Muovin kierrättämisen mikro- ja nanomuovipäästöt

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintutkielma

Kemiantekniikka

2024

Veeti Kärkkäinen

Tarkastaja: FT Mirka Viitala

Tiivistelmä

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Veeti Kärkkäinen

Muovinkierrätyksen mikro- ja nanomuovipäästöt

Kemiantekniikan kandidaatintyö

38 Sivua, 5 Kuvaa, 1 Taulukko ja 1 Liite

Tarkastaja: FT Mirka Viitala

Avainsanat: Muovinkierrätys, mikromuovi, nanomuovi, mikromuovipäästöt ja nanomuovipäästöt

Maailmassa kulutetaan paljon muovia ja elinkaarensa päässä siitä kaikesta tulee lopulta jätettä. Muovin kierrättäminen on toistaiseksi maailmanlaajuisella tasolla hyvin vähäistä. Muovin kulutuksen on arvioitu kuitenkin lisääntyvän ja samalla kierrätysmäärien kasvavan. Muovin kierrättämiseen liittyy kuitenkin ongelma, sillä muovin kierrätyksestä voi aiheutua mikro- ja nanomuovipäästöjä. Tällaiset päästöt ovat hankalia, sillä niiden poistaminen ympäristöstä on hyvin vaikeaa ja ne voivat olla eliöille haitallisia.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää yleisellä tasolla minkälaisia paikallisia tai globaaleja mikro- ja nanomuovipäästöjä muovin kierrättäminen aiheuttaa. Samalla tutustutaan pääpiirteittäin erilaisiin muovinkierrätysmenetelmiin. Lisäksi pohditaan erilaisia keinoja muovinkierrätyksestä aiheutuvien mikro- ja nanomuovipäästöjen vähentämiseksi.

Työssä löydettiin jatkotutkimustarpeita muovin kierrättämisen todellisista muovipartikkelipäästöistä. Havaittiin myös muovinkierrätyksen aiheuttavan aina pieniä muovipartikkeleita. Ratkaisun tulee löytyä keinoista estää muovipartikkeleita kulkeutumasta kierrätyslaitoksilta ympäristöön. Samalla löydettiin potentiaalisia ratkaisuja kierrätyslaitosten muovipäästöjen ehkäisyyn, kuten vesikierron sulkeminen tai veden käsittely membraanibioreaktorilla.

Tiivistelmä

1 Johdanto 5
2 Mikro- ja nanomuovit 6
2.1 Mikro- ja nanomuovien haitat 6
3 Muovin kierrätysmenetelmät 8
3.1 Muovien luokittelu 8
3.1.1 Kestomuovit 10
3.1.2 Kertamuovit 11
3.2 Muovin mekaaninen kierrättäminen 11
3.2.1 Lajittelu 12
3.2.2 Peseminen 13
3.2.3 Kuivaus 13
3.2.4 Repiminen ja silppuaminen 13
3.2.5 Erottelu 14
3.2.6 Granulointi/Pelletöinti 14
3.3 Muovien kemiallinen kierrättäminen 14
3.3.1 Depolymerisaatio 16
3.3.2 Pyrolyysi 17
3.3.3 Kaasutus 17
3.3.4 Vetykrakkaus 17
3.3.5 Liuotus 17
3.3.6 Orgaaniset kierrätysmenetelmät 18
3.3.7 Polttaminen energiaksi 18
4 Muovin kierrätyksen muovipartikkeli lähteet 19
4.1 Mikro- ja nanomuovien reitit ympäristöön 19
4.2 Muovien pesemisen ja flotaation aiheuttamat muovipäästöt 21
4.3 Muovin silppuaminen ja repiminen 21
4.4 Muut mahdolliset päästöjen lähteet 21
5 Ratkaisuja kierrätyksen aiheuttamiin muovipäästöihin 24
5.1 Kemiallisten kierrätysmenetelmien käyttäminen 25
5.2 Päästöt ilmateitse 25
5.3 Pesuvesien käsittely ja suodattaminen 26

5.3.1 Pesuvesien suodatus membraanibioreaktorilla 26
5.3.2 Suljettu vesikierto 27
5.3.3 Muita menetelmiä päästöjen hillintään 28
5.3.4 Vedenpuhdistusmenetelmien vertailua 28
6 Johtopäätökset 31
Lähteet 33
Liitteet 37

1 Johdanto

Nykyään ihmiskunta elää maailmassa, jossa kulutetaan paljon muovia tuotteiden ja pakkausten muodossa. Tällaisesta toiminnasta syntyy paljon jätteitä, jotka voivat olla haitallisia ympäristölle ja eliöille. Muovijäte ei yleensä koostu vain yhdestä tietystä muovilaadusta, vaan se voi sisältää useampia eri laatuja. Usein jätteen seassa voi olla myös monia muitakin aineita muovien lisäksi. Muovin oikeanlaisella kierrättämisellä on merkitystä ympäristön lisäksi myös mahdollisen uusiomuovin laatuun.

Muoveja käytetään paljon, ja vuonna 2019 maailmanlaajuisen muovintuotannon arvioitiin olleen noin 460 miljoonaa tonnia (Mt), tästä määrästä jätteeksi on arvioitu päätyneen noin 353 Mt (OECD, 2022a). Suuresta ja kiihtyvästä tuotantomäärästä huolimatta kierrätys on ollut vähäistä jääden maailmanlaajuisesti noin 9 % muovijätteen kokonaismäärästä valtaosan muoveista päätyessä yhä kaatopaikalle tai poltettavaksi energiantuotantoon. OECD (2022b) arvioi, että vuoteen 2060 mennessä muovijätteen määrä liki kolminkertaistuisi kierrätyslukujen noustessa nykyisestä 9 % tasosta vain noin 17 % tasolle. Muovin kulutuksen kasvaessa ja globaalisti alhaisella kierrätysprosentilla on syytä panostaa kierrätykseen, sekä kehittää kierrätysjärjestelmiä. Kierrätettävän muovin määrän kasvaessa on kuitenkin huomioitava myös itse kierrätysprosessin aiheuttamat mikro- ja nanomuovipäästöt. Tämä on erityisen tärkeää, sillä mikro- ja nanomuovien kerääminen ympäristöstä on hyvin hankalaa ellei jopa mahdotonta. Viime vuosikymmeninä ihmiskunta on kuitenkin havahtunut kierrättämisen tärkeyteen ja täten jätemuovia on alettu uusiokäyttää aiempaa enemmän, mutta ei riittävästi. Muovin kierrätykseen liittyy kuitenkin mahdollisia haittavaikutuksia, jos kierrätyksen seurauksena syntyy mikro- ja nanomuovipäästöjä. Tällaisia pieniä partikkeleita irtoaa muovista kulumisen ja ulkoisen rasituksen seurauksena. Tässä tutkielmassa muovin matkaa tarkastellaan sen saapumisesta kierrätykseen aina siihen saakka, kunnes kierrätetty muovi tai sen jatkojaloste poistuu uudelleenkäytettäväksi. Työn perimmäinen tarkoitus on vastata kysymyksiin siitä, minkälaisia muovipäästöjä erilaiset kierrätysmenetelmät aiheuttavat, miten päästöjä voidaan vähentää, sekä ovatko jotkin menetelmät toisia parempia muovipäästöjen vähentämisessä tai välttämisessä. Samalla tutustutaan muovin mekaaniseen ja kemialliseen kierrättämiseen sekä niiden erilaisiin vaiheisiin.

2 Mikro- ja nanomuovit

Mikro- ja nanomuovit ovat nimensä mukaisesti pieniä muovipartikkeleita, jotka syntyvät muovin kuluessa tai vaihtoehtoisesti niitä voidaan valmistaa tarkoituksella. Tässä työssä keskitytään kuitenkin muovin kierrätyksessä tahattomasti syntyviin muovipartikkeleihin. Mikromuoviksi luokitellaan sellainen muovipartikkeli, joka on suurimmalta dimensioltaan 1 µm – 5 mm, nanomuovi on taas sellainen partikkeli, jonka suurin dimensio on maksimissaan 1µm (Crawford & Quinn, 2016). Mikro- sekä nanomuoveja vapautuu jatkuvasti muovisista esineistä ja pakkauksista. Kun muovipartikkelit irtautuvat alkuperäisestä lähteestä, ne kulkeutuvat ympäristöön ja eliöihin. Kaikesta huolimatta mikro- ja nanomuovien pitkäaikaisista vaikutuksista eliöihin ei vielä tiedetä riittävästi ja täten lisää tutkimuksia tarvitaan mahdollisten haittojen kartoittamiseksi. Nanomuoveista tiedetään vielä mikromuovejakin vähemmän, sillä niiden analysoiminen pienen koon vuoksi on vaikeaa.

2.1 Mikro- ja nanomuovien haitat

Mikro- ja nanomuoveja on löydetty liki jokaisesta maailmankolkasta, sekä jopa ihmisen verenkierrosta. Ihmisillä on havaittu tutkimuksissa terveen testiryhmän veren sisältävän muovia keskimäärin noin 1.6 µg/ml. (Lamoree, et al., 2022) Muovipartikkeleiden aiheuttamia potentiaalisia uhkia voivat olla esimerkiksi niiden mukanaan kuljettamat kemikaalit. Yksi tällainen kemikaali on Bisfenoli A (BPA), jota käytetään esimerkiksi polykarbonaatin ja epoksihartsin tuotannossa (Galloway, 2015). BPA:ta esiintyy myös vapaana monomeerina esimerkiksi lämpöpapereissa ja kuiteissa. Koska BPA on niin sanottu hormonihäirikkö, se voi käyttäytyä hormonin tavoin ja aiheuttaa häiriöitä eliöissä. Seeprakaloilla tehdyissä kokeissa BPA:n on havaittu heikentävän kalojen lisääntymiskykyä (Wei, et al., 2023). Muita potentiaalisia muovien aiheuttamia haittoja voi syntyä esimerkiksi muovien sisältämistä ftalaateista. Vaikka täyttä käsitystä muovien pitkäaikaisesta haitasta eliöille ei ole, muoveille altistuminen ei todennäköisesti ole hyväksi. Rottakokeissa on havaittu lisääntymiskyvyn heikkenemistä niillä rotilla, joille on syötetty polystyreeniä (PS). Myös ihmisillä on havaittu viitteitä mahdollisista mikro- ja nanomuovien haitoista, esimerkiksi miesten sukusolujen

laatu on heikentynyt vuosien saatossa merkittävästi. (Bainbridge, et al., 2024) Tämä ei ole yllättävää sillä myös mieshormonien tasot ovat laskeneet ajan saatossa merkittävästi. Huomioiden rotilla suoritetut kokeet, laskeneet mieshormonitasot, sekä muovin käytön lisääntymisen esimerkiksi elintarvikkeiden pakkauksissa viimeisen vuosisadan aikana, voidaan olettaa mikro- ja nanomuovien olevan mahdollinen osasyyllinen tähän kehitykseen. Tulee kuitenkin huomioida, että samalla aikajänteellä moni muukin asia ihmisten toiminnassa ja elintavoissa on muuttunut.

Mikro- ja nanomuoveista ongelmallisia tekee niiden pieni koko ja suuri määrä. Mikro- ja nanomuovien määrä kasvaa mitä pienempiä partikkeleita tarkastellaan. Kallavedellä Kuopiossa Uurasjärvi et al, (2019) suorittamissa pintavesitutkimuksissa havaittiin, että mittauspaikasta riippuen yli 300 μm partikkeleita (1.8 ± 2.3 MP/m3) oli vähemmän kuin 100–300 μm partikkeleita (12 ± 17 MP/m3) tai merkittävästi vähemmän kuin 20–100 μm partikkeleita (155 ± 73 MP/m3). On kuitenkin huomioitava, että tutkimuksessa ei selvitetty nanomuovien määrää, sillä pienin tutkittu kokoluokka oli 20–100 μm. Havainnoista voidaan kuitenkin olettaa nanomuovien lukumäärän olevan suurempi kuin pienten mikromuovien.

3 Muovin kierrätysmenetelmät

Muoveja on olemassa monenlaisia ja kierrätykseen saapuvat jätteet ovat usein sekoitus eri muovilajikkeita. Kaikkia muoveja ei kuitenkaan voi sekoittaa keskenään, sillä kierrätysprosessissa eri muovilajien sekoittaminen voi aiheuttaa ei haluttuja ominaisuuksia tuotteille. Tämän vuoksi muovilajikkeet on lajiteltava ennen jatkokäsittelyä. Muovin kierrättäminen on prosessi, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi mekaanisesti, kemiallisesti ja termisesti. (Ragaert, et al., 2017& Al-Salem, et al., 2009.) Muovin kierrätyksenä voidaan pitää myös sen polttamista energiaksi. Energiaksi polttaminen on terminen menetelmä ja sitä käsitellään kemiallisten menetelmien yhteydessä lyhyesti. Muovin kierrättämisen menetelmät ja vaiheet riippuvat kuitenkin pitkälti siitä, mikä muovilaji on kyseessä ja mitä siitä halutaan jatkossa tehdä. Pääasiassa kierrätettäväksi kelpaavat muovit ovat kestomuoveja eli termoplastisia muoveja. Muovin kierrättäminen ja siihen käytetyt menetelmät vaihtelevat laajalti ympäri maailman.

3.1 Muovien luokittelu

Muovin kierrätyksen katsotaan tässä työssä alkavan jätemuovin saapumisesta jälleenkäsittelylaitokselle. Muovin kierrätyksessä on tärkeää huomioida uusiomuovin kestävyys, sekä sille ja sen ominaisuuksille kulloinkin asetetut vaatimukset. Haluttujen ominaisuuksien takaamiseksi on olennaista, että kulloinkin käsittelyssä oleva muovivirta on homogeeninen, eli se sisältää vain tiettyä muovilaatua (Al-Salem, et al., 2009). Jos käsittelyyn päätyvä muovivirta koostuu eri muovilajikkeista ja on täten heterogeeninen, voi tuotteesta tulla huonolaatuista kestävyyden kannalta tai se voi olla jopa sopimatonta käytettäväksi esimerkiksi elintarvikepakkauksissa. Kemialliset menetelmät eivät yleensä vaadi yhtä homogeenistä muovivirtaa kuin mekaaniset menetelmät (Ragaert, et al., 2017). Mahdolliset muovien kierrättämiseen käytetyt menetelmät riippuvat pitkälti kyseessä olevasta muovilajista.

Muovit voidaan jakaa kierrättämistä varten seitsemään kategoriaan. Kunkin kategorian kierrättämiseen käytetyt menetelmät voivat vaihdella keskenään ja joidenkin kierrättäminen voi olla ongelmallista tai sitä ei edes tehdä. Kategorioista ensimmäisenä on polyeteenitereftalaatista (PET) valmistetut muovit, jotka ovat kestomuoveja. PET-muoveja käytetään usein

pakkausmateriaaleina, kuten virvoitusjuomapulloissa. Toisena kategoriana on korkeatiheyksinen polyetyleeni (HDPE tai PE-HD). HDPE-muovit ovat kovia ja kestäviä, sekä niitä voidaan käyttää elintarvikekäytössä. Kolmantena on polyvinyylikloridi (PVC). PVC-tuotteet ovat yleisiä rakennusmateriaaleja (Muoviteollisuus ry, 2024). PVC:n energiaksi polttamisessa voi myös syntyä vetykloridia (HCl), joka on haitallinen sivutuote. Mahdolliset HCl-päästöt ympäristöön riippuvat polttolaitoksesta (La Mantia, 1996). Neljäntenä on matalatiheyksinen polyetyleeni (LDPE tai PE-LD). LDPE on yleisesti käytetty muovi ja sen käyttökohteita ovat esimerkiksi elintarvikepakkaukset. Koska LDPE muovien käyttäminen pakkausmateriaaleina on laajaa, se on yleinen ympäristön muovikuormituksen aiheuttaja. Viidentenä kategoriassa on polypropeeni (PP). Polypropeeni sietää hyvin kemikaaleja ja on monikäyttöinen muovi kestävyytensä takia (Remeo, 2024). Kuudentena kategoriana on polystyreeni (PS), jota käytetään usein pakkausmateriaalina ja esimerkiksi kertakäyttöastioissa. Polystyreenit voidaan lajitella vielä alaluokkiin erilaisten ominaisuuksien perusteella. Yleisesti pakkausmateriaalina ja eristeenä käytetty styrox on esimerkki polystyreenistä. Muut muovit kuten esimerkiksi akryyli, nylon ja polykarbonaatti muodostavat seitsemännen kategorian (O), jolla tarkoitetaan kaikkia muihin kategorioihin kuulumattomia muoveja ja ne ovatkin usein kertamuoveja. (Muoviteollisuus ry, 2024) Kuvassa 1 on esitetty erilaiset muovilaadut, niiden ominaisuudet, sekä niiden yleisimpiä käyttökohteita ja kierrätysohjeita.

01 PET	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä	Virvoitusjuoma- ym. pullot, tekstiilit. Pullot voi palauttaa kauppojen automaatteihin.
02 PE-HD	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta	Mehupullot, ämpärit, virvoitusjuomakorit.
03 PVC	Erittäin moni-muotoinen ja -piirteinen	Putket, letkut, rakennusmateriaalit. PVC-muovia ei saa polttaa eikä laittaa muovinkeräykseen.
04 PE-LD	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta	Muovikassit, pussit, kalvot.
05 PP	Jäykkä, sitkeä, hyvin moni-käyttöinen	Narut, rasiat, tekniset osat, kalvot, pehmusteet.
06 PS	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)	Rasiat, purkit, pehmusteet, eristeet.
07 O	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät ja muut materiaalit	Soveltuvat vain laitosmaiseen polttoon, joten tämän merkin sisältävien tuotteiden soveltuminen muualle kuin sekajätteeseen pitää tarkistaa paikalliselta jätehuollolta.

Kuva 1. Erilaisten muovilaatujen ominaisuuksia, käyttökohteita ja kierrätysohjeita (Muoviteollisuus ry, 2024)

3.1.1 Kestomuovit

Kestomuoveja on mahdollista muotoilla uudestaan kierrätysprosessin jälkeen ilman kemiallista käsittelyä, eli ne eivät menetä ominaisuuksiaan prosessissa. Kestomuoveihin lukeutuvat esimerkiksi PVC, PS ja PET (Muoviteollisuus ry, 2024). Kaikkia muoveja ei kuitenkaan ole

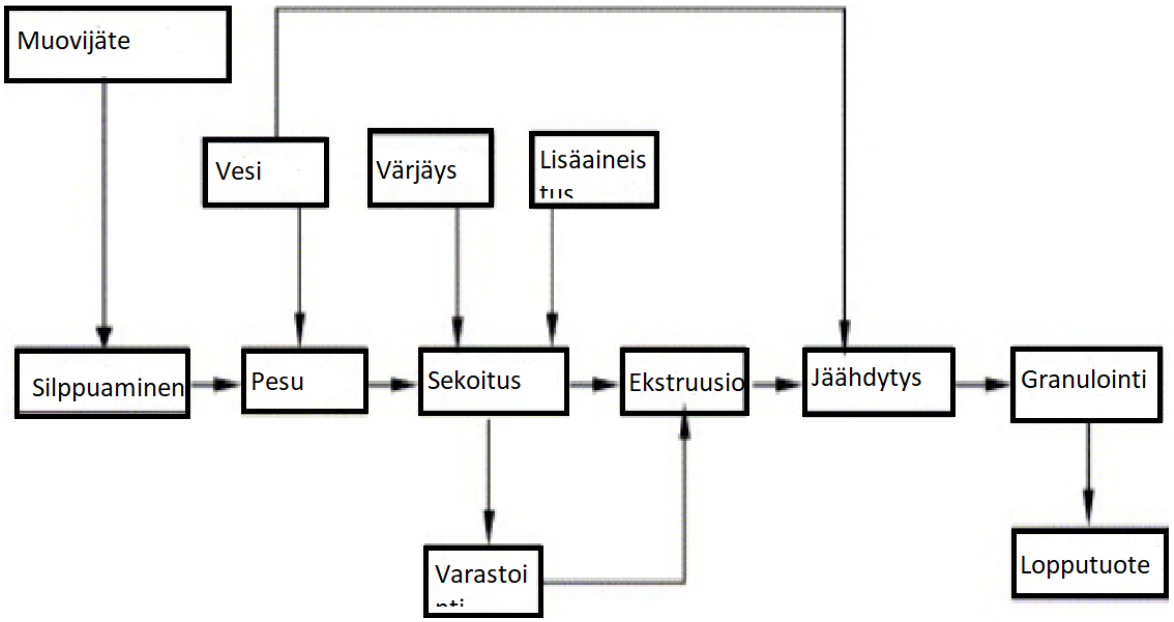
mahdollista kierrättää uusiomuoviksi ilman kemiallista käsittelyä. PVC:n kierrättäminen on taas usein ongelmallista sen sisältämän kloorin takia (La Mantia, 1996).

3.1.2 Kertamuovit

Muoveja jotka eivät ole muotoiltavissa uudelleen ilman kemiallisen rakenteen hajoamista kutsutaan kertamuoveiksi. Kertamuoveihin lukeutuu esimerkiksi polyuretaani (Muoviteollisuus ry, 2024). Kertamuovit, joita ei voi tai joita ei ole järkevää kierrättää, joutuvat usein kaatopaikalle tai vastaavasti ne poltetaan energiantuotantoa varten.

3.2 Muovin mekaaninen kierrättäminen

Muovin kierrätys tapahtuu pitkälti mekaanisesti, sillä myös kemialliset kierrätysmenetelmät vaativat mekaanisia esikäsittelyvaiheita. Ennen kemiallista käsittelyä muovin halutaan usein olevan puhdasta, lajiteltua ja silputtua tiettyyn raekokoon. Mekaanisella kierrättämisellä tarkoitetaan sellaisia kierrättämisen vaiheita kuten keräys, lajittelu, peseminen, kuivaus, silppuaminen ja granulointi. Todellisuudessa vaiheita on useampia ja muovit saatetaan pestä useampaan kertaan. Kuvassa 2 havainnollistetaan mekaanisen kierrätyksen vaiheita pääpiirteittäin. Mekaanisia kierrätysmenetelmiä käytetään laajalti, sillä ne ovat edullisempia kuin kemialliset menetelmät (Ragaert, et al., 2017). Mekaanisilla kierrätysmenetelmillä valmistetut uusiomuovit ovat usein kuitenkin rakenteellisesti heikompia kuin alkuperäinen suoraan öljystä tai kemiallisin menetelmin kierrätetystä muovista valmistettuina. Tällaisessa tapauksessa voi olla tarpeellista sekoittaa kierrätysmuovia ja uutta muovia keskenään ominaisuuksien säilymiseksi tai vaihtoehtoisesti lisätä siihen lisäaineita haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi (Manrich, et al., 2008). Mekaanisesti kierrätetystä muovista ei voida sellaisenaan valmistaa elintarvikepakkauksiin kelpaavaa materiaalia, sillä tuotteen puhtautta ei voida taata (Ragaert, et al., 2017).



Kuva 2. Mekaanisen kierrätysprosessin vaiheet pääpiirteittäin (Muokattu Aznar, et al., 2005).

3.2.1 Lajittelu

Saapuessaan jälleenkäsittelylaitokselle muovit lajitellaan. Lajittelussa erotellaan erilaiset muovilajikkeet toisistaan sekä poistetaan mahdolliset muut materiaalit. Lajittelu voidaan suorittaa käsin tai koneellisesti. Käsin lajittelussa koulutettu operaattori tunnistaa erilaiset muovilajikkeet ja erottelee ne. Koneelliseen lajitteluun voidaan käyttää esimerkiksi FT-NIR laitteistoa (Fourier Transformed Near Infrared). (Ragaert, et al., 2017& Al-Salem, et al., 2009). Lajittelun tarkoituksena on saada aikaan mahdollisimman homogeeninen muovivirta. Homogeeninen muovivirta on olennainen riittävän tuotelaadun varmistamiseksi etenkin, jos muovi aiotaan kierrättää vain mekaanisilla menetelmillä. Lajittelu ei kuulu varsinaisesti mekaanisiin kierrätysmenetelmiin, mutta se on esikäsittelymenetelmä ja muutenkin olennainen vaihe kokonaisuuden onnistumisen kannalta.

3.2.2 Peseminen

Muovien peseminen kuuluu kierrätysprosessin alkuvaiheeseen. Peseminen on tärkeää, sillä muovista halutaan poistaa kaikki ylimääräiset aineet, jotka voisivat myöhemmin kontaminoida muovia tai muutoin haitata prosessia. Pesuvaiheita voi olla useampia. Ensimmäisessä pesuvaiheessa jo hieman hienonnettu muovijäte pestään pyörivässä rumpupesurissa, jonka tarkoituksena on poistaa muovista sen mukana mahdollisesti tulevia metalleja, kemikaaleja tai muita epäorgaanisia materiaaleja (Ragaert, et al., 2017). Pyörivässä rumpupesurissa voidaan käyttää veden lisäksi pesuliuosta kemikaalien poistamiseen (Rotajet, 2024b). Tämän lisäksi pesua jatketaan kitkapesurilla, jonka tarkoituksena on poistaa muovin mukana vielä mahdollisesti kulkevat orgaaniset aineet kuten rasvahapot. Kitkapesurin toiminta on nimensä mukaista ja siinä pesuteho perustuu toisiaan vasten liukuviin kappaleisiin. Myös kitkapesurissa on mahdollista käyttää pesuliuoksia pesutuloksen tehostamiseksi. (Rotajet, 2024a)

3.2.3 Kuivaus

Erotellut muovijakeet kuivataan erottelun ja pesujen jälkeen. Kosteuden poistaminen on oleellista, sillä vesi voi häiritä prosessia ja heikentää myöhemmin tuotteen laatua. Kuivureiden avulla on mahdollista poistaa myös muoviin kertynyt pöly, joka voi mahdollisesti kontaminoida myöhempiä prosessivaiheita (Ragaert, et al., 2017 & B+B Anlagenbau, 2024).

3.2.4 Repiminen ja silppuaminen

Kun muovia saapuu kierrätyslaitokselle, siitä tehdään hienojakeisempaa eri vaiheissa. Silppuaminen ja repiminen ovat oleellisia osia kierrätysprosessia, sillä myöhemmät kierrätysvaiheet vaativat optimaaliseen toimintaan riittävän hienojakeista muovia. Ensin kierrätykseen saapunut muovi revitään noin nyrkin kokoisiksi palasiksi, jolloin muovista saadaan sopivan kokoista sen ensimmäistä pesukertaa varten. Myöhemmin muovi silputaan vieläkin pienemmäksi, jotta siitä saadaan sopivan kokoista erotteluprosesseja sekä myöhempää granulaattoria varten. Silppuamisen jälkeen muovipartikkelit ovat kooltaan 1–12 mm. (Ragaert, et al., 2017) Raekooltaan liian suuri muovi ei välttämättä ole sopivaa myöhempiä prosessivaiheita varten.

3.2.5 Erottelu

Jos kierrätykseen saapuva muovivirta ei ole tarpeeksi homogeenista, voidaan eri muovilajit erotella toisistaan tiheyksiin tai massaan perustuvien erotusmenetelmien avulla. Näitä ovat erilaiset flotaatiomenetelmät, joissa eri muovilajit erotellaan toisistaan tiheyserojen perusteella. Erotus tapahtuu sen mukaan, uppoavatko vai kelluvatko eri muovilaadut flotaatio altaissa. Flotaatiossa käytetään yleisimmin vettä. Flotaation avulla voidaan erotella muovit kahteen ryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat muovit, jotka kelluvat ja joiden tiheys on vettä pienempi, kuten PP ja PE. Toinen ryhmä on vettä tiheämpiä muoveja, kuten PET tai PS. Monilla muoveilla on kuitenkin suhteellisen samat tiheysominaisuudet, mikä aiheuttaa ongelmia erotuksessa. (Ragaert, et al., 2017) Muoveja voidaan erotella myös ilmavirran avulla kevyempiin ja raskaampiin jakeisiin. Kevyeen jakeeseen kulkeutuvat kevyemmät muovit, kuten LDPE ja osa PP:tä. Raskaaseen jakeeseen erottuu PP:tä ja HDPE:tä, sekä muita raskaampia muoveja (Ragaert, et al., 2017). Erotteluvaiheessa on myös mahdollista käyttää magneetteja siltä varalta, jos muovivirtaan on päätynyt metallisia materiaaleja.

3.2.6 Granulointi/Pelletöinti

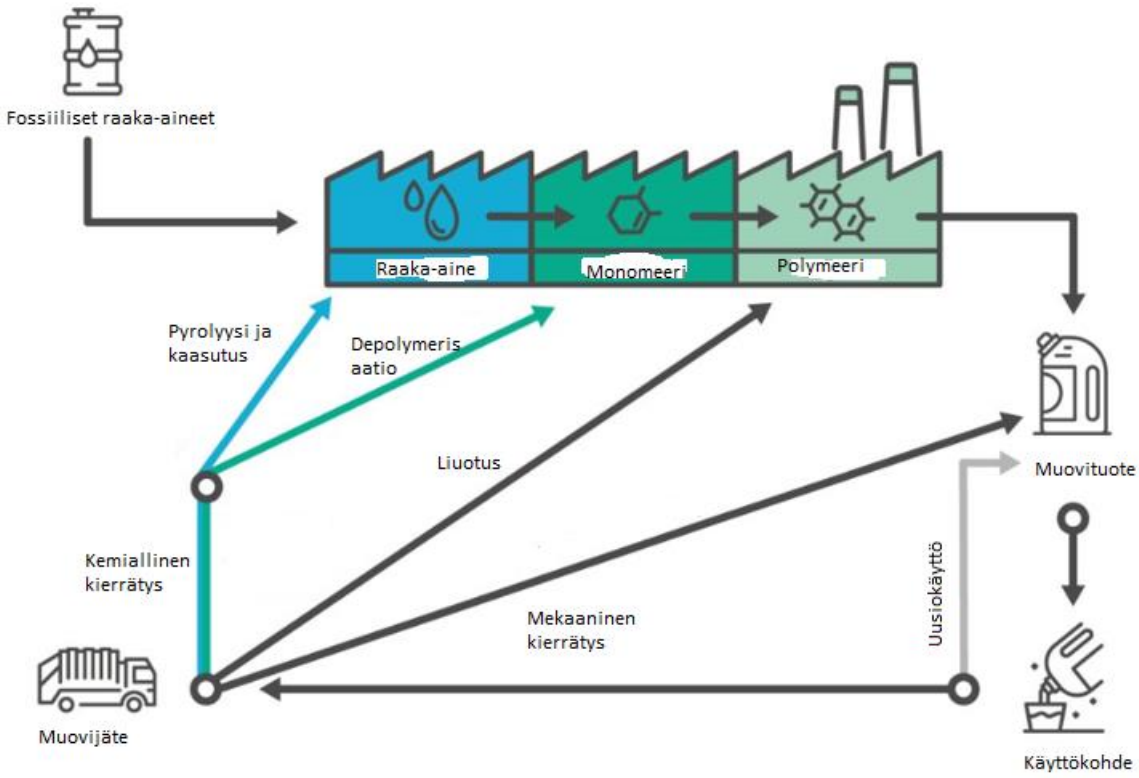
Granuloinnin tarkoituksena on tehdä muovista pieniä pellettejä, jotka toimivat raaka-aineena kiertomuovista valmistettaville tuotteille. Granuloinnissa käytetään sulasuodatus menetelmää. Sulasuodatuksessa käytetään suodatusverkkoja, joiden verkkokokoa muuttamalla granulaattori kykenee erottelemaan halutun kokoisia epäpuhtauksia sulasta muovimassasta ja täten tuottaa mahdollisimman puhtaita pellettejä. Sulasuodatuksen avulla tuotteen laatu paranee. (Ragaert, et al., 2017)

3.3 Muovien kemiallinen kierrättäminen

Toinen vaihtoehto muovin kierrättämiselle on kemiallinen kierrätys. Kemiallisilla menetelmillä tarkoitetaan sellaisia kierrätysmenetelmiä, joissa polymeerien kemiallisia rakenteita

muunnetaan lämmön ja kemikaalien avulla. Näin saadaan aikaiseksi joko monomeereja tai sellaisia neste- ja kaasumaisia aineita, joista muovia voidaan myöhemmin valmistaa. (Plastics Europe, 2024a) Kuvassa 3 havainnollistettuna eri kierrätysmenetelmien lopputuotteita. Kemiallisiin kierrätysmenetelmiin lasketaan tässä työssä kuitenkin myös sellaisia menetelmiä joissa polymeerien kemiallista rakennetta ei muokata, mutta ovat muutoin samankaltaisia. Tällaisia menetelmä on muun muassa liuotus (Plastics Europe, 2024b). Biohajoavien muovien kierrätystä kutsutaan nimellä orgaaninen kierrätys.

Muovien kemiallinen kierrättäminen on toistaiseksi kalliimpaa kuin mekaaninen kierrättäminen. Kemialliset menetelmät kykenevät kuitenkin usein tuottamaan laadullisesti parempia tuotteita. Kemialliset menetelmät toimivat mekaanisia menetelmiä paremmin, jos kyseessä ei ole täysin homogeeninen muovivirta. Tämä johtuu siitä, että kemiallisilla menetelmillä voidaan tuottaa fossiilisiin raaka-aineisiin verrattavia lähtöaineita, joista voidaan valmistaa erilaisia muoveja kuin mitä kierrätykseen tuotu muovi oli. Kemiallisilla menetelmillä voidaan tuottaa muovia, joka kelpaa elintarvikekäyttöön. Kemiallisiin menetelmiin voidaan lukea esimerkiksi depolymerisaatio, pyrolyysi, kaasutus, sekä hydrokrakkaus (Plastics Europe, 2024a). Kemiallisia kierrätysmenetelmiä on todellisuudessa enemmän, mutta ne toimivat jokseenkin samoilla perusperiaatteilla. Kemiallisissa menetelmissä on yleistä altistaa muovi lämmölle ja kemikaaleille. Menetelmissä voidaan tarvittaessa käyttää katalyyttejä tehostamaan prosesseja.



Kuva 3. Muovin kierrätysmenetelmät ja niissä muodostuvat lopputuotteet. (Muokattu Plastics Europe, 2024a). Varsinaiset kemialliset menetelmät on merkitty sinisellä ja vihreillä nuolilla.

3.3.1 Depolymerisaatio

Depolymerisaatiossa muovista eli pitkistä polymeeriketjuista muodostetaan monomeereja. Tätä varten muovia kuumennetaan ja altistetaan erilaisille kemikaaleille. Näin polymeeri hajoaa osiin joko monomeereiksi tai muutamasta monomeerista koostuvaksi oligomeeriksi. Kun muovin polymeerit ovat hajonneet pienempiin osiin, voidaan ne koota uudelleen uusiksi polymeereiksi. Depolymerisaatio käsittää useita menetelmiä riippuen käytetyistä kemikaaleista. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi metanolyysi, hydrolyysi, aminolyysi ja glykolyysi. (Ragaert, et al., 2017)

3.3.2 Pyrolyysi

Pyrolyysissa muovia kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa, jolloin se pilkkoutuu pienempiin osiin. Koska olosuhteet ovat hapettomia, muovi ei pääse palamaan. Näin muodostuu kaasumaisia sekä nestemäisiä polttoaineita. (Al Salem, et al., 2009) Näitä pyrolyysi tuotteita voidaan käyttää muovin valmistamiseen samanlaisilla keinoilla kuin valmistettaessa muovia suoraan öljystä. Tässä törmätään kuitenkin yleiseen ongelmaan kemiallisissa kierrätysmenetelmissä, joka on kallis hinta verrattuna muovin valmistamiseen suoraan öljystä. Suurempien kustannusten vuoksi kemialliset menetelmät eivät ole yhtä laajasti käytettyjä kuin mekaaniset menetelmät.

3.3.3 Kaasutus

Kierrätettäessä muovia kaasuttamalla käsittely on pitkälti samankaltaista kuten pyrolyyttisessä kierrätyksessä. Siinä missä pyrolyysi pyritään suorittamaan hapettomissa olosuhteissa, kaasutettaessa muovia sallitaan pieni määrä happea (Al Salem, et al., 2009). Tällöin tuotteena saadaan esimerkiksi vetyä, häkää, hiilidioksidia, sekä muita yksinkertaisia hiilivetyjä. Kaasutettaessa pelkän muovin sekaan on myös mahdollista laittaa biomassaa tai hiiltä, jolloin voidaan saavuttaa yhteinen hyötykäyttö biomassalle ja muoville (Aznar, et al., 2006).

3.3.4 Vetykrakkaus

Vetykrakkauksessa muovia kuumennetaan ja altistetaan vedylle katalyytin läsnäollessa. Tällöin muovin polymeerit hajoavat muodostaen nestemäisiä yhdisteitä, kuten polttoaineita ja uuden muovin valmistamiseen käytettäviä raaka-aineita (Usman, et al., 2018). Vetykrakkauksella voidaan siis tehdä öljyyn verrattava raaka-aine uusiomuovin valmistusta varten.

3.3.5 Liuotus

Kierrätettäessä liuottamalla muovista saadaan seos alkuperäisiä polymeereja ja niiden mahdollisia lisäaineita. Itse muovin polymeerit eivät siis muuta kemiallista rakennettaan ja muovin mahdollisesti sisältämät lisäaineet pysyvät ennallaan (Plastics Europe, 2024a).

Liuottaminen on siis käytännössä oma kierrätysmenetelmänsä eikä varsinaisesti ole kemiallinen menetelmä. Liuottamiseen vaaditaan sopiva liuotin ja lämpöä, jotta muovi saadaan liukenemaan mahdollisimman tehokkaasti.

3.3.6 Orgaaniset kierrätysmenetelmät

Orgaanisilla kierrätysmenetelmillä voidaan kierrättää biohajoavia muoveja. Orgaanisia menetelmiä ovat esimerkiksi biokaasutus sekä kompostointi. Orgaanisissa menetelmissä muovi hajotetaan mikrobien avulla orgaanisiksi aineiksi, metaaniksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi. Näin voidaan päästä eroon biomuoveista ja saada mahdollisesti metaania talteen.

3.3.7 Polttaminen energiaksi

Joissakin tapauksessa muovien käsittely tavanomaisilla kierrätysmenetelmillä ei ole mahdollista tai järkevää. Tällöin muovista voidaan saada hyötyä polttamalla se energiaksi. Tämä ei ole kuitenkaan ongelmatonta, koska poltettaessa syntyy myrkyllisiä aineita. Kaikkien muovien polttaminen ei välttämättä ole mahdollista, esimerkiksi PVC:n palamisessa syntyy vetykloridia, jonka takia sen tarkoituksellinen polttaminen on vähäistä (La Mantia, 1996).

4 Muovin kierrätyksen muovipartikkeli lähteet

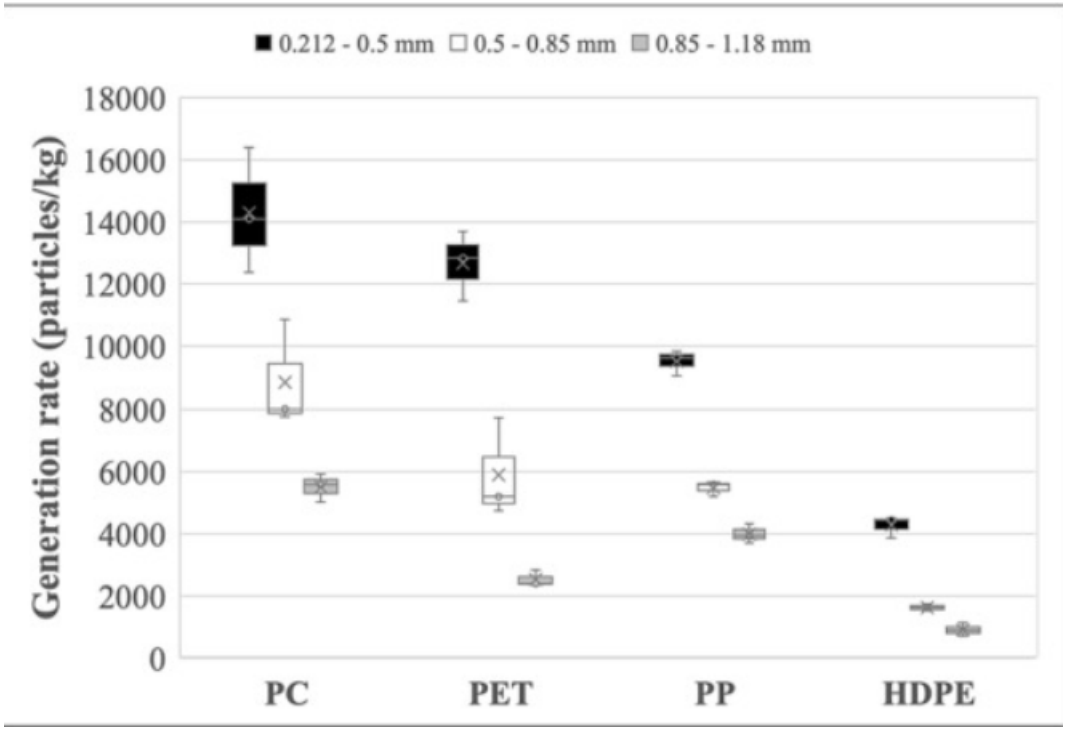
Muovia kierrätettäessä on useita vaiheita, joissa mikro- tai nanomuoveja voi syntyä. Mikro- ja nanomuoveja syntyy samanlaisissa olosuhteissa, ja ne aiheutuvat pääsääntöisesti ulkoisesta rasituksesta johtuen. Mekaanisissa kierrätysmenetelmissä, sekä mahdollisissa kemiallisten menetelmien esikäsittelyvaiheissa muovia pestään, silputaan ja kuumennetaan. Tällaiset olosuhteet ovat otollisia muovin hajoamiselle pienempiin osiin.

4.1 Mikro- ja nanomuovien reitit ympäristöön

Muoveja kierrätettäessä kannattaa huomioida erityisesti pesuvesiin kertyvät mikro- ja nanomuovit, sillä näiden poistaminen on haasteellista pienen partikkelikoon vuoksi. Kierrätyslaitosten tuottamat muovipartikkelit eivät ympäristön kannalta ole sinänsä ongelma laitoksen sisällä, vaan ainoastaan kulkeutuessaan sieltä ulos. Kierrätysprosessista voi kulkeutua muovipartikkeleita ympäristöön sekä kierrätysprosessissa käytetyn veden mukana että ilmateitse. Ilmateitse kulkeutuvat partikkelit voivat joutua laitoksen työntekijöiden hengittämäksi, mikä aiheuttaa potentiaalisen terveysriskin. Tutkimukset muovin kierrätyksestä aiheutuviin mikro- ja nanomuovipäästöihin kohdistuvat pitkälti veden mukana kulkeutuviin päästöihin, joita kierrätyslaitosten vedenpuhdistusjärjestelmät eivät ole kyenneet poistamaan (Allen, et al., 2023). Ilmaan kierrätyslaitoksilla vapautuneita päästöjä ei ole tutkittu.

Yhdistyneissä kuningaskunnissa eräällä kierrätyslaitoksella tehdyissä tutkimuksessa on havaittu perinteisten suodatusmenetelmien päästävän pesuvesien mukana mikro- ja nanomuoveina läpi jopa 6 % kierrätykseen tuodun muovin määrästä (Allen, et al., 2023). Ilman suodatusta arviolta jopa 13 % kaikesta kierrätykseen päätyneestä muovista pääsi pesuveden mukana ulos laitokselta. On kuitenkin huomioitava kyseessä olevan yksittäinen kierrätyslaitos, sillä laitosten välillä voi olla merkittäviä eroja suhteellisten päästöjen määrissä. Vietnamissa tehdyissä tutkimuksissa tarkasteltiin kolmea ilman vedenkäsittelyä olevaa muovia mekaanisesti kierrättävää laitosta ja niiden tuottamia mikromuovipäästöjä. Laitosten päivittäinen tuotanto vaihteli 1–2 tonnin välillä. Tutkimuksissa havaittiin laitosten vuosittaisen mikromuovikuorman olevan jopa 0,014 – 5,8 tonnia (Suzuki, et al., 2021). Todellinen kuorma on todennäköisesti suurempi, sillä tutkimustulokset käsittelivät yli 100 µm

partikkeleita. Suzuki et al, (2024) arvioivat, että maailmanlaajuisesti muovin mekaaninen silppuaminen on tuottanut jopa 0,095 Megatonnin (Mt) mikromuovipäästöt vuoteen 2017 mennessä ja vuoteen 2060 mennessä tämän lukeman arvioidaan kasvavan 0,749 Mt asti. On huomioitava lukeman sisältävän maailmanlaajuiset arviot, sillä kierrätyksen taso eroaa maakohtaisesti runsaasti. Kierrätyksen aiheuttamat mikro- ja nanomuovipäästöt riippuvat myös kierrätettävän muovin lajista, sillä rakenteeltaan hauraampi muovi tuottaa enemmän muovipäästöjä. Kuvassa 4 on havainnollistettuna eri muovilajien silppuamisen aiheuttamia mikromuovipäästöjä. Hai et al, (2023) tekemissä tutkimuksissa on havaittu polykarbonaatin silppuamisen aiheuttavan jopa 3,3-kertaiset mikromuovipäästöt korketiheyksisen polyetyleenin silppuamiseen nähden. Vaikka polykarbonaatti on kova ja kestävä muovilaatu muihin testattuihin muoveihin verrattuna, on se hauraampi ja tuottaa täten enemmän muovipartikkeleita silputtaessa.



Kuva 4. Eri muovilajien silppuamisen tuottamia mikromuovipäästöjä (partikkelia/kg) yhtä kierrätykseen tullutta muovikiloa kohden (Hai, et al., 2023).

4.2 Muovien pesemisen ja flotaation aiheuttamat muovipäästöt

Kierrätyslaitoksella muoveja käsitellään monessa eri vaiheessa. Muoveja pestäessä pesuveteen vapautuu irtonaisia muovipartikkeleita eli mikro- ja nanomuoveja. Jokainen pesuvaihe lisää muovipartikkeleiden määrää ja täten kasvattaa ongelmaa. Pesureissa muovipartikkeleita voi syntyä kitkan ja mahdollisten pesureissa käytettyjen kemikaalien yhteisvaikutuksesta. Mitä vähemmän pesuvaiheita tai mitä tehokkaammaksi pesuvaiheet saadaan, sitä vähemmän muovipartikkeleita syntyy. Muovien erotteluvaiheessa voidaan käyttää flotaatiota, jolloin muovi on kosketuksissa veden kanssa ja muovipartikkeleita voi irrota veteen. Veteen irronneet muovipartikkelit päätyvät laitoksen vesikiertoon ennemmin tai myöhemmin sillä mahdollisten flotaatioaltaiden sekä pesureiden tuottama vesi on ajoittain puhdistettava prosessin optimaalisen toiminnan kannalta. Päästöt flotaatioaltaista ja pesureista ympäristöön riippuvat täysin siitä miten vettä käsitellään, eikä aiheesta löydy tutkmustuloksia.

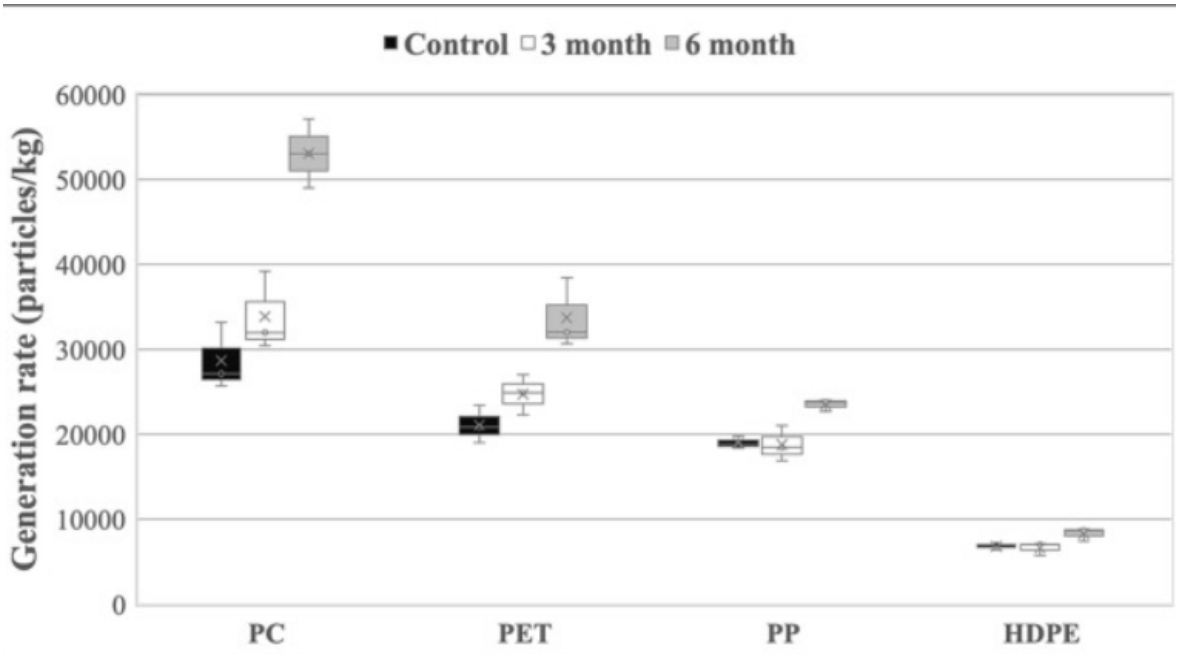
4.3 Muovin silppuaminen ja repiminen

Muoveja kierrätettäessä muovia revitään ja silputaan. Silppuaminen on käytännössä partikkelikoon pienentämistä. Mitä useampaan kertaan muovia leikataan tai hienonnetaan, sitä suurempia määriä siitä irtoaa mikro- ja nanomuoveja. Silppuaminen ei välttämättä aiheuta suoranaisesti muovipäästöjä veteen, mutta voi teoriassa aiheuttaa muovipäästöjä ilmaan. Tällöin ne voivat kulkeutua kierrätyslaitoksen ulkopuolelle. Toisaalta osa silputun muovivirran mukana jatkavasta mikro- ja nanomuovista jatkaa pesuriin, jossa se poistuu pesuveden mukana. Yksi mahdollinen silppuamisen ja repimisen aiheuttamia päästöjä vähentävä seikka on laitteiden leikkaavien terien kunto. Terävämmät terät leikkaavat siistimmin eivätkä aiheuta muovin ’’ylimääräistä’’ repeämistä mikro- tai nanotasolla. Säännöllisillä huoltotoimenpiteillä voi siis olla mahdollisesti positiivinen vaikutus syntyvien muovipartikkeleiden määrään. Tutkimustulosta aiheesta ei toistaiseksi löydy.

4.4 Muut mahdolliset päästöjen lähteet

Silputtuja, sekä lajiteltuja muoveja voidaan varastoida ennen uusiomuovin raaka-aineena käytettyjen muovipellettien valmistamista. Jos varastoitu muovi kokee säilytyksen aikana

ulkoista rasitusta, kuten UV-valoa, voi sen rakenne hajota tuottaen muovipäästöjä (Hai, et al., 2023). Tällaisten päästöjen määrää kierrätyslaitoksilla on liki mahdotonta määrittää nykyisen tutkimustiedon valossa. Tämänkaltaiset päästöt riippuvat todennäköisesti pitkälti myös kierrätyslaitoksesta ja sen toimintatavoista. Jos kierrätyslaitoksilla varastoidaan jätteitä ulkona, saattaa lämpö, UV-valo tai vaikkapa hapan sadevesi heikentää muovia irroittaen siitä muovipartikkeleita (Hai, et al., 2023). Ulkona säilytetty tai muutoin rasittunut muovi on myös hauraampaa ja tuottaa kierrätysprosessissa enemmän mikromuovipäästöjä. Kuvassa 5 on vertailtu kierrätysprosessin silppuamisvaiheen aiheuttamia muovipäästöjä eri muovilajeille, kun niitä on ensin altistettu ympäristön rasitteille kolmen tai kuuden kuukauden ajan (Hai, et al., 2023). Kyseisessä tutkimuksessa muoveja altistettiin UV-valolle, sekä muille ulkoilman aiheuttamille rasitteille. Testatuista muoveista merkittävin aktistuksen aiheuttama ero havaittiin polykarbonaatilla, josta aiheutui silppuamisessa lähes kaksinkertaiset mikromuovipäästöt kuuden kuukauden jälkeen verrattuna altistamattomaan muoviin.



Kuva 5. Silppuamisvaiheen aiheuttamat kooltaan 0,212-1,18 mm mikromuovipäästöt (partikkelia/kg) eri muovilajeille kun niitä on altistettu ympäristön rasitteille, kuten UV-valolle 0, 3 tai 6 kuukautta (Hai, et al., 2023).

Myös muovien polttaminen energiantuotannossa on mahdollista, mutta tämä ei onnistu ongelmitta. Polttolaitosten pohjatuhkan on havaittu sisältävän mikromuoveja. Xue et al, (2024) tutkimuksissa on havaittu muovin polttamisen tuottavan edelleen mikro- sekä nanopartikkeleita. Tutkimuksissa havaittiin myös poltto-olosuhteiden vaikuttavan merkittävästi syntyvien

muovipartikkelien määrään. Erilaisten muovilajien polttamisen havaittiin tuottavan eri määriä muovipartikkeleita. Poltettavan muovin homogeenisuudella on myös merkitystä muovipartikkelien syntymisen kannalta. Tutkimuksissa heterogeenisten muovivirtojen polttamisen on havaittu heikentävän palotapahtumaa ja aiheuttavan epätäydellistä palamista. Tällöin muovipartikkelien määrä polttamisen jälkeen on suurempi kuin homogeenisella muovilla.

5 Ratkaisuja kierrätyksen aiheuttamiin muovipäästöihin

Kun muovin kierrätyksen mikro- ja nanomuovipäästöihin haetaan ratkaisuja, olennaisimpia kysymyksiä ovat, miten muovipartikkelien syntymistä voidaan ehkäistä, ja miten niiden kulkeutumista ympäristöön voidaan estää. Mitä vähemmän mikro- ja nanomuoveja päästetään syntymään itse kierrätysprosessissa, sitä vähemmän niitä voi kulkeutua ympäristöön. Mikro- ja nanomuovien syntymistä ei kuitenkaan voida täysin ehkäistä, jolloin vaihtoehtona tulee olla myös keinoja vähentää niiden pääsyä laitoksen ulkopuolelle. Nanomuovien poistaminen vedestä täysin on toistaiseksi liki mahdotonta nykyisillä menetelmillä, poistomenetelmät ovat tehokkaita, mutta ne eivät saavuta 100 % erotusta nanomuoveilla (Govarthanan, et al., 2022). Muovipäästöjen vähentämiseksi on kuitenkin olemassa menetelmiä, joilla vähennetään syntyvien mikro- ja nanomuovien määrää ja merkittävä osuus muovipartikkeleista saadaan poistettua. Näitä menetelmiä käsitellään kappaleissa 5.1, 5.2 ja 5.3.

On tärkeää huomioida myös se, että vaikka muovipartikkelit saataisiin poistettua vedestä tai jopa ilmasta, ne eivät kuitenkaan katoa. Mikro- ja nanomuovien, sekä niiden poistamiseen käytettyjen aineiden, adsorbenttien tai lietteen varastointi tiiviissä suljetussa tilassa ydinjätteen tavoin ei ole järkevää. Suodatuksen tai muiden käsittelyiden tuloksena saadut mahdolliset jätteet sisältävät edelleen muovia ja niistä tulee päästä eroon. Näiden päästöjen käsitteleminen on välttämätöntä, sillä muutoin ne päätyvät tavalla tai toisella ympäristöön. Kyseisen käsittelyn voisi suorittaa kemiallisesti, jolloin muovipartikkelit voitaisiin hajottaa.

Ratkaisun on oltava myös toimiva ja käytettävissä todellisilla kierrätyslaitoksilla. Yleisesti katsottuna on myös tärkeää tarkastella sitä, missä ja minkälaisilla kierrätyslaitoksilla mikro- ja nanomuoveja pääsee eniten ympäristöön. Maailmanlaajuisesta näkökulmasta on syytä harkita yhteistyötä ja antaa tukea sinne, missä päästöt ovat suuret, sekä kierrätys ja siihen liittyvät puhdistusmenetelmät ovat alkeellisella tasolla, kuten ei OECD maihin (Suzuki, et al., 2024).

5.1 Kemiallisten kierrätysmenetelmien käyttäminen

Kemiallisten menetelmien avulla voidaan usein tehdä parempilaatuinen tuote kuin mekaanisin kierrätysmenetelmin valmistetusta uusiomuovista (VTT, 2022). Kemialliset menetelmät voivat osaltaan vähentää neitseellisen eli suoraan öljystä valmistetun muovin määrää. Parempilaatuinen tuote on myös kestävämpi ja tuottaa rasitettaessa vähemmän mikro- ja nanomuoveja. Kierrätysmuovin käyttäminen neitseellisen muovin sijaan vähentää maapallolla olevaa muovimäärää. Nämä ovat kuitenkin kemiallisten menetelmien epäsuoria vaikutuksia muovipartikkelipäästöihin, eivätkä ne suoranaisesti liity kierrätyslaitoksen sisällä syntyviin mikro- ja nanomuovipäästöihin. Jos kemiallisten menetelmien avulla pystytään vähentämään kierrätyksen mekaanista rasitusta aiheuttavia vaiheita, pystytään teoriassa vähentämään myös syntyvien mikro- ja nanomuovipäästöjen määrää. Sama pätee myös mekaaniseen kierrätykseen. Menetelmien tehostaminen on yksi avainratkaisu muovipartikkeleiden syntymisen vähentämiseen. Kemialliset menetelmät vaativat kuitenkin toimiakseen mekaanisia esikäsittelyitä, kuten silppuamista. Täten mikro- ja nanomuovien syntymistä ei voida täysin ehkäistä edes kemiallisin menetelmin. Tästä johtuen ratkaisun tulee löytyä keinoista estää muovipartikkelien poistuminen kierrätyslaitoksilta.

5.2 Päästöt ilmateitse

Muovinkierrätyslaitoksilla pienet muovipartikkelit voivat kulkeutua myös ilmateitse, jolloin laitoksen tiiveyden parantaminen ja ilman suodattaminen ovat potentiaalisesti hyödyllisiä keinoja ehkäistä muovipäästöjä ympäristöön. Tutkimusta muovinkierrätyslaitosten mahdollisista ilmateitse kantautuvista päästöistä tarvitaan. Olennaista on myös tutkia mahdollisia haittoja ilmateitse kulkevista muovipartikkeleista laitosten työntekijöiden terveydelle.

5.3 Pesuvesien käsittely ja suodattaminen

Pesuvedet sisältävät kierrätyslaitosten tutkituimmat, sekä todennäköisesti suurimmat mikro- ja nanomuovipäästöt. Ilman mukana kulkeutuvista mikro- ja nanomuovipäästöistä kierrätyslaitoksilla ei ole tutkimusta. Pesuvesiä käsittelemällä on kuitenkin mahdollista vähentää ympäristöön päätyvien muovipäästöjen määrää. Yksi vaihtoehto on kierrätyslaitoksen pesuvesien, sekä mahdollisten flotaationesteiden suodattaminen ennen niiden lopullista poistoa laitokselta. Nykyteknologialla ja käytössä olevilla suodattimilla yli 5 mikrometrin kokoiset partikkelit on mahdollista suodattaa pesuvedestä melko hyvin ja yli 40 mikrometrin partikkelit suodattuvat erittäin hyvin, mutta alle 5 mikrometrin partikkelit eli pienimmät mikromuovit ja käytännössä kaikki nanomuovit jäävät pitkälti suodattamatta (Allen, et al., 2023). Tutkimustulosten ollessa suppeita, ei voida antaa tarkkoja ja yleispäteviä tuloksia siihen, miten tehokkaasti kierrätyslaitokset todellisuudessa poistavat mikro- ja nanomuovit prosessiin käytetystä vedestä. Tutkimukset pohjautuvat lähes aina yksittäisten kierrätyslaitosten kykyyn erottaa muovipartikkelit vedestä.

5.3.1 Pesuvesien suodatus membraanibioreaktorilla

Membraanibioreaktoritekniikassa yhdistyy suodattaminen membraanilla ja lietteen käyttäminen muovin sekä muiden prosessiveden sisältämien aineiden poistamisessa. Membraanibioreaktori toimii membraanisuodatuksen ja biologisen katalyytin, kuten entsyymien ja bakteerien avulla. Membraanibioreaktoreiden avulla on saatu lupaavia tuloksia puhdistettaessa mikro- ja nanomuoveja pois vedestä (Talvitie, et al., 2017 & Govarthanan, et al., 2022). Membraanibioreaktorin tuotteena muodostuu lietettä, joka voi sisältää osan vesivirrasta poistetuista muovipartikkeleista. Liete on kuitenkin ajoittain poistettava prosessista. Sama pätee membraanin erottamalle muoville. Näiden loppusijoittaminen aiheuttaa myös ongelman sillä aiemmin vedessä olleet muovipartikkelit ovat nyt erotettuna tai lietteessä ja jos nämä viedään kaatopaikalle, on koko prosessiveden puhdistaminen ollut turhaa, sillä tällöin muovi pääsee sellaisenaan luontoon. Liete ja erotettu muovi tuleekin käsitellä huolella, esimerkiksi kemikaalein, jolloin mikro- ja nanomuovit muuttuvat toisiksi aineiksi. Membraanibioreaktorin avulla on saavutettu jopa 99 % tehokkuus yli 2 nanometrin partikkeleiden

poistossa (Govarthanan, et al., 2022). Talvitie et al, (2017) arvioi membraanibioreaktorin taas poistavan 99,9 % yli 20 mikrometrin mikromuoveista. Voidaan siis päätellä membraanibioreaktorin olevan tehokas menetelmä pienten muovipartikkelien poistamiseen vedestä. Vaikka tehokkuus on korkea, se käsittää kaikki kokeeseen sisällytetyt partikkelit eli pienten partikkelikokojen erotustehokkuus ei välttämättä ole yhtä hyvä kuin kokonaistehokkuus.

5.3.2 Suljettu vesikierto

Yksi potentiaalinen keino ehkäistä mikro- ja nanomuovien pääsyä luontoon muovin kierrätyslaitoksilta on vesikierron sulkeminen laitoksen sisällä. Käytännössä vesi kiertää laitoksella prosessivaiheiden ja puhdistusvaiheiden läpi, jolloin veden sisältämät mahdolliset muovipartikkelit jäävät laitoksen sisälle eivätkä vapaudu ympäristöön. Muovinkierrätyslaitoksilla vesi on tärkeässä roolissa useassa eri käsittelyvaiheessa. Vettä voidaan käyttää esimerkiksi pesuun tai erotteluun (Ragaert, et al., 2017). Vesi kuitenkin likaantuu käytössä ja se on puhdistettava. Vesi voi olla myös kuluerä, jos se otetaan vesijohtoverkosta tai jätevesi lasketaan viemäriverkostoon. Vaikka jätevedet laskettaisiin viemäriverkostoon ja ne päätyisivät tätä kautta jätevedenpuhdistamolle, ei puhdistamon laitteisto välttämättä ole kyllin tehokas poistamaan muovipartikkeleita vedestä. Todellisuudessa vettä häviää prosessista ja lisää joudutaan ottamaan tilalle. Vedenpuhdistusjärjestelmiä valmistava yritys Clear Fox on kyennyt saavuttamaan jopa 95–98 % vesikierron muovinkierrätyksen pesuvesijärjestelmissä, eli vain 2–5 % vedestä poistuu päivittäin jatkuvasta suljetusta vesikierrosta. (Clearfox, 2024) On kuitenkin huomioitava että kyseessä on laitteistoja valmistavan yrityksen itse ilmoittama arvo. Muovinkierrätyslaitosten vesikierron sulkeminen vähentäisi muovin päätymistä luontoon, jos vaihtoehtona on suodatetun ja edelleen pienimpiä muovipartikkeleita sisältävän jo kerran puhdistetun veden jatkuva laskeminen ympäristöön. Vettä ei kuitenkaan välttämättä voida suljetussakaan vesikierrossa käyttää loputtomiin sen likaantumisen vuoksi, mutta tällöin jäteveden määrä on vähäisempää ja käsitteleminen helpompaa ja halvempaa. Pienempi vesimäärä voidaan kerätä paremmin talteen, sekä sen sisältämät mahdolliset kemikaalit ja muovipartikkelit voidaan käsitellä sellaisilla menetelmillä, joita ei olisi järkevää käyttää laitosten jatkuvissa kierroissa niiden hitauden tai kustannustehokkuuden kannalta.

5.3.3 Muita menetelmiä päästöjen hillintään

Muovinkierrätyslaitosten jätevesien kohdalla suurin ongelma on nanomuovit, sillä niiden suodattuminen suhteessa mikromuovien suodattumiseen yleisesti käytetyillä menetelmillä on heikkoa. Nanomuovit ovat suurimillaan alle mikrometrin kokoisia. Pienimmillään nanomuovi voi periaatteessa mennä monomeerin tasolle, sillä se on muovin perusosanen ja sen koko riippuu muovilaadusta. Se voidaanko yhtä monomeeriä pitää varsinaisena muovina, ei ole yksioikoista muovin ollessa polymeeri eli monomeerien ketju. Monomeeri on molekyyli, jolloin puhdistusmenetelmien tulisi mennä äärimmäisen pienelle tasolle, jos ne halutaan poistaa. Vaikka yksittäistä monomeeriä ei välttämättä pidettäisi muovina, voidaan yksittäistä monomeeria pitää silti haitallisena ympäristölle tai eliöille, jos se voi läpäistä kierrätyslaitosten vedenpuhdistusjärjestelmät. Esimerkiksi polykarbonaatin sisältämää BPA:ta voi vapautua sellaisenaan jäteveteen. Vaikka BPA ei itsessään ole muovia voi se aiheuttaa haitallisia vaikutuksia päästessään ympäristöön ja tätä kautta eliöihin. Tämä tekee jopa molekyylitason suodattamisesta laitoksella tärkeää. Mikro- ja nanomuoveja voidaan poistaa vedestä myös adsorbentteja käyttämällä, jolloin ne tarttuvat adsorbenttien pinnalle ja poistuvat näin vedestä. Itse adsorbentit sisältävät silti edelleen vedestä kerätyt muovipartikkelit. Näin ongelman painopiste siirtyisi mutta itse ongelma ei poistu. Yhdistämällä erilaisia menetelmiä, kuten suodatusta ja adsorbenttien käyttöä, voidaan saada hyviä tuloksia, paitsi mikromuovien, myös nanomuovien poistamisen osalta (Govarthanan, et al., 2022).

5.3.4 Vedenpuhdistusmenetelmien vertailua

Kun lähdetään tutkimaan erilaisia vedenpuhdistusmenetelmiä mikro- ja nanomuovien poistoon, tulee löytää keino joka soveltuu tehokkaasti vedenpuhdistukseen kierrätyslaitoksella. Erilaisia menetelmiä on useita, mutta membraanibioreaktori erottuu tehokkuutensa vuoksi edukseen. Taulukossa 1 on vertailtuna erilaisia vedenpuhdistusmenetelmiä.

Taulukko 1. Erilaisia vedenpuhdistusmenetelmiä sekä niiden erotustehokkuuksia mukaillen Govarthanan et al, (2022).

Erotusmenetelmä	Erotetut muovin partikkelikoot (nm)	Erotusaika (min)	Erotustehokkuus (%)
Membraanibioreaktori nanosuodatus membraanilla	>2	20	99,0
Sentrifugointimenetelmät	<100 tai 206 ± 45	55 tai 15	98,0 tai 98,41
Suodatus ja ultrasuodatus	<150 – 333 ± 76	10 tai 27	Riippuen käytetystä menetelmästä 32 ± 12 tai 92 ± 3
Flokkulaatio	217 ± 4	50	77 ± 15

Taulukon tietojen perusteella voidaan havaita nanosuodatusmembraanin sisältävän membraanibioreaktorin toimivan ennen kaikkea erotustehokkaasti. Membraanibioreaktori kykenee myös erottamaan hyvin pieniä partikkeleita; jopa muutaman nanometrin tasolla. Tämä kyky erottaa membraanibioreaktorin muista vertailluista menetelmistä puhdistettaessa jätevedestä mikro- ja nanomuoveja. Huomioitavaa membraanibioreaktorin käytössä on kuitenkin lietteen jatkokäsittely, sen mahdollisesti sisältämien muovipartikkelien takia. Sentrifugimenetelmät eivät välttämättä sovellu jatkuvaan jäteveden puhdistamiseen muovipartikkeleista yhtä hyvin kuin laboratorion olosuhteissa erotettaessa muovipartikkeleita vesinäytteestä. Menetelmillä on saatavilla hyviä erotusaikoja, mutta erotetut partikkelikoot jäävät liian suuriksi. Suodattamalla ja ultrasuodatuksella saadaan aikaan taulukon 1 mukaan jopa parhaita erotusaikoja, mutta erotustehokkuus ja erotetut partikkelikoot eivät ole yhtä hyviä kuin esimerkiksi membraanibioreaktorilla. Flokkulaatiossa partikkeleita pyritään kemikaalien avulla kiinnittämään toisiinsa muodostaen suurempia partikkeleita. Flokkulaatio ei kuitenkaan ole yhtä tehokas muihin taulukon 1 menetelmiin verrattuna. Vaikka membraanibioreaktori on taulukon 1 paras menetelmä muovipartikkelien tehokkaaseen erotukseen, voi muitakin menetelmiä käyttää tehokkaaseen vedenpuhdistukseen. Useamman menetelmän yhteiskäytöstä voi myös olla hyötyä. Tutkimuksen tulosten perusteella havaittiin membraanibioreaktorin olevan toistaiseksi paras menetelmä käytetyn prosessiveden

puhdistukseen muovipartikkeleista, mikä johtuu lähinnä sen kyvystä erottaa nanotason muovipartikkeleita verrattuna muihin menetelmiin. (Govarthanan, et al., 2022)

6 Johtopäätökset

Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää minkälaisia mikro- ja nanomuovipäästöjä muovin kierrättäminen yleisesti käytössä olevilla menetelmillä aiheuttaa. Tutkimuksen kohteena oli myös saada tietoa siitä minkälaisia paikallisia tai globaaleja muovipartikkelipäästöjä muovin kierrättäminen erilaisten menetelmien avulla tuottaa. Selvityksen kohteena oli tarkkailla niitä vaiheita, joissa mikro- ja nanomuoveja voi syntyä. Samalla tutustuttiin erilaisiin muovin kierrätysmenetelmiin ja siihen onko muovipartikkelipäästöjen syntymistä mahdollista estää erilaisia tekniikoita hyödyntäen. Lisäksi etsittiin keinoja ehkäistä muovipartikkelipäästöjä ympäristöön.

Tutkimuksessa havaittiin, että muovin kierrättämiseen käytetyt menetelmät tuottavat mikro- ja nanomuoveja. Tämä aiheutuu pitkälti siitä, että muovin kierrättämiseen tai sen esikäsittelyyn liittyvät vaiheet aiheuttavat muoveille mekaanista rasitusta. Myös ympäristön vaikutteet ja kemikaalit voivat heikentää muovien rakennetta synnyttäen enemmän muovipartikkeleita kierrätysprosessin aikana. Tutkielmassa havaittiin, että muovin kierrätykseen käytettyjen menetelmien avulla voidaan epäsuorasti vaikuttaa uusiomuovin elinkaaren aikana tuottamiin muovipartikkeleihin, kuten esimerkiksi kemiallisia kierrätysmenetelmiä käyttämällä, jolloin voidaan usein tuottaa mekaanisilla menetelmillä valmistettua tuotetta parempilaatuinen tuote. Tällöin rakenteellisesti laadukkaampi kemiallisesti kierrätetty muovi tuottaa uudelleen kierrätettynä vähemmän mikro- ja nanomuoveja, koska se on vähemmän haurasta kuin mekaanisesti kierrätetty. Esimerkiksi elintarvikekäytön kohteissa voi olla rajoituksia mekaanisesti kierrätetyn muovin käytölle. Näissä kohteissa kemiallisesti kierrätetty muovi pystyisi korvaamaan suoraan öljystä valmistettavaa muovia. Näin pystyttäisiin vähentämään muovin kokonaismäärää ja samalla teoriassa kierrätystä vaativan muovin määrää. Tutkimuksessa havaittiin myös muovinkierrätyslaitoksilta päätyvän merkittäviä määriä muovipartikkelipäästöjä ympäristöön.

Kierrätysprosessit tulevat aina tuottamaan muovipartikkeleita, joten ratkaisu ympäristöpäästöjen ehkäisyyn tulee löytyä etenkin laitoksen vedenpuhdistuksesta, koska laitosten vesivirrat ovat merkittävimpiä reittejä ympäristöön päätyville muovipartikkelipäästöille. Myös ilmateitse kulkeutuminen kuitenkin on mahdollista. Ilmateitse kulkeutuminen aiheuttaa myös potentiaalisen terveysriskin, jos muovipartikkeleita pääsee työntekijöiden kehoon

hengityselimistön kautta. Tutkittaessa veden mukana kulkevia muovipartikkelipäästöjä ja niiden vähentämistä havaittiin, että laitosten ympäristöpäästöjen vähentämiseksi tulee löytää ratkaisu, joka kykenee poistamaan vedestä tehokkaasti myös nanokokoisia partikkeleita. Yksi potentiaalinen ratkaisu on käyttää nanosuodatuksella varustettuja membraanibioreaktoreita vedenpuhdistukseen. Toinen ratkaisu on sulkea laitoksen vesikierto kokonaan siten, ettei laitokselta virtaa ulos vettä lainkaan. Suljetun vesikierron hyödyistä löytyi tietoa varsin suppeasti. Vesikierron sulkeminen voi olla merkittävä tekijä estettäessä muovipartikkelien pääsyä pois kierrätyslaitoksilta, minkä vuoksi suljettujen vesikiertojen hyödyntämistä muovien kierrätyksessä tulisi tutkia enemmän.

Yleisesti käytössä olevilla puhdistusmenetelmillä laitosten jätevesiä ei saada täysin puhtaaksi ja osa pienimmistä partikkeleista päätyy ympäristöön. Eri kierrätysvaiheiden optimaalinen toiminta on myös tärkeässä osassa kun halutaan vähentää prosessin aikana syntyvien muovipartikkeleiden määrää. Mitä pienemmälle mekaaniselle kulutukselle muovi altistetaan, sitä vähemmän muovipartikkeleita syntyy. Tutkimusta tarvitaan runsaasti muovin kierrättämisen aiheuttamien muovipäästöjen kartoittamiseksi ja ratkaisujen löytymiseksi. Päästöjen syntyä on myös syytä tarkastella globaalisti ja yhteistyön avulla suunnata resursseja paikkoihin, joissa syntyy merkittäviä muovipäästöjä kierrätystoiminnan seurauksena. Suppeiden tutkimustulosten perusteella on myös vaikeaa vertailla minkä verran jokin tietty kierrätysmenetelmä tuottaa muovipartikkeleita. Tämä johtuu myös kierrätyksessä käytettyjen laitteiden yksilöllisistä eroavaisuuksista. Yksittäisten kierrätyslaitosten tuottamien mikro- ja nanomuovipäästöjen mittaaminen on kuitenkin mahdollista, ja tutkimusta tulisi toteuttaa näiden päästölähteiden arviointiin nykyistä enemmän.

Lähteet

Allen, D., Brown, E., Macdonald, A., Allen, S. 2023. The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness. Journal of Hazardous Materials Advances. Vol 10. ISSN 2772-4166

Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management. Vol 29. Issue 10. s.2625-2643. ISSN: 0956-053x

Aznar, M. P., Caballero, M. A., Sancho, J. A., Frances, E. 2006. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. Fuel Processing Technology. Vol 87. Issue 5. S.409-420. ISSN 0378-3820

Bainbridge, S. A., Zurub, R. E., Cariaco, Y., Wade, M. G. 2024. Microplastics exposure: implications for human fertility, pregnancy and child health. Frontiers in Endocrinology. Vol 14. ISSN: 1664-2392

B+B Anlagenbau GmbH. 2024. Plastic recycling solutions , Mechanical dryer, [Verkkosivu] [Viitattu 13.1.2024] https://www.bub-anlagenbau.de/products/drying/mechanical-dryer/

Clearfox. 2023. Plastic Recycling Washwater. Wastewater Treatment Systems. [Verkkosivu] [Viitattu 10.1.2024] https://clearfox.com/plastic-recycling-washwater/

Crawford, C. B. & Quinn, B. 2016. Microplastic pollutants. Elsevier Science. Microplastics water pollution. Technology & Engineering, environmental, pollution control. s. 102. ISBN 9780128104699

Galloway, T. S. 2015. Micro- and nano plastics and human health. Marine anthropogenic. Springer, Cham. s.343-366 ISBN 978-3-319-16510-3

Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K L. 2017. Production use and fate of all plastic ever made. Science Advances. Vol 3, Issue 7. ISSN 23752548

Govarthanan, M., Keerthana Devi, M., Karmegam, N., Manikandan, S., Subbaiya, R., Song, H., Kwon, E. E., Sarkar, B., Bolan, N., Kim, W., Rinklebe, J. 2022. Removal of nanoplastics in water treatment processes: A review. Science of The Total Environment. Vol 845. 157168. ISSN: 0048-9697

Hai, F. I., Stapleton, M. J., Ansari, A. J., Ahmed, A. 2023. Evaluating the generation of microplastics from an unlikely source: The unintentional consequence of the current plastic recycling process. Science of The Total Environment. Vol 902. 166090. ISSN: 0048-9697

La Mantia, F. P. 1996. Recycling of PVC and mixed plastic waste. ChemTec Publishing.

Lamoree, M. H., Leslie, H. A., van Velzen, M .J .M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J. 2022. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. Environment international. 163/2022. 107199. ISSN 0160-4120

Manrich, S., Santos, A. S. F. 2008. Plastic recycling. New York. Nova Science Publishers. ISBN: 1-61470-590-9

Muoviteollisuus ry. 2019. Muovien kierrätys. Luokitus. Muovimerkit Luotu Suojaksi. Esite. [Verkkosivu] [Viitattu 17.3.2024] Saatavissa: https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/muovien_kierratys/

Nihot Recycling Technology. 2024. WSF windshifter,[Verkkosivu] [Viitattu 5.2.2024] Saatavissa: https://nihot.nl/products/wsf-windshifter/

OECD. 2022a. Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short. OECD Global plastics Outlook Database. [Verkkosivu] [Viitattu 10.1.2024] Saatavissa: https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm

OECD. 2022b. Global plastic waste set to triple by 2060. OECD Global plastics Outlook Database: Policy Scenarios To 2060 [Verkkosivu] [Viitattu 10.1.2024] Saatavissa: https://www.oecd.org/newsroom/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.htm

Plastics Europe. 2024a. Chemical recycling, [Verkkosivu] [Viitattu 16.3.2024] https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling/

Plastics Europe. 2024b. Plastic Recycling. [Verkkosivu] [Viitattu 4.3.2024] Saatavissa: https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/

Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management 69/2017

Remeo. 2024. Muovin kierrätys.[Verkkosivu] [Viitattu 8.3.2024] Saatavissa: https://remeo.fi/kiertotalous/muovinkierratys-saastaa-ymparistoa-ja-edistaa-kiertotaloutta/

Rotajet recycling. 2024. Plastic washing Friction washers. [Verkkosivu] [Viitattu 27.1.2024] Tekstiviite: (Rotajet. 2024a). Saatavissa: https://plasticwashing.co.uk/friction-washer/

Rotajet recycling. 2024. Plastic washing. Rotary washers. [Verkkosivu] [Viitattu 27.1.2024] Tekstiviite: (Rotajet, 2024b). Saatavissa: https://plasticwashing.co.uk/rotary-washer/

Suzuki, G., Uchida, N., Tuyen L. H., Tanaka, K., Matsukami, H., Kunisue, T., Takahashi, S., Viet, P. H., Kuramochi, H., Osako, M. 2022. Mechanical recycling of plastic as a point source for microplastic pollution. Environmental Pollution 303/2022. 119114.

Suzuki, G., Uchida, N., Tanaka, K., Higashi, O., Takahashi, Y., Kuramochi, H., Yamaguchi, N., Osako, M. 2024. Global discharge of microplastic from mechanical recycling of plastic waste. Environmental pollution. Vol 348. S.37. 123855. ISSN: 0269-7491

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 Research. Vol 123. S.401-417. ISSN:0043-1354

Usman, M. R., Munir, D., Irfan, M,F. 2018. Hydrocracking of virgin and waste plastics: A detailed review. Renewable and sustainable energy reviews. Vol.90. S.490 – 515. ISSN 1364—0321

Uurasjärvi, E., Hartikainen, S., Setälä, O., Lehtiniemi, M., Koistinen, A. 2019. Micro-plastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake. Wiley. ISSN 10614303

VTT. 2022. Suomessa kehitetään muovijätteelle teollisesti toimiva kemiallinen kierrätyskonsepti teollisuuden ja tutkimuksen myötä.[Verkkosivu] [Viitattu 11.2.2024] https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/suomessa-kehitetaan-muovijatteelle-teollisesti-toimiva-kemiallinen

Wei, G., Weiting, C., Mingzhe, Y., Shan, C., Chu, Z., Yuqin, F. 2023. Estrogenic and non-estrogenic effects of bisphenol A and its action mechanism in the zebrafish model: An overview of the past two decades of work. Environment International. Vol 176. ISSN: 0160-4120

Xue, J., Jin, M., Sun, M., Liu, J., Dong, C. 2024. Influence of operating parameters on the yield of micro-plastics from plastics incineration. Science of The Total Environment. Vol.912. 169347. ISSN 0048-9697

Liitteet

Materiaalit ja menetelmät

Tämän kandidaatintutkielman aiheena on muovinkierrätyksen mikro- ja nanomuovipäästöt. Muovit, mikro- ja nanomuovit sekä muovinkierrätys itsessään eivät ole kovinkaan uusia käsitteitä, mutta yhdistettynä toisiinsa ne luovat suhteellisen vähän tutkitun aiheen, josta ei suoraan hakemalla löytynyt juurikaan tietoa. Tässä työssä lähdettiin liikkeelle tutkimalla tarkemmin, mitä muovin kierrättäminen, sekä mikro- ja nanomuovit ovat. Hakusanat olivat enimmäkseen englanniksi, mutta osin myös suomeksi. Hakusanat olivat alkuun muovin kierrättäminen/plastic recycling sekä mikromuovi/ microplastic. Mikromuoveista sekä nanomuoveista löytyi tietoa helposti. Hakeminen muovinkierrätyksestä johti termeihin mekaaninen ja kemiallinen kierrättäminen. Mekaanisen kierrättämisen vaiheista löytyi paremmin tietoa tämän jälkeen sanoilla muovin lajittelu, muovin erottelu, muovin silppuaminen,rumpupesuri, kitkapesuri, erottelu, flotaatio ja granulointi. Laitekohtaiset sanat yhdistettyinä muovin kierrätykseen toivat tarkempia tuloksia niiden toiminnasta. Kemiallisen kierrättämisen vaiheista löytyi lisätietoa sanoilla pyrolyysi, depolymerisaatio, kaasutus ja hydrokrakkaus. Kemiallisia ja mekaanisia menetelmiä sekä niiden variaatioita on lukuisia eikä jokaiseen eri menetelmään ollut tarkoituksenmukaista perehtyä yksityiskohtaisesti. Tarkempia hakutuloksia tutkimuksen aiheesta toivat sanat muovin kierrätys mikromuovi, jolloin löytyi tutkimusartikkeli, jossa oli tutkittu muovin kierrätyslaitoksen käsiteltyjä pesuvesiä ja niissä olevia mikromuoveja. Samalla saatiin havainto siitä, miten hyvin nykyiset kierrätyslaitokset puhdistavat mikro- ja nanomuovit vedestä Tämän jälkeen suodattaminen johti erilaisiin vedenkäsittelyn keinoihin ja suodattamiseen esimerkiksi membraanibioreaktorilla. Kun selville oli saatu erilaisten vedenkäsittelymenetelmien tehokkuuksia puhdistaa vettä muoveista, voitiin tarkastella laitosten potentiaaleja parempaan suoritukseen. Yhdeksi lupaavaksi vaihtoehdoksi löytyi vesikierron eristäminen. Työssä tiedonhaku tapahtui lähtökohtaisesti Scopuksen kautta. Tiedonhaussa käytettiin kokeeksi apuna tekoälyä. Tekoälyltä kysyttiin esimerkiksi ¨Miten muovia kierrätetään?¨. Vastausten avulla pystyttiin nopeasti saamaan pintaraapaisu laajemmasta kokonaisuudesta, jota lähdettiin tutkimaan tarkemmin. Tietyissä

tapauksissa tarvitsi saada tietoa, joistakin kierrätykseen liittyvistä laitteistoista. Tällöin turvauduttiin kierätyslaitteistoja valmistavien yritysten omiin sivustoihin, sekä samalla tieteelliseen tietoon.