

Eliisa Väkevä

# MIKROMUOVIT TEOLLISUUDEN JÄTEVESISSÄ

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Marika Kokko  
Toukokuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Eliisa Väkevä: Mikromuovit teollisuuden jätevesissä  
Microplastics in industrial effluents  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Toukokuu 2025

---

Muovien kehitys otti huiman harppauksen 1900-luvun alkupuolella, kun kemisti Leo Baekeland patentoi kehittämänsä bakeliitiksi nimetyn polymeerin. Siitä lähtien muovi on korvannut luonnonmateriaaleja monissa käyttökohteissa ja nykyisin muovi on erottamaton osa jokapäiväistä elämää. Muovi on tuonut paljon hyötyjä, mutta 2000-luvulla on havahduttu muovijätteen aiheuttamiin ongelmiin. Muoveja päätyy ympäristöön jätteidenkäsittelyn laiminlyöntien seurauksena sekä muovituotteiden kulumisen myötä. Ympäristöstä on havaittu löytyvän hyvin pieniä muovipartikkeleita, mikromuoveja. Mikromuoviksi kutsutaan muovikappaletta, joka on läpimitaltaan enintään 5 mm. Mikromuovit voivat olla primaareja tarkoituksella valmistettuja muovipellettejä tai sekundaareja tahattomasti suurempien muoviesineiden kulumisen seurauksena syntyneitä muovipartikkeleita. Mikromuovien koko, muoto ja polymeerimateriaali vaihtelevat, ja ympäristössä ongelmallisimpia ovat erittäin pienet alle 1 mm:n muovipartikkelit.

Mikromuoveja on löytenyt laajalti vesistöistä ja nykyisin tiedetään, että esimerkiksi synteettisten tekstiilien pesussa irtoaa runsaasti mikromuoveja. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoita on jo pidempään aktiivisesti tutkittu mahdollisina mikromuovien päästölähteinä, mutta teollisuuden jätevesiin on kiinnitetty vähemmän huomiota. Erilaisia muoveja käytetään monilla teollisuudenaloilla raaka-aineina tai osana valmistusprosessia, ja esimerkiksi tekstiiliteollisuudessa huomattava osa kuitumateriaaleista on muoveiksi luokiteltavia keinokuituja.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli koostaa tutkimustietoa mikromuovien esiintymisestä teollisuuden jätevesissä ja selvittää, minkä teollisuudenalojen jätevesissä mikromuoveja esiintyy ja mitä polymeerityyppejä jätevedet yleisimmin sisältävät. Työssä keskitytään tarkastelemaan teollisuuslaitoksilta ja teollisuusalueiden jätevedenpuhdistamoilta lähteviä purkuvesiä. Teollisuuden jätevedet poikkeavat koostumukseltaan yhdyskuntajätevesistä, joten päämääränä oli myös kerätä tietoa siitä, minkälaisia näytteenotto- ja analyysimenetelmiä on sovellettu mikromuovien määrittämiseen teollisuuden jätevesistä.

Tähän tutkielmaan on koostettu tuloksia eri teollisuudenaloilta tehdyistä tutkimuksista. Tutkimuskohteista useimmat edustavat tekstiili- ja kemianteollisuutta, ja muita kohteita ovat esimerkiksi koneenrakennus, terästeollisuus ja telakkatoiminta. Tutkimuksien tuloksista voidaan todeta, että teollisuuden jätevesissä esiintyy merkittäviä määriä mikromuoveja teollisuudenalasta riippumatta, eikä mitään yksittäistä teollisuudenalaa voida nostaa muita merkittävämmäksi päästölähteeksi. Teollisuuden purkuvesistä pääsee huomattavia määriä mikromuoveja vesistöihin, vaikka puhdistusprosessit toimisivat tehokkaasti ja häiriöttömästi. Näytteenottotavat, näytteiden esikäsittelymenetelmät ja mikromuovien karakterisointiin käytetyt analyysimenetelmät vaihtelevat eri tutkimusten välillä, mikä tekee tulosten vertailusta hankalaa. Yleisimmin mikromuovien karakterisoinnissa on käytetty spektroskooppisia menetelmiä, joista suosituimpia ovat Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia ja mikro-Raman-spektroskopia. Spektroskooppisilla menetelmillä määritetyt mikromuovipitoisuudet vaihtelivat välillä 6–1280 kpl/l, ja valtaosa havaituista muovipartikkeleista oli kooltaan pieniä alle 1 mm:n mikromuoveja. Jätevesinäytteissä runsaimmin esiintyneet polymeerityypit olivat polyeteeni ja polystyreeni, jotka ovat maailmanlaajuisesti eniten valmistettuja ja yleisimmin käytettyjä valtamuoveja.

Teollisuuden jätevesistä aiheutuu merkittäviä mikromuovipäästöjä, joiden vähentäminen vaatisi tehokkaampia puhdistusmenetelmiä ja päästöjen systemaattista monitorointia. Lainsäädäntö on puutteellista, eikä mikromuovien säännölliseen seurantaan soveltuvia nopeita ja edullisia analyysimenetelmiä ole tarjolla. Tehokkaampien puhdistus- ja seurantamenetelmien kehittämiseksi tarvitaan lisää tutkimusta sekä toimivaa yhteistyötä tutkijoiden ja teollisuusyritysten välille.

Avainsanat: mikromuovi, mikrokuitu, jätevesi, teollisuuden jätevedet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

Microsoft Copilot GPT-4:

Tekoälyltä on pyydetty vinkkejä luvun 4 alalukujen otsikointiin ja jäsentelyyn.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MUOVIT JA MIKROMUOVIT .....	3
2.1 Muovin rakenne .....	3
2.2 Muovien nimeäminen ja luokittelu .....	4
2.3 Mikromuovin määritelmä ja mikromuovien luokittelu .....	5
3. MIKROMUOVIEN MÄÄRITTÄMINEN .....	7
3.1 Näytteenotto ja näytteiden esikäsittely .....	7
3.2 Spektroskooppiset menetelmät .....	9
3.2.1 Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia .....	9
3.2.2 Raman-spektroskopia .....	10
3.2.3 Laserohjattu infrapunaspektrofotometri .....	10
3.3 Termoanalyttiset menetelmät .....	11
3.3.1 Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria .....	11
3.3.2 Alkuaineanalyysi yhdistettynä ylimäärätyyn yhtälöryhmään .....	11
4. MIKROMUOVIEN ESIINTYMINEN TEOLLISUUDEN JÄTEVESISSÄ .....	13
4.1 Tekstiiliteollisuus .....	13
4.2 Kemianteollisuus .....	14
4.3 Muut teollisuudenalat .....	16
4.4 Kokonaiskuva ja menetelmien vaikutus tuloksiin .....	17
5. TEOLLISUUDEN MIKROMUOVIPÄÄSTÖT: NYKYHETKI JA TULEVAISUUS ...	19
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	21
LÄHTEET .....	22
LIITE A: MUOVIEN LYHENTEET .....	27

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

DSC	Differential Scanning Calorimetry, differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria
EA-OEM	Elemental Analysis combined with Overdetermined Equation Method, alkuaineanalyysi yhdistettynä ylimäärätyyn yhtälöryhmään
FPA-FTIR	Focal Plane Array Fourier Transform Infrared spectroscopy, polttotasorivi-ilmaisimeen perustuva Fourier-muunnosinfrapunaspektroskopia
FTIR	Fourier Transform Infrared spectroscopy, Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia
LDIR	Laser Direct Infrared imaging spectrometer, laserohjattu infrapunaspektrofotometri
PA	polyamidi
PAN	polyakrylinitriili, akryylikuitu
PE	polyeteeni
PET	polyeteenitereftalaatti, polyesterikuitu
PP	polypropeeni
PS	polystyreeni
PVC	polyvinyylikloridi

# 1. JOHDANTO

Muovi on verrattain uusi keksintö ja nykyaikaisen muovin kehityksen katsotaan alkaneen vasta reilut sata vuotta sitten 1900-luvun alkupuolella, jolloin käynnistyi bakeliitiksi kut- sutun muovin kaupallinen tuotanto. Keksijänsä Leo Baekelandin mukaan nimetty muovi oli ensimmäinen täysin synteettinen polymeeri. (Crawford and Quinn, 2017, pp. 5, 9; Feldman, 2008, p. 2) Tänä päivänä muovi eri muodoissaan on erottamaton osa ihmisten arkipäivää ja muoveja käytetään lukuisiin tarkoituksiin niin kotitalouksissa kuin teollisuu- dessa.

Mikromuovit ovat pieniä alle 5 millimetrin muovikappaleita, joita syntyy ihmisen toiminnan seurauksena joko tarkoituksella tai tahattomasti. Mikromuovien päätyminen ympäristöön ja etenkin vesistöihin on laaja ja ajankohtainen ongelma. Euroopan kemikaaliviraston mukaan ympäristöön päätyy vuosittain noin 42 000 tonnia mikromuovia tuotteista, jotka sisältävät sitä tarkoituksella. Lisäksi on arvioitu, että Euroopan pintavesiin päätyy vuosit- tain 176 000 tonnia mikromuoveja tahattomasti esimerkiksi suurempien muovikappalei- den kulumisen seurauksena. (European Chemicals Agency, n.d.) On todettu, että mik- romuoveja löytyy luonnosta ja vesistöistä maapallon syrjäisimmistäkin osista, kuten ark- tiselta alueelta (Obbard et al., 2014) ja Tiibetin ylängöltä (Zhang et al., 2016).

Mikromuovien esiintymistä ja hajoamista vesistöissä ja etenkin valtameriympäristöissä on tutkittu laajasti jo pitkään. Lähtökohtana on ollut ajatus, että mikromuovin leviäminen ympäristöön on pääosin seurausta suurempien muoviesineiden hajoamisesta (Thomp- son and Napper, 2019, p. 60), ja jätevesiä mahdollisina päästölähteinä on ryhdytty tutki- maan vasta myöhemmin. Mikromuovien esiintymisestä yhdyskuntajätevesissä on jo run- saasti tutkimustietoa ja on todettu, että yksittäinen jätevedenpuhdistamo voi olla huomati- tava pistekuormituksen aiheuttaja, vaikka puhdistusteho olisi hyvä (Murphy et al., 2016). Sen sijaan tutkimuksia teollisuuden jätevesistä on saatavilla vähemmän, vaikka muoveja hyödynnetään raaka-aineina ja muihin tarkoituksiin monilla eri teollisuudenaloilla.

Oletettavasti teollisuuden jätevedet ovat vähintään yhtä merkittävä mikromuovien pääs- tölähde kuin yhdyskuntajätevedet. Esimerkiksi tekstiiliteollisuudessa suurin osa käyte- tyistä raaka-aineista on synteettisiä, muoveiksi luokiteltavia kuituja (Textile Exchange, 2022, p. 10). Synteettisten tekstiilien pesuprosessia tutkineet De Falco et al. (2018) ovat todenneet pesussa irtoavan merkittäviä määriä mikromuoveja, joten todennäköisesti

mikromuovipäästöjä aiheutuu myös tekstiiliteollisuuden tuotantoprosesseista. Aiemmin Itävallassa Tonavan muovikertymiä tutkineet Lechner et al. (2014) huomasivat joesta löytyvän runsaasti primaarin mikromuovin tunnusmerkit täyttäviä partikkeleita, ja he epäilivät päästöjen lähteeksi joen varrella sijaitsevaa muoviteollisuutta. Muovien tuotannon ja tekstiiliteollisuuden ohella muoveja käytetään paljon myös muilla teollisuudenaloilla. Esimerkiksi Wang et al. (2020) ovat tutkimuksessaan havainneet mikromuoveja useiden eri teollisuudenalojen jätevesissä, kuten kemian-, koneenrakennus-, galvanointi- ja terästeollisuuden purkuvesissä. Näin ollen voidaan olettaa lähes minkä tahansa teollisuudenalan olevan potentiaalinen mikromuovien päästölähde.

Laajoille alueille levittäytyneitä pieniä partikkeleita on mahdotonta jälkeinpäin poistaa ympäristöstä, joten olisi tärkeää tunnistaa päästölähteet ja pyrkiä estämään mikromuovien pääsy ympäristöön jo niiden syntyipaikoilla. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on koostaa tutkimustietoa mikromuovien esiintymisestä ja karakterisoinnista eri teollisuudenalojen jätevesissä ja tarkastella teollisuuden jätevesiä potentiaalisina mikromuovien päästölähteinä. Työssä keskitytään tuotantolaitosten ja teollisuuspuhdistamojen lähteisiin jätevesiin. Tavoitteena on vastata kysymyksiin: minkä teollisuuden alojen jätevesistä mikromuoveja löytyy, ja mitkä ovat yleisimmin jätevesissä esiintyvät muovien polymeerit. Mikromuovien aiheuttaman ympäristöhaitan kannalta tärkeä tieto on myös partikkelien kokojakauma. Teollisuuden jätevedet poikkeavat koostumukseltaan yhdyskuntajätevesistä, joten oleellista on tuoda esille näytteenotto- ja analyysimenetelmiä, joita teollisuusjätevesien tutkimuksissa on sovellettu.

Seuraavassa luvussa kerrotaan taustatietoa muoveista, niiden kemiallisesta rakenteesta ja ominaisuuksista. Lisäksi perehdytään mikromuoveihin, niiden luokitteluun ja syntymekanismeihin. Luvussa 3 esitellään lyhyesti mikromuovien määrittämisessä käytettyjä näytteenotto- ja analyysimenetelmiä ja niiden periaatteita. Lukuun 4 on koostettu eri menetelmillä ja eri teollisuudenalojen jätevesistä tehtyjen tutkimuksien tuloksia. Luvussa 5 tarkastellaan teollisuuden mikromuovipäästöjen tilannetta sekä päästöjen monitorointia ja luvussa 6 esitetään yhteenveto ja johtopäätökset.

## 2. MUOVIT JA MIKROMUOVIT

Muovien haitat ja mikromuovien levinneisyys ovat ajankohtaisia uutisaiheita, mutta harvempi kuitenkaan tietää täsmällisesti, mitä mikromuovit tai muovit oikeastaan ovat. Tässä luvussa perehdytään lyhyesti muovien rakenteeseen, mikromuovin käsitteeseen sekä muovien ja mikromuovien luokitteluun.

### 2.1 Muovin rakenne

Puhuttaessa muoveista käsitteet *muovi* ja *polymeeri* usein sekoittuvat keskenään, vaikka ne eivät tarkoita samaa asiaa. *Muovi* on yleisnimitys synteettiselle seosmateriaalille, joka koostuu suurimmaksi osaksi polymeerista, mutta sisältää yleensä myös lisäaineita. (Cantor and Watts, 2011, p. 3) Standardin ISO 472 määritelmän mukaan muovi tarkoittaa materiaalia, jonka keskeinen ainesosa on suurimolekyylinen polymeeri, jota voidaan muotoilla virtauksen avulla ainakin jossain valmistusprosessin vaiheessa (SFS-EN ISO 472, 2013).

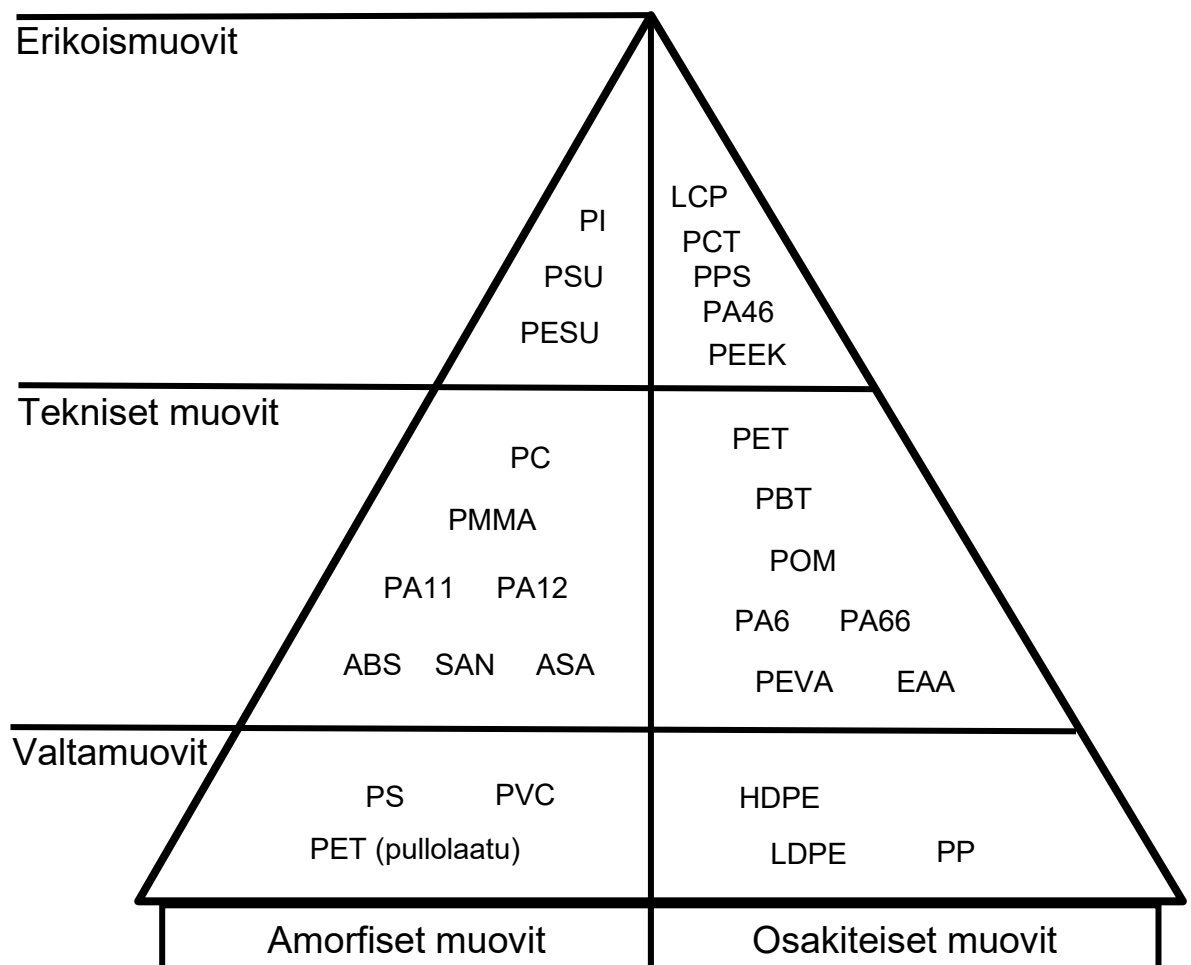
Polymeerit ovat pitkäketjuisia makromolekyyleja, jotka muodostuvat pienempien molekyylien, monomeerien, liittyessä toisiinsa polymerisaatioreaktion seurauksena (Cantor and Watts, 2011, p. 4; Seppälä, 2008, p. 15). Polymerisaatio on luonnossa esiintyvä reaktio, ja polymeerit ovat keskeisessä osassa monissa luonnon rakenteissa. Esimerkiksi proteiinit ovat aminohappojen muodostamia polymeereja. (Seppälä, 2008, p. 15) Useimmat polymeerit ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka sisältävät pääsääntöisesti hiiltä, vetyä, happea, typpeä ja rikkiä. Muovin polymeeri voi olla täysin synteettinen tai joko osittain tai kokonaan luonnonmateriaalia. Esimerkiksi selluloosa on luonnossa esiintyvä polymeeri, jota käytetään kemiallisesti muunneltuna selluloosa-asetatiin valmistukseen. Täysin synteettiset polymeerit tyypillisesti pohjautuvat raakaöljyyn. (Shrivastava, 2018, pp. 3–5) Synteettinen polymerisaatio saadaan aikaiseksi kontrolloiduissa olosuhteissa lämmön ja paineen avulla (Cantor and Watts, 2011, p. 4; Shrivastava, 2018, p. 5).

Yleensä polymeerit eivät sellaisinaan sovellu muovituotteiden valmistukseen, ja lisäaineet ovat välttämättömiä muovin ominaisuuksien parantamiseksi. Lisäaineilla mahdollistetaan muovin työstäminen valmistusprosessin aikana ja tuodaan haluttuja ominaisuuksia lopputuotteeseen. Yleisesti käytettyjä lisäaineita ovat esimerkiksi erilaiset stabilisaattorit, pehmentimet ja värit. (Coleman, 2011, p. 419)

## 2.2 Muovien nimeäminen ja luokittelu

Muovien nimeämisessä käytetään polymeerien nimiin viittaavia lyhenteitä, jotka ovat kansainvälisesti hyväksytyjä. Lisäksi käytössä on paljon valmistajien omia kauppanimiä. (Seppälä, 2008, p. 32; Shrivastava, 2018, p. 41,43) Muoveja voidaan luokitella eri tavoin perustuen muun muassa polymeerin valmistusmenetelmään, kemiallisiin ominaisuuksiin tai muovin markkina-asemaan (Järvinen, 2017, p. 10).

Muovautuvuusominaisuuksiensa perusteella muovit luokitellaan kestumuoveihin ja kertamuoveihin. Kestumuoveja voidaan sulattaa ja muovata lämmön avulla uudelleen, mutta kertamuoveja ei voi enää muokata sen jälkeen, kun ne kerran ovat saaneet muotonsa. Käyttötarkoituksen tai markkina-aseman perusteella muovit jaetaan karkealla tasolla kolmeen eri osa-alueeseen: valtamuoveihin, teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin (kuva 1). Tämä jaottelutapa ei ole yksiselitteinen. Esimerkiksi polyeteenitereftalaatti (PET) voidaan luokitella joko valtamuoveihin tai teknisiin muoveihin. (Järvinen, 2017, pp. 10–11; Millet et al., 2019, pp. 6–9; Seppälä, 2008, pp. 27–31)



**Kuva 1** Kestumuovien luokittelu. Lyhenteiden selitykset liitteessä A. Muokattu lähteistä (Järvinen, 2017, p. 11; Millet et al., 2019, p. 7).

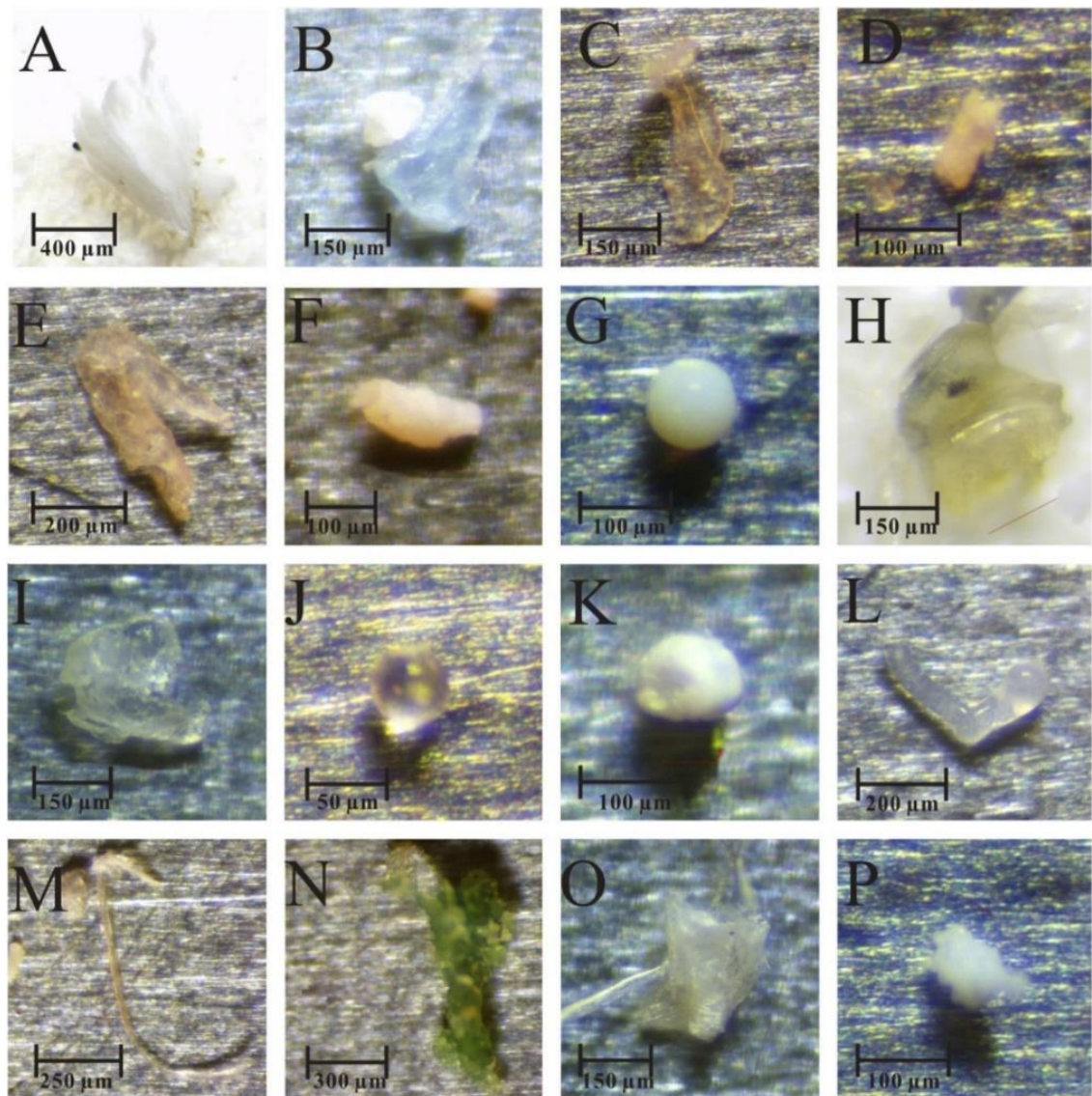
Polymeerin kiteytymistäipumuksen perusteella muovit jaotellaan amorfisiin ja osakiteisiin (kuva 1) (Järvinen, 2017, pp. 10–11; Shrivastava, 2018, pp. 8–9). Amorfiset polymeerit ovat yleensä läpinäkyviä ja niillä on hyvä iskunkestävyys. Niillä ei ole selkeää sulamispistettä, vaan ne alkavat pehmetä asteittain jo alhaisissa lämpötiloissa (Shrivastava, 2018, p. 9). Osakiteiset polymeerit ovat lujia ja kestävät hyvin kemikaaleja ja kulutusta (Crawford and Quinn, 2017, p. 63). Kuva 1 havainnollistaa kestumuovien jakautumista amorfisiin ja osakiteisiin sekä jaottelua käyttötarkoituksen mukaan.

### 2.3 Mikromuovin määritelmä ja mikromuovien luokittelu

Mikromuovit ovat pieniä alle 5 millimetrin muovipartikkeleita, joiden muoto ja polymeerimateriaali vaihtelevat. Kuvassa 2 on mikroskooppisuurennoksia tyypillisistä jätevesinäytteen sisältämistä muovipartikkeleista. Mikromuovit jaetaan primaarisiin ja sekundaarisiin niiden syntymekanismin perusteella. Primaarit mikromuovit ovat tarkoituksella valmistettuja muovirakeita, joita käytetään sekä teollisuuden raaka-aineina että kuluttajatuotteissa esimerkiksi pesuaineiden tai kosmetiikkatuotteiden hankaavina ainesosina. Sekundaariset mikromuovit syntyvät tahattomasti suurempien muovikappaleiden tai synteettisten tekstiilien kulumisen seurauksena. (De Falco et al., 2018; European Chemicals Agency, n.d.; Wang et al., 2020)

Mikromuovien määrittämisessä muovipartikkeleita luokitellaan niiden koon, muodon, värin ja polymeerimateriaalin mukaan (kuva 2). Kirjallisuudessa luokittelu ei ole yhdenmukaista, vaan luokittelutavat vaihtelevat eri tutkimusten välillä. Hidalgo-Ruz et al. (2012) ovat katsausartikkelissaan todenneet, että morfologisessa jaottelussa käytetty tapa ja kategorioiden määrä riippuvat tutkijoiden itsensä asettamista kriteereistä. Vastaavasti partikkelikokoon perustuvassa luokittelussa kokoluokkien valintaan vaikuttavat käytetyt näytteenotto- ja erotusmenetelmät. Hidalgo-Ruz et al. (2012) esittävät, että menetelmäteknisistä syistä mikromuovien jaottelussa tulisi käyttää kahta pääasiallista kokoluokkaa: alle 500 µm ja 500 µm – 5 mm.

Crawford ja Quinn (2017, p. 122) esittelevät kirjassaan standardoidun koko- ja värilajittelujärjestelmän, jossa mikromuovit jaotellaan partikkelikokoon mukaan kolmeen luokkaan: mikromuovit 1–5 mm, pienet mikromuovit 1 µm–1 mm ja nanomuovit < 1 µm. Ulkomuotoon perustuvassa luokittelussa järjestelmä käyttää viittä kategoriaa, joiden nimiin lisätään *mikro*-etuliite, kun partikkelin koko on alle 1 mm: pelletit/mikrohelmet, fragmentit, kuidut, kalvot ja vaahtomuovit.



**Kuva 2** Mikroskooppikuviissa (A) valkoinen PE-fragmentti, (B) sininen PE-fragmentti, (C) läpinäkyvä PE-kalvo, (D) valkoinen PP-fragmentti, (E) läpikuultava PP-kalvo, (F) valkoinen PS-fragmentti, (G) valkoinen PS-pelletti, (H) keltainen PS-fragmentti, (I) läpikuultava PS-kalvo, (J) läpinäkyvä PS-pelletti, (K) valkoinen PET-fragmentti, (L) läpikuultava PET-fragmentti, (M) läpikuultava PET-kuitu, (N) vihreä PA-fragmentti, (O) läpinäkyvä PA-kalvo, (P) valkoinen PVC-fragmentti (Wang et al., 2020).

Muovipartikkelien koolla, muodolla ja värillä on merkitystä arvioitaessa mikromuovien ympäristövaikutuksia. On havaittu, että muovipartikkelien lukumäärä ympäristönäytteissä kasvaa partikkelikoon pienentyessä (Leusch et al., 2023). Kooltaan pienemmät mikromuovit päätyvät helpommin vesieliöiden ja kalojen ruoansulatuselimistöön (Xu et al., 2020) ja hyvin pienet muovihiukkaset kulkeutuvat kudosten läpi (Reineke et al., 2013). Useissa tutkimuksissa valtaosa kalojen elimistöistä löydettyistä muovipartikkeleista on edustanut yhtä tiettyä väriä ja toistuvasti on todettu väriltään mustien ja keltaisten mikromuovien sisältävän haitta-aineita enemmän verrattuna muun värisiin mikromuoveihin (Crawford and Quinn, 2017, p. 173).

## 3. MIKROMUOVIEIN MÄÄRITTÄMINEN

Mikromuovien analysointiin vesi- ja jätevesinäytteistä on käytettävissä useita erilaisia menetelmiä. Mikromuovit ovat verrattain uusi tutkimusala ja menetelmästandardien puuttuessa tutkijat ovat saaneet käyttää kekseliäisyytään niin näytteenoton kuin määrittymenetelmien suhteen. Seuraavassa luvussa 3.1 kerrotaan näytteenotosta ja näytteiden esikäsittelystä, jonka jälkeen luvuissa 3.2 ja 3.3 esitellään mikromuovien analysointiin soveltuvia menetelmiä. Esille tuodaan analyysimenetelmät, jotka ovat kirjallisuudessa esiintyneet teollisuuden jätevesistä tehtyjen tutkimuksien yhteydessä.

### 3.1 Näytteenotto ja näytteiden esikäsittely

Määrittymenetelmästä riippumatta näytteenotto ja näytteiden esikäsittely ovat tärkeitä vaiheita määrittymen luotettavuuden ja tulosten vertailukelpoisuuden kannalta. Standardien puuttuessa näytteenottomenetelmät kuitenkin vaihtelevat paljon eri tutkimusten välillä.

Jäteveden virtaus ja koostumus puhdistamoilla vaihtelee, joten edustavan näytteen saamiseksi tarvitaan useampi jaksoittainen näytteenotto. Näytteenottoa toistetaan määrittelyillä aikaväleillä tietyn ajanjakson kuluessa. Lopuksi eri ajankohtina kerätyt osanäytteet yhdistetään kokoomanäytteeksi. (Chan et al., 2021; Deng et al., 2023a, 2023b) Vaihtoehtoisesti eri aikoina otetut näytteet voidaan analysoida ja tulkita erikseen (Akyildiz et al., 2022). Näytteenottovälineenä käytetään yleensä teräsämpäriä (Deng et al., 2023a, 2023b; Franco et al., 2020; Xu et al., 2018) tai lasiastiaa (Wang et al., 2020). Näytteet kerätään astiaan suoraan jätevesivirtauksesta (Akyildiz et al., 2022; Chan et al., 2021) tai käyttäen pumppua, johon on yhdistetty suodatin ja virtausmittari (Bitter and Lackner, 2020). Näytteiden tilavuudet vaihtelevat suuresti eri tutkimusten välillä. Tekstiiliteollisuuden päästöjä tutkineet Chan et al. (2021) ovat selvittäneet eri näytetilavuuksien soveltuvuutta mikromuovikuitujen määrittymiseen. Heidän suosituksensa sopivaksi näytetilavuudeksi on 5 litraa. Tällä tilavuudella kuitulaskennan suhteellinen keskihajonta oli alle 5 % ja näytteet olivat kooltaan helposti käsiteltävissä.

Näytteet on yleensä aina esikäsiteltävä ennen varsinaista analyysiä. Esikäsitelyprosessi on usein määrittymen työläin ja eniten aikaa vievä vaihe. (Tirkey and Upadhyay, 2021) Esikäsitelymenetelmän valintaan vaikuttavat sekä näytteen koostumus että valittu analyysimenetelmä. Erilaisia esikäsitelymenetelmiä on kuvattu taulukossa 1.

**Taulukko 1** Mikromuoveja sisältävien jätevesinäytteiden esikäsittelyyn soveltuvia menetelmiä (Prata et al., 2019; Tirkey and Upadhyay, 2021).

Menetelmä		Menetelmän kuvaus / tarkoitus
Fysikaalinen	Suodatus	Kiinteät aineet erotellaan nesteestä käyttäen joko yhtä tai useampaa eri silmäkoon suodatinta.
	Vakuumisuo-datus	Kiintoaine erotellaan johtamalla näyte tiheän kalvosuodattimen läpi alipaineen avulla.
	Visuaalinen erottelu	Partikkeleiden erottelu visuaalisesti optisen mikroskoopin avulla.
	Tiheyserottelu	Näytettä sekoitetaan suolaliuoksessa, yleensä NaCl tai ZnCl <sub>2</sub> . Liuos valitaan näytteen oletetun polymeerikoostumuksen perusteella. Muovipartikkelit jäävät liuoksen pinnalle, josta ne kerätään talteen.
Kemiallinen	Happoliuotus	Eloperäisen kiintoaineen liuotus hapolla, kuten HCl tai HNO <sub>3</sub> .
	Hapetus emäksellä	Eloperäisen kiintoaineen hapetus voimakkaalla emäksellä, kuten NaOH tai KOH.
	Hapetus vetyperoksidilla	Eloperäisen aineksen hapetus vetyperoksidilla (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).
Biologinen	Entsyymihajotus	Eloperäinen aines hajotetaan entsyymien avulla.

Kaikissa työvaiheissa näytteiden huolellinen käsittely on tärkeää kontaminaation välttämiseksi. Näytteenoton ja esikäsittelyn aikana on suuri riski kontaminaatioon, joka aiheutuu käytetyistä välineistä tai vaateuksesta. Sen vuoksi muovisia työvälineitä tulisi välttää ja laboratoriovaateukseksi valkoinen puuvillatakki on paras vaihtoehto. Kontrollinäytteiden käyttö mahdollisen kontaminaation havaitsemiseksi on suositeltavaa. (Löder and Gerdts, 2015; Tirkey and Upadhyay, 2021)

## 3.2 Spektroskooppiset menetelmät

Analyysimenetelmät voidaan jakaa käytetyn tekniikan perusteella spektroskooppisiin ja termoanalyttisiin menetelmiin (Shim et al., 2017). Spektroskooppisilla menetelmillä saadaan laskettua näytteessä olevien partikkeleiden lukumäärä sekä määritettyä partikkeleiden koko, muoto ja polymeerityyppi (Strungaru et al., 2019). Mikromuovien karakterisoinnissa käyttökelpoisimmat menetelmät ovat Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia (FTIR) ja Raman-spektroskopia (Tirkey and Upadhyay, 2021). Molemmat kuitenkin edellyttävät lähes poikkeuksetta muovipartikkelien visuaalista erottelua mikroskoopilla, mikä on hidas ja virheille altis työvaihe (Franco et al., 2020). Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan tarkemmin mikromuovien määrittämiseen soveltuvista spektroskooppisista menetelmistä.

### 3.2.1 Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia

FTIR on paljon käytetty menetelmä analysoitaessa mikromuoveja ympäristönäytteistä. Menetelmä on kohtuullisen yksinkertainen ja erittäin luotettava (Löder et al., 2015), eikä se tuhoa tutkittavaa näytettä (Araujo et al., 2018; Tirkey and Upadhyay, 2021). Menetelmä perustuu infrapunasäteilyn absorboitumiseen näytteessä. Kun näytettä säteilytetään infrapunavalolla, osa säteilystä absorboituu ja aiheuttaa molekyylien värähtelyä. Tämä voidaan rekisteröidä, jolloin saadaan aineen molekyyliarakenteesta riippuvainen yksilöllinen spektri. Menetelmän avulla on mahdollista selvittää tarkasti näytteen sisältämän mikromuovin polymeerityyppi, sillä infrapunaspektri on kullekin aineelle ominainen. (Käppler et al., 2016)

FTIR soveltuu mikromuovien karakterisointiin 20  $\mu\text{m}$ :n partikkelikokoon saakka, mutta on olemassa optimointitekniikoita, joita hyödyntämällä menetelmää voidaan käyttää myös kooltaan pienempien mikromuovien analysointiin. (Tirkey and Upadhyay, 2021) Näistä mikro-FTIR soveltuu erittäin pienten, alle 10  $\mu\text{m}$ :n partikkelien tutkimiseen. Polttotasorivi-ilmaisimeen perustuvalla optimointitekniikalla (FPA-FTIR) voidaan karakterisoida alle 20  $\mu\text{m}$ :n partikkeleita. Menetelmä hyödyntää useita ilmaisinelementtejä samanaikaisesti ja sen avulla saadaan tallennettua tuhansia spektrejä yhdellä mittauksella. Näytteen esikäsittely helpottuu, koska suodattimelle eristettyjä mikromuovipartikkeleita ei tarvitse erottaa, vaan suodatin voidaan analysoida suoraan kokonaisuudessaan. (Löder and Gerds, 2015)

### 3.2.2 Raman-spektroskopia

Raman-spektroskopia on FTIR:n ohella käytetyimpiä menetelmiä analysoitaessa vesiympäristöistä otettuja näytteitä (Käppler et al., 2016). Raman-spektroskopia perustuu elektromagneettisen säteilyn kimmottomaan sirontaan aineesta. Raman-sironta on kullekin aineelle ominainen. Tutkittavaan näytteeseen ohjataan lasersäde ja tuloksena saadaan värähtelyspektri, jonka perusteella aineen molekyyli rakenne voidaan määrittää tarkasti. Havaittu spektri on materiaalille yksilöllinen, sitä voidaan verrata sormenjälkeen. (Araujo et al., 2018)

Raman-spektroskopia ei tuhoa näytettä ja se soveltuu käytettäväksi etenkin silloin, kun näytteen partikkelikoko on pieni (Käppler et al., 2016; Araujo et al., 2018). Mikro-Raman-spektroskopia on menetelmän erikoistekniikka, jolla saadaan molekyyli tason tietoa hyvin pienistä partikkeleista. Sillä on mahdollista mitata spektri pinta-alalta, joka on pienempi kuin  $1 \mu\text{m}^2$ . (Vandenabeele and Ando, 2013, p. 107) Raman-spektroskopia on erityisen herkkä tunnistamaan poolittomia ryhmiä eikä näytteen sisältämä vesi häiritse määrittystä (Araujo et al., 2018). Menetelmän haittapuolena on sen herkkyys fluoresenssin vaikutukselle. Muovin epäorgaanisten lisäaineiden, etenkin väriaineiden, tai mikromuoviin mahdollisesti sitoutuneen orgaanisen aineksen fluoresenssi saattaa häiritä määrittystä tai pahimmassa tapauksessa peittää Raman-spektrin kokonaan. (Käppler et al., 2016; Araujo et al., 2018)

### 3.2.3 Laserohjattu infrapunaspektrofotometri

Laserohjattu infrapunaspektrofotometri (LDIR) on uudempaa teknologiaa edustava spektroskooppinen menetelmä, jota on hiljattain ryhdytty käyttämään mikromuovien karakterisoinnissa. Spektrofotometrin infrapunavalonlähteenä (IR) käytetään kvanttikaskadilaseria (quantum cascade laser, QCL). Näytteen sisältämät mikromuovipartikkelit paikannetaan kuva-analyysin avulla, ja valituille partikkeleille mitataan IR-spektri. (Fjäder et al., 2022, p. 78)

Paikannus ja tunnistaminen ovat automaattisia toimintoja, minkä ansiosta LDIR-menetelmän avulla on mahdollista analysoida noin 300 partikkelia tunnissa (Deng et al., 2023b). LDIR-spektritietokannat ovat muovien osalta vielä suppeita FTIR-menetelmään verrattuna (Fjäder et al., 2022, p. 78), mutta menetelmällä on kuitenkin mahdollista tunnistaa yli 50 eri mikromuovityyppiä (Deng et al., 2023b).

### 3.3 Termoanalyttiset menetelmät

Termoanalyttisillä menetelmillä saadaan selville näytteen sisältämät polymeerityypit ja niiden massakonsentraatiot. Partikkelien lukumäärän tai muodon selvittämiseen termoanalyttiset menetelmät eivät kuitenkaan sovellu, sillä ne tuhoavat näytteen (Shim et al., 2017; Strungaru et al., 2019). Menetelmien destruktiivisen luonteen vuoksi määrittäminen ei myöskään ole toistettavissa (Shim et al., 2017). Seuraavissa alaluvuissa kuvataan termoanalyttisiä menetelmiä, joita on käytetty mikromuovien määrittämiseen teollisuuden jätevesistä.

#### 3.3.1 Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria

Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria (DSC) on nopea ja helppo termoanalyttinen menetelmä, jota käytetään yleisesti laadunvalvonnassa polymeeriteollisuudessa. Menetelmä perustuu polymeerien erilaisiin lämpöominaisuuksiin, jotka ovat kullekin muovilaudulle luonteenomaiset. (Seppälä, 2008, p. 60) Menetelmällä saadaan tietoa näytteen polymeerikoostumuksesta, mutta analyysi vaatii aina tunnetun vertailunäytteen. Sen vuoksi menetelmä ei sovellu useita tuntemattomia polymeerejä sisältävien ympäristönäytteiden analysoimiseen. DSC on kuitenkin hyödyllinen tunnistettaessa tiettyjä primaarisia mikromuoveja, joista referenssinäyte on helposti saatavilla. (Shim et al., 2017)

DSC:n huonoja puolia ovat tutkittavan näytteen tuhoutuminen ja menetelmän soveltumattomuus amorfisten polymeerien analysointiin. Esimerkiksi käytetyimpiin valtamuoveihin kuuluvien polyvinyylikloridin (PVC) ja polystyreenin (PS) määrittäminen DSC:lla ei ole mahdollista (Bitter and Lackner, 2020).

#### 3.3.2 Alkuaineanalyysi yhdistettynä ylimäärätyyn yhtälöryhmään

Mallow et al. (2020) esittelevät tutkimuksessaan menetelmän, jossa alkuaineanalyysin tulokset sijoitetaan ylimäärätyyn yhtälöryhmään (Elemental Analysis combined with Overdetermined Equation method, EA-OEM). Menetelmä on kehitetty alun perin energiajätelaitoksille saapuvan jätepolttoaineen muovipitoisuuden määrittämiseen. Se perustuu eloperäisen ja muoviaioksen alkuainekoostumusten eroavaisuuksiin. Eloperäinen aines tyypillisesti sisältää paljon happea, kun taas synteettiset polymeerit sisältävät happea vain vähän tai ei lainkaan. Lisäksi yleisimmät polymeerit PE, PP ja PS sisältävät huomattavasti enemmän hiiltä ja vetyä kuin eloperäinen aines.

EA-OEM-menetelmän lähtökohtana on alkuaineiden massatasapainoista johdettu yhtälöryhmä. Näytteelle suoritetun alkuaineanalyysin tulokset sijoitetaan yhtälöryhmään

yhdessä tunnettujen, kirjallisuuteen perustuvien arvojen kanssa. Yhtälöryhmän muuttujat kahta lukuun ottamatta saadaan määritettyä analyttisesti tai teoreettisesti. Yhtälöryhmä ratkaistaan käyttäen datan sovituksen epälineaariseen optimointiin perustuvaa algoritmia. Menetelmä jakaa teoreettisesti näytteen tuhkattoman kuiva-aineen kahteen massaosuuteen, muoviosuuteen ja eloperäiseen osuuteen. Muovien sisältämät epäorgaaniset lisäaineet lukeutuvat tuhkaan, eivätkä ole mukana muoviosuudessa. Siten muoviosuus kertoo näytteen sisältämien polymeerien määrän. (Mallow et al., 2020)

EA-OEM-menetelmä ei sovellu täysin tuntemattomien ympäristönäytteiden tutkimiseen. Etukäteen pitäisi tietää odotettavissa oleva jako eloperäiseen ja muoviosuuteen tai tulisi olla mahdollisuus ottaa näytteet puhtaasti eloperäisestä aineksesta ja muovista erikseen alkuainekoostumuksen määrittämiseksi. Mallow et al. (2020) tarjoavat menetelmää edullisena vaihtoehtona rutiininomaiseen tarkkailuun kontrolloiduissa olosuhteissa, joissa ei tapahdu suuria muutoksia.

## 4. MIKROMUOVIEIN ESIINTYMINEN TEOLLISUUDEN JÄTEVESISSÄ

Tähän lukuun on koottu tutkimustuloksia mikromuovien esiintymisestä eri teollisuudenalojen jätevesissä. Tuloksissa keskitytään tarkastelemaan tuotantolaitosten ja teollisuusalueiden jätevedenpuhdistamoiden lähteviä jätevesiä. Alaluvuissa käsitellään ensin tekstiili- ja kemianteollisuuden päästöjä, joiden jälkeen tarkastellaan muita teollisuudenaloja.

### 4.1 Tekstiiliteollisuus

Tämän tutkielman johdantokappaleessa tekstiiliteollisuus nostettiin esille alana, jonka käyttämistä raaka-aineista huomattava osa on synteettisiä, muoveihin luokiteltavia kuituja. Mikromuoveja on tutkittu tekstiiliteollisuuden jätevesistä muun muassa PET-neulosta valmistavalta tuotantolaitokselta (Chan et al., 2021), eri materiaaleista kankaita valmistavalta tehtaalta (Akyildiz et al., 2022) sekä tekstiiliteollisuuteen painottuneiden teollisuusalueiden jätevedenpuhdistamoilta (Wang et al., 2020; Xu et al., 2018). Taulukossa 2 on esitetty yhteenveto tutkimusten tuloksista.

**Taulukko 2** Mikromuovien esiintyminen tekstiiliteollisuuden lähtevissä jätevesissä.

	Analyysimenetelmä	Mikromuovimäärä	Polymeerityypit	Partikkelikoko	Lähde
JVP	FTIR	16,3 ( $\pm$ 1,2) kuitua/l (sis. luonnonkuidut)	PET, PP, viskoosi	5 $\mu$ m–1 mm	Xu et. al. 2018
JVP	$\mu$ -Raman	9 kpl/l	PE, PP, PS, PET, PVC	100 $\mu$ m–1 mm	Wang et. al. 2020
JVP	$\mu$ -Raman	12 kpl/l	PE, PP, PS	16 $\mu$ m–0,5 mm	Wang et. al. 2020
TL	$\mu$ -Raman	361,6 $\pm$ 24,5 kuitua/l	PET	20 $\mu$ m–5 mm	Chan et. al. 2021
TL	$\mu$ -FTIR	310–2404 kuitua/l (sis. luonnonkuidut)	PAN, PET, PP, PA	10 $\mu$ m–5 mm	Akyildiz et. al. 2022

Lyhenteet: JVP = teollisuusalueen jätevedenpuhdistamo, TL = tuotantolaitos

Kaikissa tutkimuksissa suurin osa näytteiden sisältämistä kuiduista oli pituudeltaan lyhyempiä kuin 1 mm (Akyildiz et al., 2022; Chan et al., 2021; Xu et al., 2018). Yksittäisten tuotantolaitosten purkuvesistä havaitut polymeerit vastasivat tuotannossa käytettyjä raaka-aineita (Akyildiz et al., 2022; Chan et al., 2021). Näytteissä esiintyneistä polymeerityypeistä (taulukko 2) PET, polypropeeni (PP), polyeteeni (PE), PS ja PVC ovat yleisiä ja paljon käytettyjä valtamuoveja (kuva 1). Polymeereistä PET, PP, polyamidi (PA) ja akryyli (PAN) ovat tyypillisiä tekstiiliteollisuuden kuitumateriaaleja. Näistä PET on ylivoimaisesti eniten tuotettu tekstiilikuitu, jonka markkinaosuus vuonna 2021 oli noin 54 % kaikesta maailman kuitutuotannosta. Havaituista polymeerityypeistä viskoosi on selluloosamuuntokuitu, jota ei luokitella synteettisiin kuituihin. (Textile Exchange, 2022, p. 10)

Tuotantolaitoksilla on omat prosessinsa jätevesien puhdistamiseen (Akyildiz et al., 2022; Chan et al., 2021), mutta mikrokuituja esiintyy moninkertaisesti enemmän tuotantolaitoksien purkuvesissä kuin teollisuusalueiden puhdistamoiden lähteissä jätevesissä (taulukko 2). Akyildiz et al. (2022) olivat tutkineet näytteitä myös tekstiilitehtaan jätevedenpuhdistamolle saapuvasta jätevedestä ja todenneet puhdistusprosessin mikrokuitujen poistotehon vaihtelevan voimakkaasti välillä 38 % - 65 %.

Xu et al. (2018) ovat tutkineet mikrokuitujen esiintymistä ja kuitujen tyyppiä jätevedestä teollisuusalueella, jossa toimii 33 tekstiilien paino- ja värjäyslaitosta. Alueen jätevedenpuhdistamo käsittelee n. 30 000 tonnia jätevettä päivässä ja siitä on n. 95 % teollisuuden ja loput ympäröivän asutuksen jätevesiä. Xu et al. (2018) havaitsivat, että mikrokuitujen määrällä ja näytteistä tutkitulla kiintoainepitoisuudella oli merkittävä korrelaatio. Mikrokuiduista suurin osa, 76 %, poistui jo esiselkeytyksessä, ja tutkitun prosessin kokonaispuhdistustehoksi saatiin 95 %. Vaikka prosessin puhdistusteho on hyvä, joka päivä las kennallisesti  $4,89 \cdot 10^8$  mikrokuitua pääsee vesistöön. Puhdistamolta lähtevän jäteveden sisältämistä kuiduista n. 44 % on muoveja.

## 4.2 Kemianteollisuus

Kemianteollisuuden jätevedet ovat kiinnostava alue mikromuovimääritysten kannalta, sillä polymeeri- ja muoviteollisuus kuuluvat tähän teollisuudenalaan. Taulukkoon 3 on kerätty kemianteollisuuden lähteistä jätevesistä tehtyjen analyysien tuloksia. Tulosten vertailu on hankalaa, sillä tutkimuksissa on käytetty hyvin erilaisia määrittämenetelmiä. Spektroskooppisilla menetelmillä saadut tulokset ilmoitetaan partikkelien lukumääränä litraa kohden, mutta kahdella erilaisella menetelmällä saadut tulokset poikkeavat toisistaan huomattavasti (Deng et al., 2023b, 2023a; Wang et al., 2020). Termoanalyttinen DSC puolestaan antaa tuloksena polymeerien massakonsentraation näytteessä, eikä partikkelien lukumäärästä saada tietoa.

**Taulukko 3** Mikromuovien esiintyminen kemianteollisuuden lähteissä jätevesissä.

	<b>Analyysi-</b> <b>menetelmä</b>	<b>Mikromuovien</b> <b>määrä</b>	<b>Polymeeri-</b> <b>tyypit</b>	<b>Partikkelikoko</b>	<b>Lähde</b>
JVP	$\mu$ -Raman	6 kpl/l	PE, PP, PS	16 $\mu$ m–0,5 mm	Wang et. al. 2020
TL	$\mu$ -Raman	13–23 kpl/l	PE, PP, PS, PET, PA	16 $\mu$ m–2 mm	Wang et. al. 2020
TL	DSC	1,2–28,1 $\mu$ g/l	PE, PP, (PA, PET)	10 $\mu$ m–5 mm	Bitter and Lackner 2020
JVP	DSC	15,2–35,5 $\mu$ g/l	PE, PP, (PA, PET)	10 $\mu$ m–5 mm	Bitter and Lackner 2020
JVP	LDIR	1280 kpl/l	PP, PE, silikoniharts	20 $\mu$ m–195,7 $\mu$ m	Deng et. al. 2023a
JVP	LDIR	608 kpl/l	PP, PE, silikoniharts	20 $\mu$ m–483,9 $\mu$ m	Deng et. al. 2023b

Lyhenteet: JVP = teollisuusalueen jätevedenpuhdistamo, TL = tuotantolaitos

Kemianteollisuuden purkuvesissä runsaimmin esiintyneet polymeerit ovat PE ja PP (Bitter and Lackner, 2020; Deng et al., 2023b, 2023a; Wang et al., 2020). Lisäksi Wang et al. (2020) havaitsivat runsaasti myös PS:ä, joka on amorfinen polymeeri eikä siten määritettävissä DSC:lla. Bitter ja Lackner (2020) toteavatkin, että DSC-määrittelyllä saatu polymeerien kokonaismassakonsentraatio saattaa olla todellisuutta alhaisempi, koska tietyt yleiset polymeerit jäävät tunnistamatta. DSC ei myöskään anna tietoa mikromuovien kokojakaumasta, vaan taulukkoon 3 merkitty partikkelikoko on näytteenotossa käytettyjen suodattimien silmäkokoihin perustuva vaihteluväli. Eri kokoisilla suodattimilla näytteet on jaettu kahteen kokoluokkaan: suuret mikromuovit 1 mm–5 mm ja pienet mikromuovit 10  $\mu$ m–1 mm. Suurimmat massakonsentraatiot mitattiin kokoluokassa 10  $\mu$ m–1 mm. (Bitter and Lackner, 2020)

Petrokemianteollisuuden painottuneiden teollisuusalueiden jätevesiä tutkineet Deng et al. (2023a, 2023b) ovat käyttäneet mikromuovien karakterisointiin LDIR-menetelmää, jolla näytteistä tunnistettiin noin 20 eri polymeerityyppiä. Taulukkoon 3 on merkitty vain runsaimmin esiintyneet PP, PE ja silikoniharts. Havaittujen polymeerien lukumäärä on paljon suurempi kuin Raman-spektroskopiolla tai DSC:lla saadut tulokset, ja myös todetut partikkelien lukumäärät ovat huomattavan suuria (taulukko 3). Valtaosa havaitusta mikromuovista oli partikkelikooltaan alle 100  $\mu$ m. (Deng et al., 2023a, 2023b)

### 4.3 Muut teollisuudenalat

Tähän lukuun on koottu tietoa eri teollisuudenalojen tuotantolaitoksilta (TL) ja teollisuusalueiden jätevedenpuhdistamoilta (JVP) tehdyistä tutkimuksista. Näytteenottokohteiden lähteistä jätevesistä tehtyjen analyysien tulokset on koottu taulukkoon 4.

**Taulukko 4** Mikromuovien esiintyminen eri teollisuudenalojen lähteissä jätevesissä. Näytteenottokohteiden tiedot ovat selitetekstissä taulukon alapuolella ja taulukossa esiintyvien polymeerien lyhenteiden selitykset ovat liitteessä A.

	Analyysimenetelmä	Mikromuovin määrä	Polymeerityypit	Partikkelikoko	Lähde
1	μ-Raman	8 kpl/l	PP, PS, PET	16 μm–2 mm	Wang et. al. 2020
2	μ-Raman	7 kpl/l	PE, PS, PP, PET	16 μm–1 mm	Wang et. al. 2020
3	μ-Raman	8–11 kpl/l	PE, PP, PS, PET	16 μm–1 mm	Wang et. al. 2020
4	μ-Raman	17–36 kpl/l	PE, PP, PS, PET, PA	16 μm–1 mm	Wang et. al. 2020
5	DSC	0,5–5 μg/l	PE, PP, PET	10 μm–5 mm	Bitter and Lackner 2020
6	FTIR	24 kpl/l	PVC, HDPE, PE, SAN, PEVA, PA	100 μm–5 mm	Franco et. al. 2020
7	FTIR	119 kpl/l	PVC, HDPE, PP, PE, SAN, EAA, PCT	100 μm–5 mm	Franco et. al. 2020

1 JVP koneenrakennus

2 JVP terästeollisuus

3 TL galvanointi

4 TL koneenrakennus

5 JVP teollisuudenalat ei tiedossa

6 JVP elintarviketeollisuutta, huonekalujen ja nahkatavaran valmistusta

7 TL telakkatoiminta ja merirakentaminen

Wang et.al. (2020) ovat tutkimuksessaan analysoineet näytteitä laajasti yhdyskunta-, maa- ja kalatalouden sekä eri teollisuudenalojen jätevesistä. Tekstiili- ja kemianteollisuuden lisäksi tutkimuksen kohteina olivat terästeollisuus sekä koneenrakennus- ja galvanointitoiminta, joiden purkuvesistä saadut tulokset on esitetty taulukossa 4. Mikro-  
muoveja todettiin kaikkien tutkimuskohteiden lähteissä jätevesissä eikä tilastollisesti merkitseviä eroja ollut havaittavissa eri teollisuudenalojen välillä. Runsaimmin näytteissä esiintyneet polymeerit olivat PE, PP ja PS.

Wang et.al. (2020) vertailivat mikromuovien esiintymistä eri päästölähteiden välillä ja huomasivat, että teollisuuden purkuvesistä otetuissa näytteissä oli enemmän pieniä alle 100 µm:n muovipartikkeleita verrattuna yhdyskunta-, maa- ja kalatalouden lähteviin jätevesiin. Franco et al. (2020) puolestaan ovat näytteenotto- ja esikäsittelyvaiheissa rajanneet suodattimilla pois partikkelit, joiden koko on < 100 µm. Tuloksista he kuitenkin toteavat, että suurin osa näytteissä esiintyneestä mikromuovista oli kooltaan alle 355 µm. Näin ollen huomattava osa mikromuovista on saattanut jäädä määrittelyn ulkopuolelle ja mahdollisesti taulukossa 4 esitetyt partikkelimäärät ovat todellisuutta alhaisempia.

#### **4.4 Kokonaiskuva ja menetelmien vaikutus tuloksiin**

Teollisuuden jätevesissä esiintyy merkittäviä määriä mikromuoveja teollisuudenalasta riippumatta. Edellä esiteltyjen tutkimusten tuloksista ei voida yksiselitteisesti osoittaa ilmiä eroja mikromuovien esiintyvyydessä eri teollisuudenalojen välillä, sillä määrittelyssä on käytetty erilaisia menetelmiä eikä tuloksia ole mahdollista vertailla luotettavasti. Useimmissa tutkimuksissa mikromuovien karakterisointiin on käytetty spektroskooppisia menetelmiä, joista suosituimmat ovat FTIR ja mikro-Raman-spektroskopia. Yhdessä tutkimuksessa oli käytetty termoanalyttistä DSC-menetelmää.

Teollisuuden jätevesissä yleisimmin esiintyvät polymeerit ovat kestopuoveihin kuuluvia valtamuoveja (kuva 1). Runsaimmin näytteissä esiintyneet polymeerit ovat PE ja PP, jotka ovat maailmanlaajuisesti eniten tuotettuja muoveja (Plastics Europe, 2023). Lisäksi usein havaittuja polymeerejä ovat PS sekä teknisiin muoveihin lukeutuvat PET ja PA. Spektroskooppisilla menetelmillä määritetyt mikromuovipitoisuudet vaihtelivat välillä 6–1280 kpl/l ja DSC-menetelmällä saadut massakonsentraatiot olivat 0,5–35,5 µg/l. Valtaosa havaituista muovipartikkeleista oli kooltaan pieniä alle 1 mm:n mikromuoveja. Teollisuuden jätevesivirtaukset ovat tyypillisesti tuhansia litroja vuorokaudessa, joten purkuvesien mukana ympäristöön päätyy huomattavia määriä pieniä mikromuoveja. Pienet partikkelit ovat ympäristössä ongelmallisimpia, sillä ne kulkeutuvat helposti ravintoketjuun.

Wang et al. (2020) olivat tutkimuksessaan vertailleet teollisuuden lähteviä jätevesiä yhdyskuntapuhdistamojen sekä maatalouden ja kalanviljelylaitosten lähteviin jätevesiin. Eri näytteenottokohteiden välillä ei todettu tilastollisesti merkitseviä eroja mikromuovien esiintymisessä tai polymeerityypeissä. Näytteenottokohteesta riippumatta runsaimmin näytteissä esiintyneet polymeerit olivat PE ja PP. PE-polymeerin esiintyvyydellä huomattiin olevan merkittävä korrelaatio mikromuovin kokonaismäärään, joten Wang et al. (2020) ehdottavat, että PE-polymeeri soveltuisi indikaattoriksi arvioitaessa mikromuovisaasteen määrää ympäristössä.

Määrittämis- ja näytteenottomenetelmien moninaisuus tekevät tutkimustulosten vertailusta hankalaa. Näytteiden esikäsittelyssä sovelletut menetelmät vaihtelevat ja analyysien lopputulokset ilmoitetaan eri yksiköissä riippuen määrittämisessä käytetystä tekniikasta. Näytteenotossa käytetyt menetelmät ovat monenkirjavia ja tutkimusartikkeleissa näytteenoton kuvaus on usein epätarkka tai puuttuu kokonaan. Esimerkiksi Wang et al. (2020) ovat artikkelissaan kuvanneet näytteenoton ainoastaan yhdellä lauseella, jossa kerrotaan puhtaisiin lasiastioihin otettujen näytteiden olleen tilavuudeltaan 2 litraa. Vastavasti toisessa tutkimuksessa jätevedenpuhdistamon työntekijä oli ottanut näytteen ja toimittanut sen tutkijoille (Xu et al., 2018). Edellä kuvatuissa tapauksissa näytteiden edustavuudesta ei ole mitään varmuutta eikä näytteenotto ole toistettavissa, koska toimenpiteiden täsmällinen kuvaus puuttuu. Myös valituilla esikäsittelymenetelmillä on merkitystä, sillä ne saattavat vaikuttaa partikkelien kokoon ja muotoon. Alkali- ja happokäsittelyjen on huomattu hajottavan muovipartikkeleita ja pilkkovan niitä pienemmiksi (Magalhães et al., 2022).

Lukuisat tutkijat ovat ottaneet kantaa menetelmästandardien puuttumiseen (Bitter and Lackner, 2020; Chan et al., 2021; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Löder and Gerdt, 2015) ja tarve analyysimenetelmien harmonisointiin on tunnustettu. International Organization for Standardization (ISO) on loppuvuodesta 2023 julkaissut mikromuovien analysointia koskevia menetelmästandardeja, joista standardi ISO 24187:2023 (ISO 24187:2023, 2023) määrittelee periaatteet mikromuovien analysointiin ympäristönäytteistä ja standardi ISO 4484-2:2023 (ISO 4484-2:2023, 2023) koskee tekstiiliperäisten mikromuovien analysointia eri aineista. Tästä huolimatta teollisuuden jätevedet pysyvät edelleen haastavina tutkimuskohteina, sillä jätevesien koostumus vaihtelee ja on riippuvainen tuotantoyksikön prosesseista ja tuotannossa käytetyistä aineista.

## 5. TEOLLISUUDEN MIKROMUOVIPÄÄSTÖT: NYKYHETKI JA TULEVAISUUS

Itävallassa Tonavan mikromuovikertymiä tutkineet Lechner et al. (2014) tulivat johtopäätökseen, että merkittävä määrä joen muovijätteestä on peräisin teollisuudesta. Hieman myöhemmin Lechner ja Ramler (2015) julkaisivat kommenttiartikkelin, jonka mukaan eräs iso kansainvälinen muoviteollisuuden toimija on myöntänyt olevansa ainakin osittain vastuussa Tonavan mikromuovijätteestä. Yritys painotti tiedotteessaan päästöjen olevan lain sallimissa rajoissa myös poikkeustilanteissa. Itävallan jätevesimääräyksissä muovi luokitellaan suodattuviin kiintoaineisiin, ja purkuvesi saa sisältää muovia 30 mg/l. Esimerkiksi jätevesivirtauksella 100 l/s muovia saa laillisesti laskea vesistöön 259,2 kg vuorokaudessa. (Lechner and Ramler, 2015) Puutteet lainsäädännössä eivät ole ongelma ainoastaan Itävallassa, vaan monissa pitkälle teollistuneissa maissa jätevesien muovipartikkelit ovat lainsäädännön näkökulmasta harmitonta kiintoainesta. (Franco et al., 2020; Lechner and Ramler, 2015)

Toisaalla muovi- ja polymeeriteollisuuden päästöjä tutkineet Deng et al. (2023a) nostavat esiin huolen petrokemianteollisuuden kasvavista tuotantomääristä ja sen mukana lisääntyvistä mikromuovipäästöistä. Maailmanlaajuinen pyrkimys pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä on johtanut siihen, että raakaöljyä käytetään yhä enenevässä määrin muovituotteiden valmistukseen. Tutkimuksensa perusteella Deng et al. (2023a) arvioivat, että maailmanlaajuisesti petrokemianteollisuuden jätevesien mukana ympäristöön päätyi yhteensä noin 1 440 000 miljardia mikromuovipartikkelia vuonna 2021. Muoveja valmistaville ja käsitteleville teollisuudenaloille olisi tarpeellista saada tutkimustietoon perustuvia raja-arvoja ja päästörajoituksia. Koska ongelma on maailmanlaajuinen, asiaa tulisi viedä eteenpäin kansainvälisten järjestöjen ja poliittisten toimielimien tasolla.

Nykyaikaisilla menetelmillä mikromuovit saadaan tehokkaasti poistettua jätevesistä (Murphy et al., 2016; Xu et al., 2018). Siitä huolimatta ympäristöön pääsee suuria määriä muovipartikkeleita silloinkin, kun prosessit toimivat normaalisti, mahdollisista häiriötilanteista puhumattakaan. Usein teollisuus- ja tuotantolaitosten purkuviemäreiden mikromuovipäästöjä ei kontrolloida joko ollenkaan tai monitorointiin käytetyt menetelmät ovat puutteellisia. Menetelmästandardeja on julkaistu vasta hiljattain eikä rutiiniseurantaan soveltuvia edullisia ja nopeita menetelmiä ole saatavilla. (Bitter and Lackner, 2020; Mallow et al., 2020) Spektroskooppisten menetelmien skaalaaminen jatkuvaan monitorointiin teollisuuden tarpeisiin on haastavaa. Raman- ja FTIR-laitteistot vaativat paljon pehrymistä ja vankkaa osaamista käyttäjiltään. Mikroskooppilaskenta on puolestaan

äärimmäisen työstä ja hidasta. Vaikka korkearesoluutioisella valomikroskoopilla olisi-kin mahdollista tehokkaasti monitoroida mikromuovien määrää, jää polymeerien karakterisointi tekemättä. (Chan et al., 2021) Termoaanalyttiset menetelmät soveltuvat paremmin jatkuvaan monitorointiin, mutta ne edellyttävät, että tuotantoprosessissa ei esiinny suurta vaihtelua materiaalien kemiallisessa koostumuksessa. Mallow et al. (2020) tarjoavat ratkaisuksi edullista ja nopeaa EA-OEM-menetelmää, jota käytetään energiajätelaitoksilla jätteen muovipitoisuuden määrittämiseen. Tämäkään menetelmä ei sovellu tuntemattomille näytteille, vaan jäteveden polymeerikoostumuksen tulee olla tiedossa. Mallow et al. (2020) saivat lupaavia tuloksia tutkimuksessaan, jossa selvitettiin EA-OEM menetelmän käyttökelpoisuutta PE ja PP polymeerien määrittämiseen teollisuuden jätevedestä.

Yksittäisten teollisuuslaitosten omat jätevedenpuhdistamot ovat näytteenoton kannalta haastavia kohteita, sillä yritykset eivät yleensä ole halukkaita päästämään ulkopuolisia tiloihinsa kielteisen julkisuuden pelossa (Bitter and Lackner, 2020). Teollisuuden jätevesien koostumus vaihtelee johtuen muun muassa tuotannon vaihteluista ja tuotantolinjojen huollosta. Yritykset saattavat laskelmoida sopivaa näytteenottohetkeä tai tehdä muita toimia päästöarvojen kaunistelemiseksi. Esimerkiksi Bitter ja Lackner (2020) huomasivat polymeerituotantolaitokselta otettujen näytteiden tuloksista, että polymeerien massakonsentraatiot pienenivät aikaa myöten selvästi. He arvelivat tämän johtuvan siitä, että laitoksen työntekijät tulivat tietoisiksi lähestyvistä näytteenotosta ja ryhtyivät toimenpiteisiin rajoittaakseen muovipartikkeleiden pääsyä jäteveeseen. Teollisuuden toimijat kuitenkin hyötyisivät monitorointimenetelmien kehittämisestä yhteistyössä tutkijoiden kanssa. Etenkin tekstiiliteollisuudella on suuret paineet kehittää tuotantoaan ympäristöystävällisemmäksi (Chan et al., 2021).

Tutkimuksia teollisuuden jätevesien parissa on ehdottoman tarpeellista jatkaa. Nykyaikaiset jätevedenpuhdistusmenetelmät ovat tehokkaita, mutta prosesseja ei ole suunniteltu nimenomaisesti muovipartikkelien poistoon. Olisi tärkeää selvittää, miten prosesseja saadaan tehostettu ja minkälaisilla menetelmillä mikromuovit saadaan tehokkaimmin poistettua jätevesistä. Lupaavia tuloksia on saatu esimerkiksi membraanibioreaktorrilla, jossa aktiivilieteprosessiin on yhdistetty kalvosuodatus (Talvitie et al., 2017).

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Teollisuuden jätevedet mahdollisena mikromuovien päästölähteenä ovat melko tuore tutkimusalue, joka on noussut tutkijoiden kiinnostuksen kohteeksi viime vuosien aikana. Artikkeleita ei vielä ole saatavilla yhtä kattavasti kuin yhdyskuntajätevesistä, mutta tutkimuksia on tehty jo useilla eri teollisuudenaloilla. Tämän työn tavoitteena oli koota tutkimustietoa mikromuovien esiintymisestä eri teollisuudenalojen jätevesissä ja arvioida teollisuuden jätevesiä mahdollisena mikromuovien päästölähteenä.

Tässä työssä koostettujen tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että teollisuuden purkuviemäreistä pääsee huomattavia määriä mikromuoveja vesistöihin myös silloin, kun puhdistusprosessit toimivat tehokkaasti ja häiriöttömästi. Menetelmästandardien puuttuessa näytteenotossa, esikäsittelyssä ja mikromuovien määrittämisessä käytetyt menetelmät vaihtelevat, joten tutkimusten tuloksia ei ole mahdollista vertailla luotettavasti. Siten ei voida osoittaa ilmiselviä eroja mikromuovien määrässä tai polymeerityypeissä eri teollisuudenalojen välillä.

Tutkimuksissa todettu mikromuovien määrä vaihteli välillä 6–1280 kpl/l tai 0,5–35,5 µg/l. Kaikilla teollisuudenaloilla valtaosa havaituista muovipartikkeleista oli kooltaan pieniä alle 1 mm:n mikromuoveja. Teollisuuden jätevesissä runsaimmin esiintyvät polymeerit ovat PE ja PP, jotka ovat maailmanlaajuisesti eniten valmistettuja ja käytettyjä valta-  
muoveja. PE:n esiintyvyydellä on todettu olevan merkittävä korrelaatio mikromuovien kokonaismäärään, joten PE-polymeeriä olisi mahdollista hyödyntää indikaattorina mikromuovipäästöjen seurannassa. Tekstiiliteollisuuden osalta oli todettavissa, että jätevesien polymeerikoostumus vastaa tuotantoprosessissa käytettyjä materiaaleja. Lisäksi mikro-  
kuitujen kokonaismäärän ja jätevesinäytteen kiintoainepitoisuuden välillä havaittiin selkeä korrelaatio. Havainnot ovat todennäköisesti sovellettavissa myös muille teollisuudenaloille, ja niitä voidaan hyödyntää jäteveden laadun tarkkailussa.

Lainsäädännössä on aukkoja eivätkä säädökset tunnista jätevesien mikromuoveja ympäristöongelmaksi, vaikka niiden haittavaikutuksista on puhuttu jo pitkään. Teollisuuden mikromuovipäästöjen seuranta on puutteellista tai siihen soveltuvat menetelmät puuttuvat kokonaan. Teollisuuden jätevedet ovat merkittävä mikromuovien päästölähde, joten tarvitaan lisää tutkimusta ja aktiivista työskentelyä puhdistusprosessien tehostamiseksi ja päästöjen vähentämiseksi.

## LÄHTEET

Akyildiz, S.H., Bellopede, R., Sezgin, H., Yalcin-Enis, I., Yalcin, B., Fiore, S., 2022 Detection and Analysis of Microfibers and Microplastics in Wastewater from a Textile Company. *Microplastics* 1, 572–586. <https://doi.org/10.3390/microplastics1040040>

Araujo, C.F., Nolasco, M.M., Ribeiro, A.M.P., Ribeiro-Claro, P.J.A., 2018. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Res.* 142, 426–440. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.060>

Bitter, H., Lackner, S., 2020. First quantification of semi-crystalline microplastics in industrial wastewaters. *Chemosphere* 258, 127388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127388>

Cantor, K.M., Watts, P., 2011. *Plastics Materials*, in: Kutz, M. (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing and Materials*, Plastics Design Library. Elsevier, Binghamton.

Chan, C.K.M., Park, C., Chan, K.M., Mak, D.C.W., Fang, J.K.H., Mitrano, D.M., 2021. Microplastic fibre releases from industrial wastewater effluent: a textile wet-processing mill in China. *Environ. Chem.* 18, 93–100. <https://doi.org/10.1071/EN20143>

Coleman, E.A., 2011. *Plastics Additives*, in: Kutz, M. (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing and Materials*, Plastics Design Library. Elsevier, Binghamton.

Crawford, C.B., Quinn, B., 2017. *Microplastic pollutants*. Elsevier, Amsterdam.

De Falco, F., Gullo, M.P., Gentile, G., Di Pace, E., Cocca, M., Gelabert, L., Brouta-Agnésa, M., Rovira, A., Escudero, R., Villalba, R., Mossotti, R., Montarsolo, A., Gavignano, S., Tonin, C., Avella, M., 2018. Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics. *Environ. Pollut.* 236, 916–925. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.057>

Deng, L., Xi, H., Wan, C., Fu, L., Wang, Y., Wu, C., 2023a. Is the petrochemical industry an overlooked critical source of environmental microplastics? *J. Hazard. Mater.* 451, 131199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131199>

Deng, L., Yuan, Y., Xi, H., Wan, C., Yu, Y., Wu, C., 2023b. The destiny of microplastics in one typical petrochemical wastewater treatment plant. *Sci. Total Environ.* 896, 165274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165274>

European Chemicals Agency, n.d. Microplastics [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics> (accessed 7.13.23).

Feldman, D., 2008. Polymer History. *Des. Monomers Polym.* 11, 1–15. <https://doi.org/10.1163/156855508X292383>

Fjäder, P., Korkalainen, M., Kauppi, S., Lehtiniemi, M., Salminen, J., Selonen, S., Setälä, O., Sillanpää, M., Sorvari, J., Suikkanen, S., Talvitie, J., Turunen, T., Virkkunen, H., Ala-Ketola, U., 2022. Muovien haitalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset (No. 17), Suomen ympäristökeskuksen raportteja. Suomen ympäristökeskus.

Franco, A.A., Arellano, J.M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Zahedi, S., Quiroga, J.M., Coello, M.D., 2020. Mapping microplastics in Cadiz (Spain): Occurrence of microplastics in municipal and industrial wastewaters. *J. Water Process Eng.* 38, 101596. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101596>

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., Thiel, M., 2012. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>

ISO 4484-2:2023, 2023. Textiles and textile products — Microplastics from textile sources Part 2: Qualitative and quantitative analysis of microplastics.

ISO 24187:2023, 2023. Principles for the analysis of microplastics present in the environment.

Järvinen, P., 2017. Muovit ja muovituotteiden valmistus. Muovifakta Oy, Söderkulla.

Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K.-J., Voit, B., 2016. Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Anal. Bioanal. Chem.* 408, 8377–8391. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9956-3>

Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Glas, M., Schludermann, E., 2014. The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbered fish larvae in Europe's second largest river. *Environ. Pollut.* 188, 177–181. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>

Lechner, A., Ramler, D., 2015. The discharge of certain amounts of industrial microplastic from a production plant into the River Danube is permitted by the Austrian legislation. *Environ. Pollut.* 200, 159–160. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.019>

Leusch, F.D.L., Lu, H.-C., Perera, K., Neale, P.A., Ziajahromi, S., 2023. Analysis of the literature shows a remarkably consistent relationship between size and abundance of

microplastics across different environmental matrices. *Environ. Pollut.* 319, 120984. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120984>

Löder, M.G.J., Gerdt, G., 2015. Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal, in: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, Cham, pp. 201–227. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8)

Löder, M.G.J., Kuczera, M., Mintenig, S., Lorenz, C., Gerdt, G., Löder, M.G.J., Kuczera, M., Mintenig, S., Lorenz, C., Gerdt, G., 2015. Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples. *Environ. Chem.* 12, 563–581. <https://doi.org/10.1071/EN14205>

Magalhães, S., Alves, L., Romano, A., Medronho, B., Rasteiro, M. da G., 2022. Extraction and Characterization of Microplastics from Portuguese Industrial Effluents. *Polymers* 14. <https://doi.org/10.3390/polym14142902>

Mallow, O., Spacek, S., Schwarzböck, T., Fellner, J., Rechberger, H., 2020. A new thermoanalytical method for the quantification of microplastics in industrial wastewater. *Environ. Pollut.* 259, 113862. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113862>

Millet, H., Vangheluwe, P., Block, C., Sevenster, A., Garcia, L., Antonopoulos, R., 2019. The Nature of Plastics and Their Societal Usage, in: Hester, R.E., Harrison, R.M. (Eds.), *Plastics and the Environment, Issues in Environmental Science and Technology*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

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. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>

Obbard, R.W., Sadri, S., Wong, Y.Q., Khitun, A.A., Baker, I., Thompson, R.C., 2014. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earths Future* 2, 315–320. <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Plastics Europe, 2023. *Plastics – the fast Facts 2023* (pdf-dokumentti).

Prata, J.C., da Costa, J.P., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T., 2019. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends Anal. Chem.* 110, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>

Seppälä, J., 2008. *Polymeeriteknologian perusteet*, 6. p. ed, Otatieto. Otatieto, Helsinki.

SFS-EN ISO 472, 2013. *Plastics. Vocabulary*. Suomen standardisoimisliitto.

- Shim, W.J., Hong, S.H., Eo, S.E., 2017. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Anal. Methods* 9, 1384–1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>
- Shrivastava, A., 2018. Introduction to plastics engineering, *Plastics Design Library*. William Andrew, an imprint of Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- Strungaru, S.-A., Jijie, R., Nicoara, M., Plavan, G., Faggio, C., 2019. Micro- (nano) plastics in freshwater ecosystems: Abundance, toxicological impact and quantification methodology. *TrAC Trends Anal. Chem.* 110, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.025>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Textile Exchange, 2022. Preferred Fiber and Materials Market Report 2022 (pdf-dokumentti), *Materials Market Report*.
- Thompson, R.C., Napper, I.E., 2019. Microplastics in the Environment, in: Hester, R.E., Harrison, R.M. (Eds.), *Plastics and the Environment, Issues in Environmental Science and Technology*. Royal Society of Chemistry, London, UK.
- Tirkey, A., Upadhyay, L.S.B., 2021. Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Mar. Pollut. Bull.* 170, 112604. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112604>
- Vandenabeele, P., Ando, D.J., 2013. *Practical Raman Spectroscopy: An Introduction*. John Wiley & Sons, Incorporated, Hoboken, UNITED KINGDOM.
- Wang, F., Wang, B., Duan, L., Zhang, Y., Zhou, Y., Sui, Q., Xu, D., Qu, H., Yu, G., 2020. Occurrence and distribution of microplastics in domestic, industrial, agricultural and aquacultural wastewater sources: A case study in Changzhou, China. *Water Res.* 182, 115956. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115956>
- Xu, S., Ma, J., Ji, R., Pan, K., Miao, A.-J., 2020. Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects. *Sci. Total Environ.* 703, 134699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134699>
- Xu, X., Hou, Q., Xue, Y., Jian, Y., Wang, L., 2018. Pollution characteristics and fate of microfibers in the wastewater from textile dyeing wastewater treatment plant. *Water Sci. Technol.* 78, 2046–2054. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.476>

Zhang, K., Su, J., Xiong, X., Wu, X., Wu, C., Liu, J., 2016. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China. *Environ. Pollut.* 219, 450–455. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.048>

## LIITE A: MUOVIEEN LYHENTEET

ABS	akrylinitriilibutadieenistyreeni
ASA	akrylinitriilibutadieeniakryyliesteri
EAA	eteeniakryylihapo
LCP	Liquid Crystal Polymer, nestekidemuovi
HDPE	suurtiheyspolyeteeni
LDPE	pieniheyspolyeteeni
PA	polyamidi
PAN	polyakrylinitriili, akrylikuitu
PBT	polybuteenitereftalaatti
PC	polykarbonaatti
PCT	polysykloheksyleenidimetyleenitereftalaatti
PE	polyeteeni
PEEK	polyeetterieetteriketoni
PET	polyteenitereftalaatti, polyesterikuitu
PEVA	polyetyleenivinyyliasetaatti
PI	polyimidi
PMMA	polymetyylimetakrylaatti
POM	polyoksimeteeni
PP	polypropeeni
PPS	polyfenyleenisulfidi
PS	polystyreeni
PSU	polysulfoni
PESU	polyeetterisulfoni
PVC	polyvinyylikloridi
SAN	styreeniakrylinitriili