi tavoitteiden 6, 12 ja 14 edistämiseen (Kuva 9).



Kuva 9. Kestävä kehityksen tavoitteiden ikonit. Tavoitteet 14 (engl. Life below water, suom. Vedenalainen elämä), 6 (engl. Clean water and sanitation, suom. Puhdas vesi ja sanitaatio) ja 12 (engl. Responsible consumption and production, suom. Vastuullinen kulutus ja tuotanto) kuvattuna. Tavoitteen 6 tarkoitus on parantaa veden laatua esimerkiksi minimoimalla vaarallisia kemikaali- ja materiaalipäästöjä sekä puolittamalla käsittelemättömän jäteveden osuuden ja lisäämällä huomattavasti kierrätystä ja turvallista veden uudelleenkäyttöä maailmanlaajuisesti. Tavoitteen 12 tarkoituksena on saada aikaan kestäviä kulutustottumuksia ja tuotantoa. Tavoitteeseen sisältyy esimerkiksi vuoteen 2030 mennessä vähentää merkittävästi jätteiden syntymistä ehkäisemällä, vähentämällä, kierrättämällä sekä uudelleenkäyttämällä. Tavoite 14 tähtää valtamerien, merien ja merivarojen säilyttämiseen ja kestävään käyttöön. Yhdeksi hätätapaukseksi tämän tavoitteen kannalta on nimetty muovisaaste, jota vuonna 2021 syntyi 17 miljoonaa tonnia ja on ennustettu kaksin- tai kolminkertaistuvan vuoteen 2040 mennessä.

Tarkoitus on ehkäistä ja vähentää meren pilaantumista esimerkiksi ravinteiden tai meren roskaantumisen seurauksena. Lähde: ("THE 17 GOALS | Sustainable Development" 2024).

Jätevedenkäsittely ja mikromuovien poistaminen ovat tärkeässä asemassa kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi. Mikromuoviongelma on monitahoinen ja ulottuu merien lisäksi myös maalle sillä esimerkiksi lietteen levittämisen kautta mikromuoveja voi joutua maaperään. Fotosynteettisillä mikrobeilla voidaan edistää useampaa tavoitetta. Hyödyntämällä fotosynteettisiä mikrobeja vedenpuhdistuksessa voidaan puhdistaa vettä sekä samalla kasvattaa biomassaa. Biomassaa tai toisaalta fotosynteettisten mikrobien avulla kerättyjä mikromuoveja voidaan hyödyntää esim. bioöljyn tuotannossa. Mikromuovien poistaminen vesistöistä ja muusta ympäristöstä sekä käsittely niin, että voidaan mahdollistaa muovien käyttö raaka-aineena mahdollisissa uusissa tuotteissa, voi edistää kestävän kehityksen tavoitteita ja siten auttaa ihmisten ja planeetan hyvinvointia.

Mikromuoviongelmaa ei ole vielä kuitenkaan ratkaistu, etenkin maailmanluokan mittakaavassa. Vuonna 2019 maailman muovijätteestä vain 9 % kierrätettiin (Ritchie ja muut 2023). Muovit myös aiheuttavat huomattavan osan maailmalaaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä, joita vuonna 2019 aiheutui 3,4 % maailman päästöistä. Suurin osa näistä päästöistä on peräisin niiden tuotannosta ja fossiilisten polttoaineiden muuntamisesta muoviksi. (OECD 2024.) Öljypohjaisista muoveista eroonpääseminen ja vaihto biohajoaviin ja biopohjaisiin muoveihin on myös osana kokonaisvaltaista ratkaisua. Jätevedenpuhdistamot ovat eräässä avainasemassa mikromuovien vapauttamisessa ympäristöön mutta myös muovin tehokkaan kierrättämisen ja jätteen käsittelyn lisääminen sekä kouluttaminen aiheeseen liittyen on tärkeää, jotta mikromuoviongelma voidaan ratkaista. Vielä mikromuoveja ei olla kokonaan onnistuttu poistamaan, ja koko ongelman ratkaisu vaatii monenlaisia tekoja kierrätyksestä tehokkaaseen vedenpuhdistukseen, minkä takia tutkimusta ja investointeja on syytä jatkaa, jotta voidaan tehdä edullisia, kaikille saatavilla olevia, tehokkaita ja kestävien kehityksen tavoitteiden mukaisia ratkaisuja.

Kirjallisuus

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S.-H., ... Sun, J. (2023) Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environ Sci Ecotechnology* **13**:100205.
- Ahmed, R., Hamid, A. K., Krebsbach, S. A., He, J. & Wang, D. (2022) Critical review of microplastics removal from the environment. *Chemosphere* **293**:133557.
- Arpia, A. A., Chen, W.-H., Ubando, A. T., Naqvi, S. R. & Culaba, A. B. (2021) Microplastic degradation as a sustainable concurrent approach for producing biofuel and obliterating hazardous environmental effects: A state-of-the-art review. *J Hazard Mater* **418**:126381.
- Barone, G. D., Ferizović, D., Biundo, A. & Lindblad, P. (2020) Hints at the Applicability of Microalgae and Cyanobacteria for the Biodegradation of Plastics. *Sustainability* **12**:10449.
- Butler, T. O., Acurio, K., Mukherjee, J., Dangasuk, M. M., Corona, O. & Vaidyanathan, S. (2021) The transition away from chemical flocculants: Commercially viable harvesting of *Phaeodactylum tricornutum*. *Sep Purif Technol* **255**:117733.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. (2020) A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *Int J Environ Res Public Health* **17**:1212.
- Chang, H.-X., Fu, Q., Huang, Y., Xia, A., Liao, Q., Zhu, X., ... Sun, C.-H. (2016) An annular photobioreactor with ion-exchange-membrane for non-touch microalgae cultivation with wastewater. *Bioresour Technol* **219**:668–676.
- Chia, W. Y., Ying Tang, D. Y., Khoo, K. S., Kay Lup, A. N. & Chew, K. W. (2020) Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production. *Environ Sci Ecotechnology* **4**:100065.

- Costa, O. Y. A., Raaijmakers, J. M. & Kuramae, E. E. (2018) Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Front Microbiol* **9**.
- Cunha, C., Faria, M., Nogueira, N., Ferreira, A. & Cordeiro, N. (2019) Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution. *Environ Pollut* **249**:372–380.
- Cunha, C., Silva, L., Paulo, J., Faria, M., Nogueira, N. & Cordeiro, N. (2020) Microalgal-based biopolymer for nano- and microplastic removal: A possible biosolution for wastewater treatment. *Environ Pollut* **263**:114385.
- Decho, A. W. (2011) Extracellular Polymeric Substances (EPS). Teoksessa J. Reitner & V. Thiel (Toim.), *Encyclopedia of Geobiology* (ss. 359–362). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Du, S., Zhu, R., Cai, Y., Xu, N., Yap, P.-S., Zhang, Y., ... Zhang, Y. (2021) Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: A review. *RSC Adv* **11**:15762–15784.
- Galinha, C. F., Sanches, S. & Crespo, J. G. (2018) Chapter 6—Membrane bioreactors. Teoksessa P. Luis (Toim.), *Fundamental Modelling of Membrane Systems* (ss. 209–249). Elsevier.
- Gray, N. F. (2004) *Biology Of Wastewater Treatment (2nd Edition)*. World Scientific.
- Jain, R., Gaur, A., Suravajhala, R., Chauhan, U., Pant, M., Tripathi, V. & Pant, G. (2023) Microplastic pollution: Understanding microbial degradation and strategies for pollutant reduction. *Sci Total Environ* **905**:167098.
- Judd, S. (2008) The status of membrane bioreactor technology. *Trends Biotechnol* **26**:109–116.

- Kim, J. W., Park, S.-B., Tran, Q.-G., Cho, D.-H., Choi, D.-Y., Lee, Y. J. & Kim, H.-S. (2020) Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae. *Microb Cell Factories* **19**:97.
- Lee, C. S., Robinson, J. & Chong, M. F. (2014) A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Saf Environ Prot* **92**:489–508.
- Lee, R. A. & Lavoie, J.-M. (2013) From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Anim Front* **3**:6–11.
- Liu, S. Y., Leung, M. M.-L., Fang, J. K.-H. & Chua, S. L. (2021) Engineering a microbial ‘trap and release’ mechanism for microplastics removal. *Chem Eng J* **404**:127079.
- Manzi, H. P., Abou-Shanab, R. A. I., Jeon, B.-H., Wang, J. & Salama, E.-S. (2022) Algae: A frontline photosynthetic organism in the microplastic catastrophe. *Trends Plant Sci* **27**:1159–1172.
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F. & Quinn, B. (2016) Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environ Sci Technol* **50**:5800–5808.
- Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N. & O’Connor, K. E. (2020) Recent Advances in Bioplastics: Application and Biodegradation. *Polymers* **12**:920.
- Nolte, T. M., Hartmann, N. B., Kleijn, J. M., Garnæs, J., van de Meent, D., Jan Hendriks, A. & Baun, A. (2017) The toxicity of plastic nanoparticles to green algae as influenced by surface modification, medium hardness and cellular adsorption. *Aquat Toxicol* **183**:11–20.
- OECD *Global Plastic Outlook*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/environment/plastics/increased-plastic-leakage-and-greenhouse-gas-emissions.htm> (Luettu 27.4.2024)

- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D. & Wang, C. (2020) Removal of microplastics from the environment. A review. *Environ Chem Lett* **18**:807–828.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Andrady, A. L., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. (2021) A One Health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health. *Sci Total Environ* **777**:146094.
- Rafa, N., Ahmed, B., Zohora, F., Bakya, J., Ahmed, S., Ahmed, S. F., ... Almomani, F. (2024) Microplastics as carriers of toxic pollutants: Source, transport, and toxicological effects. *Environ Pollut* **343**:123190.
- Ritchie, H., Samborska, V. & Roser, M. (2023) Plastic Pollution. *Our World Data*.
Noudettu osoitteesta <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Sharma, H. & Neelam, D. K. K. (2023) Understanding challenges associated with plastic and bacterial approach toward plastic degradation. *J BASIC Microbiol* **63**:292–307.
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., Nadagouda, M. N. & Aminabhavi, T. M. (2021) Microplastics in the environment: Occurrence, perils, and eradication. *Chem Eng J* **408**:127317.
- Strieth, D., Schwarz, A., Stiefelmaier, J., Erdmann, N., Muffler, K. & Ulber, R. (2021) New procedure for separation and analysis of the main components of cyanobacterial EPS. *J Biotechnol* **328**:78–86.
- Sundbæk, K. B., Koch, I. D. W., Villaro, C. G., Rasmussen, N. S., Holdt, S. L. & Hartmann, N. B. (2018) Sorption of fluorescent polystyrene microplastic particles to edible seaweed *Fucus vesiculosus*. *J Appl Phycol* **30**:2923–2927.
- Sutherland, D. L. & Ralph, P. J. (2019) Microalgal bioremediation of emerging contaminants—Opportunities and challenges. *Water Res* **164**:114921.

- Talvitie, J., Heinonen, M., Pääkkönen, J.-P., Vahtera, E., Mikola, A., Setälä, O. & Vahala, R. (2015) Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea. *Water Sci Technol* **72**:1495–1504.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. & Setälä, O. (2017) Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res* **123**:401–407.
- Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M. & Koistinen, A. (2017) How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Res* **109**:164–172.
- THE 17 GOALS | Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals> (Luettu 23.4.2024)
- Wenten, I. G., Khoiruddin, K., Harimawan, A., Ting, Y. P. & Boopathy, R. (2020) Membrane Biosorption: Recent Advances and Challenges. *Curr Pollut Rep* **6**:152–172.
- Wollmann, F., Dietze, S., Ackermann, J., Bley, T., Walther, T., Steingroewer, J. & Krujatz, F. (2019) Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches. *Eng Life Sci* **19**:860–871.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., ... Oda, K. (2016) A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* **351**:1196–1199.