



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NIKLAS KANDELIN

Teollisuuden aiheuttama mikromuovijäte meressä ja sen hajoaminen

Kandidaatintyö

Tarkastaja: TkT Mikko Kanerva
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
pvm. 08.03.2017

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Niklas Kandelin: Teollisuuden aiheuttama mikromuovijäte meressä ja sen hajoaminen

Kandidaatintyö, 24 sivua

Lokakuu 2017

Pääaine: Materiaalitekniikka

Tarkastaja: TkT Mikko Kanerva

Avainsanat: mikromuovit, hajoaminen, meri

Mereen päätyvä muovijäte on laajasti tunnistettu ongelma. Mikromuovit ovat vähemmän näkyvä osa tätä ongelmaa. Tässä kandidaatintyössä tutustutaan yleisimpiin muovijätettä muodostaviin polymeerityyppeihin, niiden markkinatilanteeseen, ja sen kehittymiseen. Sen lisäksi käydään läpi, miten muovijäte ja erityisesti mikromuovihiukkaset sijoittuvat meressä eri syvyyksillä ja mikä vaikuttaa eri polymeerityyppien määriin. Läpi käydään myös mikromuoveille kiinnostava ominaisuus, raekoko ja sen merkitys muovihiukkasten sijoittumiseen.

Työssä tutustutaan myös muovijätteen hajoamiseen erityisesti merivedessä, ja meriolosuhteiden aiheuttamiin haasteisiin sekä luonnolliselle ja keinotekoiselle hajoamiselle. Merten puhdistamisen kannalta on tärkeää ymmärtää, mitkä ovat suurimpia haasteita. Työssä käsitellään keinoja kerätä muovi merestä, jonka jälkeen se voitaisiin käsitellä kuten muu muovijäte, ja keinoja tehostaa muovijätteen hajoamista meressä niin, ettei se aiheuta muita ympäristöongelmia.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston materiaalitekniikan laitokselle. Ohjaajani toimi TkT Mikko Kanerva, jonka ohjeet auttoivat erityisesti työni aloittamisessa, ja jonka kannustava palaute työn keskeneräisistä versioista vahvistivat motivaatitani viedä työ loppuun haluamallani tavalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MARKKINAENNUSTEET MUOVEILLE	2
2.1	Käytetyimmät muovit.....	2
2.1.1	Polyesteri (PES)	2
2.1.2	Polyetyleenitereftalaatti (PET).....	2
2.1.3	Polyetyleeni (PE)	3
2.1.4	Polypropyleeni (PP)	3
2.1.5	Polystyreeni (PS).....	3
2.1.6	Polyamidi (PA)	4
2.1.7	Polykarbonaatti (PC).....	4
2.1.8	Polyuretaani (PU).....	4
2.1.9	Polyklooratut bifenyylit (PCB)	5
2.2	Markkinaennusteet	5
3.	MUOVIEEN SIJOUTTUMINEN MERESSÄ.....	8
3.1	Tutkimiskeinot	8
3.1.1	Näytteenotto	8
3.1.2	Näytteiden käsittely.....	9
3.1.3	Näytteistä saatava tieto.....	9
3.2	Muovin tiheyden vaikutus	10
3.3	Muovityyppien sijoittuminen meressä	10
4.	MUOVITYYPPIEN JAKAUMA MERESSÄ.....	12
4.1	Eri muovityyppien jakauma meressä	12
4.2	Raekoon mitattu jakauma muovityypeille.....	13
5.	HAJOAMINEN	15
5.1	Hajoamisen tutkinta.....	15
5.2	Luonnolliset hajoamismekanismit.....	15
5.3	Keinotekoiset tavat muovien hajottamiseksi.....	16
6.	YHTEENVETO	18
	LÄHTEET.....	20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EPM	Polyetyleenipropyleeni
EVA	Etyleenivinyyliasettaatti
HDPE	Suuritiheksinen polyetyleeni
LDPE	Pienitiheksinen polyetyleeni
PA	Polyamidi
PAN	Polyakrylinitriili
PC	Polykarbonaatti
PCB	Polykloorattu bifenyyl
PE	Polyetyleeni
PES, PEST	Polyesteri
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PP	Polypropyleeni
PS	Polystyreeni
PU	Polyuretaani
PVA	Polyvinyliasettaatti
PVC	Polyvinylikloridi
VCE	Polyvinylikloridietyleeni

1. JOHDANTO

Muovit ovat monipuolisuutensa ansiosta ottaneet itselleen haltuun erittäin suuret maailmanlaajuiset markkinat. Ne ovat halpoja ja monilta ominaisuuksiltaan tarpeeksi hyviä korvatakseen monet muut materiaalit. Melkein minkä tahansa teollisuuden ja tuotannon markkinoiden kasvaminen tarkoittaa nykyään myös muovisten raaka-aineiden tuotannon kasvua. Muoveja käytetään joko niiden tuotteiden tuottamiseen tai vähintään pakkausmateriaaleina tuotteille.

Muovien käytön lisääntyminen johtaa myös niistä koostuvan jätteen luontoon päätyminen lisääntymiseen. Luontoon päätyvä muovijäte kulkeutuu yleensä lopulta mereen, jossa se aiheuttaa ongelmia. Pahimpia ongelmia aiheuttavia ominaisuuksia muovissa on se, että se hajoaa hyvin hitaasti luonnollisissa olosuhteissa. Luontoon joutunut muovi on siellä käytännössä ikuisesti, ja sitä kertyy jatkuvasti lisää. Mereen päätyneestä muovijätteestä on tullut maailmanlaajuinen ongelma.

Meri on erittäin altis muovijätteen haitoille useasta syystä. Meri on yleensä viimeinen paikka muovijätteen kiertokulussa, jonne päätynyt jäte ei enää kulkeudu eteenpäin. Monessa maassa olevat tarkat säännöt muovijätteen hävittämiseksi vähentävät muovin aiheuttamaa ongelmaa, mutta meressä muovi kulkeutuu suurimmilta lähteiltä ympäri maailmaa. Meressä myös muovijäte hajoaa pienemmäksi, silmille näkymättömiksi mikromuoveiksi, joiden kokonaismäärää on vaikea arvioida. Lisäksi muovijäte on haitallista myös merieläimille. Merieläinten nielemä muovi jää niiden elimistöön, joka ei pysty sulattamaan sitä, ja muovipakkaukset, kuten muovipussit, aiheuttavat herkästi niitä nielleen eläimen tukehtumisen, ja joskus riittää, että eläin tukehtuu muoviin ilman sen nielemistäkään kietoutumalla siihen. Meressä olevan muovin ongelmana on myös se, ettei täysin tiedetä, kauanko muovijätteen häviämiseen menee, mutta sitä tutkitaan keräämällä tietoa meressä olevan mikromuovijätteen rakenteesta.

Muovijätteen kasvava ympäristöhaitta onkin tehnyt jätteen hävittämistä ja uudelleenkäyttöä kehittävästä tutkimuksesta nopeasti kasvavan tieteenalan. Pelkästään tuoreen muovijätteen kierrättäminen ei kuitenkaan riitä, vaan on ratkaistava myös jo mereen päätyneen muovijätteen aiheuttama ongelma. Uusia keinoja meressä olevan muovijätteen hävittämiseksi tutkitaan erittäin laajasti.

Mikromuovien vaikutus meressä on ajankohtainen ja yllättävän tuore tutkimuksen ala. Paikallisesti tehtyjä tutkimuksia löytyy runsaasti, mutta suurempia meriä kokonaisuutena käsitteleviä tutkimuksia on vain vähän. Työn tavoitteena on tehdä kirjallisuusselvitys merien mikromuovijätteen nykytilasta, tulevaisuudesta ja ratkaisuista.

2. MARKKINAENNUSTEET MUOVEILLE

2.1 Käytetyimmät muovit

Muovi on yleistermi ihmisten öljystä valmistamille polymeerituotteille. Muovijätteen syntyminen ja sen kulkeutuminen mereen riippuu vahvasti siitä, minkälainen polymeeri on kyseessä. Jotkut muoveista aiheuttavat käytön aikana jätettä niistä irtoavien pienten muovihiukkasten muodossa, tai muovin kierrätys tai hävitys voi olla niin vaikeaa ja hyödytöntä, että jätettä ei käsitellä oikein. Muovin kierrättämisen tehokkuuteen vaikuttaa vahvasti, onko kyseessä kerta- vai kestonuovi. Kestomuovit on helppo kierrättää sulattamalla ne ja käyttämällä ne uusiin tuotteisiin. Kertamuovit taas eivät sula, koska ne muodostavat pysyvämpiä kemiallisia sidoksia ja ristosilloittumista. Ne voidaan kuitenkin käyttää uudelleen erilaisiin tuotteisiin, mutta ne voidaan myös polttaa energiaksi.

Myös muovin käyttötarkoitus vaikuttaa siihen, mihin siitä syntynyt jäte päätyy. Kertakäyttöluontoiset tavarat, kuten juomapullot ja muovikassit, tulevat helposti vain poisheitetyiksi eivätkä päädy kierrätykseen tai muuhun tarkoitukselliseen loppusijoitukseensa. Seuraavaksi esitellään meriin päätyvässä muovijätteessä eniten esiintyvät polymeerit.

2.1.1 Polyesteri (PES)

Polyesteri on polymeeri, joka sisältää esteriryhmiä pääketjujen funktionaalisina ryhminä. Yleisin polyestereistä on polyetyleenitereftalaatti. Polyesteriä voidaan käyttää moniin eri sovelluksiin, kuten muovipulloihin, tekstiilituotteisiin, pakkausmateriaalina, renkaissa ja eristeenä. Polyesteri voi olla joko kerta- tai kestonuovi, riippuen siitä, mihin sitä käytetään. Yleisimmin polyesteri on kuitenkin kestonuovi. [1]

Polyesteristä mereen päätyy jätettä kertakäyttötuotteina, kuten muovipulloina ja pakkausmateriaaleina sekä mikromuovihiukkasina. Polyesteristä irtoaa mikromuovihiukkasia esimerkiksi jopa normaalissa kotitaloudessa pesukoneessa pestävistä polyesteri- ja polyesteripuvillavaatteista. Polyesteri on yleinen materiaali vaateteollisuudessa, joten konepesun kautta sitä päätyy suuria määriä vesistöön. [2]

2.1.2 Polyetyleenitereftalaatti (PET)

Polyetyleenitereftalaatti on polyesterin alaryhmä, jossa polymeeriketjua muodostavissa monomeereissä on kaksi esteriryhmää. Polyetyleenitereftalaattia käytetään vaatteissa, neste- ja ruokapakkauksissa, lasikuitukomposiittia tehtäessä ja lämpömuovauksessa, joista yleisin käyttökohde on vaatteiden kuidut, joka vie noin 60 %

polyetyleenitereftalaatista. Polyetyleenitereftalaatti on yksi yleisimmistä käytetyistä kestopuoveista. [3]

Polyetyleenitereftalaatille on sen keksimisestä asti kehitetty monia eri keinoja kierrättää sitä, kuten kemiallinen kierrätys ja PET-glykolyysi. On kuitenkin vielä paljon mahdollisuuksia parantaa sen kierrätystä yhä ympäristöystävällisemmin, niin että kierrätyksestä syntyvät tuotteet ovat kerättävissä ja käytettävissä uudelleen. Tehokkaampien kierrätystapojen löytäminen on tärkeää, sillä suuri määrä PET-jätettä päätyy mereen. [4]

2.1.3 Polyetyleni (PE)

Polyetyleni eli polyeteeni on eteenimolekyyleistä muodostuva polymeeri. Polyetyleni on eniten käytetty polymeeri. Polyetyleni on erittäin monikäyttöinen materiaali, koska muuttamalla polymerisaatiometodia ja käytettäviä katalyyttejä voidaan sen monia ominaisuuksia, kuten tiheyttä ja ristosilloittumisastetta, muuttaa erittäin paljon. Yleensä polyetyleni on kestopuovi, mutta sen ristosilloittamisella se voidaan muuttaa kertamuoviksi, jolloin sen lämmönkesto paranee ja juoksevuus laskee. Erilaisia polyeteenityyppejä jaotellaan niiden tiheyden mukaan. [5]

Polyetyleniä käytetään eniten pakkausmateriaalina, elintarvikepakketeissa ja pinnoitteena. Monipuolisuutensa ja muokattavuutensa vuoksi polyeteenillä on kuitenkin monia muitakin käyttökohteita hyvin erilaisia muoveja vaativista sovelluksista, kuten putkistoissa tai ohutkalvoissa.

2.1.4 Polypropyleeni (PP)

Polypropyleeni on propyleeneistä koostuva polymeeri. Polypropyleeni on hyvin huonosti liuottimiin, happoihin tai emäksiin liukeneva. Se on maailman toiseksi käytetyin kestopuovi.

Polypropyleeniä käytetään pakkausmateriaalina, tekstiileissä, säilytysrasioissa ja laboratoriotarvikkeissa. Sen kestävyys tekee siitä hyvän aineen moneen vaativaan käyttötarkoitukseen. [6]

2.1.5 Polystyreeni (PS)

Polystyreeni on yleinen synteettinen polymeeri, joka on luonnostaan läpinäkyvää. Polystyreeni on kestopuovi, jota käytetään pakkauksessa suojamateriaalina pehmentämässä pakkauksen saamia iskuja, rasioina ja kansina, pulloina, tarjottimina ja kertakäyttöastioina. Esimerkiksi pienet pakkauspehmusteina käytetyt polystyreenikappaleet jäävät helposti kierrättämättä.

Polystyreenipakkausmateriaali on noin 1,2 % Yhdysvaltojen kokonaisjätteestä, ja noin 2–10 % roskista on polystyreeniä. Näin käy siitä huolimatta, vaikka kierrätetylle polystyreenille olisi useita käyttökohteita, kuten eristeinä tai pakkauspehmusteina. [7]

2.1.6 Polyamidi (PA)

Polyamidi on polymeeri, jossa monomeereissä on aminoryhmä ja karboksyylihapo vuorovaikutuksessa keskenään ja monomeerit yhdistyvät toisiinsa amidisidoksin. Niitä muodostuu sekä luonnollisesti että keinotekoisesti. [5]

Käytetyin polyamideista on Nylon, joka on kestonmuovi. Nylonia käytetään vaatteissa, autoteollisuudessa ja elintarvikepakkauksissa. Nylonia päätyy mereen pois heitettynä roskana, vaatteiden pesusta ja kalastusvälineissä käytettävänä nylonlankana. [8, 9]

2.1.7 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatti on kestonmuovi, jossa polymeeri muodostuu karbonaattiryhmiä sisältävistä monomeereistä. Polykarbonaatti on monikäyttöinen muovi, koska se on kestävä, läpinäkyvä, lujaa ja helposti sekoitettavissa muihin polymeereihin. Sen tuotannon kasvu aiheuttaa polykarbonaattijätteen lisääntymistä, ja sen kestävyys on ongelma tämän jätteen käsittelylle ja aiheuttaa ongelmia, koska se hajoaminen luonnollisesti on erittäin hidasta. [10]

Polykarbonaattia käytetään elektroniikkateollisuudessa ja rakennusmateriaalina, ja mereen sitä päätyy esimerkiksi veneiden tuulilaseista ja veteen sijoitettavista biomonitorointilaitteista, sillä merivedelle altistuessaan polykarbonaatista voi irrota mikromuoveja. [10]

2.1.8 Polyuretaani (PU)

Polyuretaanit ovat useimmiten kertamuoveja, mutta ne voivat olla myös kestonmuoveja. Polyuretaanien polymeeriketjuissa monomeerit liittyvät toisiinsa uretaani- eli karbamaattisidoksin, eli sidokset sisältävät karbamiinihaposta muodostuneen sidoksen.

Polyuretaanista valmistetaan eristevaahtoa, sinettejä ja tiivisteitä, kestävyyttä vaativia elastisia rakenteita, kuten renkaita ja jousituksia, liimoja ja pinnoitteita ja synteettisiä kuituja. Polyuretaanivaahtoa päätyy erityisen paljon jätteeksi sen laajan käytettävyyden takia, ja sen kierrättäminen ja hävittäminen ovat pitkälle kehitettyjä prosesseja. Silti suuret määrät polyuretaanivaahtoa sekä sen muita muotoja päätyy jätteenä mereen. [11]

2.1.9 Polyklooratut bifenyylit (PCB)

Polyklooratut bifenyylit ovat orgaanisia polymeerejä, joita käytetään sähkölaitteissa, lämmönsiirtojärjestelmissä ja muissa teollisissa tuotteissa. Sen käyttöä on huomattavasti vähennetty jo usean vuosikymmenen ajan, koska se on myrkyllinen ympäristölle ja sen käyttö onkin kielletty Tukholman sopimuksessa, jonka kuitenkin on allekirjoittanut vain 152 maata [12]. PCB on kuitenkin hyvin pitkäikäinen materiaali, joten sitä on vieläkin laajasti käytössä, ja sen aiheuttaman jätteen käsittely on useassa maassa tarkkaan säädeltyä.

Polyklooratut bifenyylit tiivistyvät vedenpaineen alla, ja vettä raskaampana ne vajoavat syvälle valtameren pohjaan. Tyynenmeren syvimmästä kohdasta, Mariaanien haudasta, on löydetty suuria PCB pitoisuuksia merieläinten elimistössä. [13]

2.2 Markkinaennusteet

Muovijätteen määrä on verrannollinen muovin käytön määrään, sillä mitä enemmän muovia käytetään, sitä enemmän niistä päätyy jätteeksi. Siksi on tärkeää tuntea muovien käytön tilanne markkinoilla, ja markkinoiden ennustettu kehittyminen.

Muovien käyttö on yleistynyt jatkuvasti niiden käyttöön otosta asti, ja niiden käytön kasvu tulee näillä näkymin jatkumaan. Lisääntyvä käyttö erilaisille uusille muovin käyttötarkoituksille ja muovien muiden materiaalien korvaaminen kasvattavat muovin kysyntää. Kuitenkin muovien tärkeimmän raaka-aineen, öljyn, jatkuvasti nouseva hinta ja rajatut lähteet voivat olla eräs syy muovin käytön mahdolliselle vähenemiselle tulevaisuudessa [14].

Muovisten pakkausmateriaalien maailmanlaajuisten markkinoiden ennustetaan kasvavan 370,25 miljardiin dollariin, kun se on ollut 259,65 miljardia dollaria vuonna 2013, jolloin muovin kokonaismäärä markkinoilla oli 78 400 kilotonnia. Tämä olisi noin 43 prosentin kasvu seitsemässä vuodessa. Tämä kasvu johtuu kasvavasta kysynnästä muovisille pakkausmateriaaleille etenkin terveydenhuollon parissa ja elintarvikemarkkinoiden kasvusta. Elintarvikemarkkinat ovat tällä hetkellä suurin muovisten pakkausmateriaalien markkina-alue. Muovipakkauksilla saavutettava pakkausten keveys, kestävyys ja ulkonäkö ovat myös kannustavia tekijöitä muovisten pakkausmateriaalien markkinoiden kasvulle. [15]

Pulloveden markkinoille ennustetaan suurta kasvua, mikä johtaa vesipullojen määrän kasvuun. Markkinatutkimusyhtiö Transparency Market Research ennustaa pulloveden markkinakoon kasvavan 307 miljardiin dollariin vuoteen 2024, sen ollessa 169 miljardia dollaria vuonna 2015. Se olisi noin 82 prosentin kasvu vain yhdeksän vuoden aikana. Kasvun aiheuttaa kasvavat hygieniavaatimukset mutta niihin riittämätön infrastruktuuri, joten pullovesi on helppo keino saada puhdasta vettä, kun vesijohtovesi ei täytä

puhtausvaatimuksia. Yleinen tulotason ja elintasovaatimusten nousu kehittyvissä maissa erityisesti Aasiassa, Latinalaisessa Amerikassa ja Itä-Euroopassa vaikuttavat pulloveden kasvavaan kysyntään. [16]

Polypropyleenin kulutus oli vuonna 2013 maailmanlaajuisesti 55 miljoonaa tonnia josta sen markkinatutkimuslaitos Ceresana ennusti käytön kasvavan 86 miljoonaan vuoteen 2021 mennessä. Polypropyleenin käytön kasvamisen syinä ovat uusien käyttösovellusten kehittäminen, biopohjaisten polypropyleenien kehittyminen ja muiden materiaalien korvaaminen polypropyleenillä. Sen käytön oletetaan kasvavan erityisesti Kiinassa ja Intiassa. [17]

Zion Market Research ennustaa rakentamisessa käytettävien kylmäeristeiden maailmanlaajuisen markkinoiden kasvamista vuodesta 2015, jolloin markkinoiden koko oli 3,5 miljardia dollaria, vuoteen 2021 mennessä 5,4 miljardiin dollariin, joka tarkoittaisi 54 prosentin kasvua vain kuudessa vuodessa. Kylmäeriteinä käytetään esimerkiksi lasikuitua ja polyuretaani- ja polystyreenivaahtoa. Kylmäeristeiden markkinoiden kasvu johtuu rakennusteollisuuden lisääntymisestä, mutta toisaalta raaka-aineiden arvaamattomat hinnannuutokset voivat vaikuttaa eristemarkkinoiden kasvuun muuttuessaan huomattavasti. [18]

Polyamidin markkinakasvu johtuu suurimmaksi osaksi polyamidisten materiaalien käytön lisääntymisestä konetekniikassa. Polyamideilla on myös suuri osuus tekstiiliteollisuuden sovelluksissa, mutta sen kasvu on hitaampaa markkinoiden kyllästyneisyyden takia. Polyamidien markkinoiden suuruus, kun tekstiiliteollisuutta ei oteta huomioon, oli 20,5 miljardia dollaria vuonna 2013, ja sen ennustetaan kasvavan vuoteen 2020 mennessä 30 miljardiin dollariin. Kasvu johtuu polyamidimateriaaleja vaativien auto-, energia-, ja elektroniikkateollisuuksien kasvusta. Vaikka Pohjois-Amerikka ja Länsi-Eurooppa ovat tärkeimmät alueet polyamidimarkkinoilla, on Kiina suurin yksittäin maa markkina-alueena, ja se on nopeimmin kasvava markkina-alue. [19]

Vuonna 2015 polykarbonaattimarkkinat olivat maailmanlaajuisesti noin 15 miljardin dollarin kokoiset, ja niille ennustetaan tasaista kasvua ja saavuttavan noin 25 miljardin dollarin markkinakoon vuoteen 2024 mennessä. Yhdysvalloissa polykarbonaattimarkkinat olivat tällöin noin 2 miljardia, ja niiden odotetaan kasvavan noin 3 miljardiin dollariin vuoteen 2024 mennessä, eikä Yhdysvaltojen oleteta olevan polykarbonaattimarkkinoiden suurin nousija tulevina vuosina, vaan nousun ennustetaan keskittyvän Aasian kasvaviin teollisuusmaihin, kuten Kiinaan. [20] Polykarbonaatti on kuitenkin erittäin hyvin kierrätettävissä, ja sen kierrättäminen on tuottoisa liiketoimi.

Muovin markkinakasvua hidastaa monissa valtioissa käyttöönotettu muovipusseja koskeva vero tai maksu, jonka tarkoituksin on vähentää muovipussien käyttöä. Tämä on suora vastaus muovijätteen aiheuttamalle ympäristö haitalle. Muovipussit päätyvät

useimmiten yhden käytön jälkeen jätteeksi. Asettamalla ylimääräinen maksu vähennetään muovipussien käyttöä, joten niiden valmistaminen vähenee. [21]

Kierrätetyn muovin markkinaosuus on kasvanut tasaisesti viime vuosien aikana. Tämä kasvu johtuu pääosin hiilipäästöjen haitan ja muiden ympäristöhaittojen tiedostamisen noususta. Siitä johtuen maailman teollistuneimmissa maissa on asetettu rajoituksia muovijätteelle sen rajoittamiseksi, jolloin kierrättämisestä on tullut kannattavampaa. Myös kierrätysmenetelmien tehokkuuden kehittyminen on tärkeänä syynä tälle kasvulle. Vuonna 2015 kierrätetyn muovin markkinakoko oli 32,5 miljardia dollaria ja sen ennustetaan kasvavan vuoteen 2024 mennessä 56,8 miljardiin dollariin. [22]

Yhteenvedona muovien markkinoista voidaan sanoa, että kasvua ennustetaan laajasti monille muovityypeille käyttötarkoituksesta riippumatta. Myös muovijätettä pahiten aiheuttavien muovituotteiden markkinat näyttävät vain kasvavan hyvin paljon seuraavan vuosikymmenen aikana. Vaikka yhtä pahimmista muovijätelähteistä, muovipussia, pyritään rajoittamaan ylimääräisin veroin tai kokonaan kieltämällä, ovat muovipussit vain osa ongelmaa, ja muiden mereen päätyviä muoviroskia aiheuttavat muovimarkkinat jatkavat kasvuaan. Muovimarkkinoiden kasvaessa kuitenkin myös kierrätettävän materiaalin merkitys kasvaa, ja sen vuoksi juuri kierrätettävän muovin markkinakoko tulee kasvamaan huomattavasti.

3. MUOVIEEN SIJOUTTUMINEN MERESSÄ

3.1 Tutkimiskeinot

Muovijätteen kokonaisvaikutuksen ymmärtämiseksi ei riitä vain näkyvän jätteen tutkiminen, koska muovista tulee myös mikromuovijätettä jota ei silmillä voi havaita. Mikromuovijätteen tutkimiseksi on monia keinoja. Muovijätteen tutkimiseksi on myös tärkeä tutkia monia eri kohteita, kuten merivettä eri syvyyksiltä, merenpohjaa ja merieläimiä, jotka ovat saattaneet niellä muovihiukkasia tai –kappaleita. Parhaan mahdollisen kokonaiskuvan saamiseksi mikromuovien vaikutuksesta ovat monet tutkimukset keskittyneet selvittämään mikromuovien määrää, mutta niiden sijoittumista ja ajallista esiintymistä on vaikea vertailla tutkimusten kesken johtuen erilaisista metodeista. [23]

Muovijätteen määrän tutkimista vaikeuttaa kuitenkin meren jatkuva liike ja vaihtelevat olosuhteet. Vuorovesien vaihtelu aiheuttaa rannasta kerättäville maanäynteille vaihtelevuutta, ja vertailukelpoisten näytteiden pitäisikin olla kerätty samoissa vuoroveden vaiheissa. Merivirrat liikuttelevat vettä suuria määriä, joten muovijätteen alkuperän määrittäminen ei aina ole mahdollista vain löytöpaikan perusteella. Merivirta voi myös viedä muovijätettä pois alueelta ja aiheuttaa sen kasaantumista toisaalle, joten paikallisesti suoritettu tutkimus voi antaa väärän vaikutelman alueesta. Merivirrat kuitenkin tunnetaan hyvin, ja yhdistämällä tämä tuntemus saatuihin tuloksiin voidaan päätellä muovin liikehdintä. Ongelman aiheuttaa myös meren suuri koko ja suhteellinen tutkimattomuus. Meren syvimät pohjat ovat vaikeasti tutkittavissa, mutta tuore tutkimus on osoittanut vasten aiempia oletuksia, että mikromuovijätettä löytyy jopa Mariaanien haudasta, eli syvimästä tunnetusta merenpohjasta [13]. Lisäksi jos muovijäte hautautuu syvälle pohjasedimenttiin, se voi olla vaikea huomata muuten kuin varta vasten pohjaa syvemältä tutkimalla.

3.1.1 Näytteenotto

Mikromuovien esiintyminen erilaisissa yhteyksissä meressä vaati erilaisia näytteitä, jotta saadaan tietoa kaikista esiintymismuodoista. Näytteitä voidaan kerätä valikoimalla selkeästi kiinnostavia kohteita, kuten kohdistamalla näytteenotto siihen missä näkyy muovijätettä, tai bulkkinäytteitä ottamalla, jos ei ole silmällä havaittavaa muovia ja mikromuovipitoisuus on pieni. Bulkkinäytteestä voidaan tehdä myös pienennetty otanta säilyttämällä vain kiinnostavat osat siitä. Näytteitä kerätään merivedestä ja meren sedimentistä. Merivedestä kerättävät näytteet voidaan kohdistaa tiettyyn osaan, kuten ottamalla näyte pinta vedestä tai tietyn syvyyksistä vesipatsaista. Sedimenttinäytteitä

voidaan tutkimustarkoituksen mukaan kohdistaa esimerkiksi rantaan tai merenpohjan sakkaan. [23]

Näytteiden kerääminen merieläimistä on myös tärkeää, koska merieläinten nielemä mikromuovimäärä kuvaa tilannetta hyvin. Merieläimet ovat usein myös muovijätteen lopullinen sijoittumispaikka, kun niihin jää niellystä merivedestä muovijäämiä elimistöön, ja se jää eläimen elimistöön eikä kulkeudu eteenpäin. Eläimiin päätyvän muovijätteen määrän tunteminen on tärkeää myös ihmisten kannalta, koska niiden kautta muovijäte voi päätyä myös ihmisten ruokavaliioon. Muovin esiintymistä merieläinten elimistössä tutkitaan pyydystettyjen eläinten mahalaukkuja tutkimalla. Usein tutkimuskohteina käytetään kalastusalueiden vahingossa pyydystämiä, ei ruokatuotantoon meneviä eläimiä. Näin saadaan tietoa tietyn merialueen eläinten nielemistä muovimääristä, mutta tieto juuri ihmisten syömien lajien muovipitoisuuksista jää hieman puutteelliseksi. [24]

3.1.2 Näytteiden käsittely

Laboratoriossa näytteet käsitellään tutkimusta varten niin että niistä voidaan mitata tarvittavat tiedot. Muovien tiheydet vaihtelevat suuresti erilaisten polymeerien välillä. Sedimentissä oleva hiekka on kuitenkin tyypillisesti muoveja tiheämpää, ja tätä voidaan hyödyntää muovihiukkasten erittelyssä hiekasta. Ravistelemalla sedimenttinäytettä liuoksessa pienemmän tiheyden muovihiukkaset jäävät pinnalle ja hiekka tai muu sedimenttiaines vajoaa pohjalle, ja pinnalle nousevasta liuoksesta voidaan kerätä muovihiukkaset. Liuoksena voidaan käyttää esimerkiksi suolapitoisia liuoksia kuten merivettä tai kylläistä natriumkloridiliuosta, joiden tiheydestä riippuu se, minkä tyyppiset polymeerit nousevat pintakerrokseen.

Suodatuksella eritellään tiheuseritellystä liuososuudesta muovihiukkaset. Se tehdään esimerkiksi imusuodatuksella ja suodatinpaperilla. Eritellyn liuososuuden siirtäminen suodattimeen on tärkeää tehdä kvantitatiivisesti, eli niin, ettei edelliseen astiaan jää tutkimuksen kannalta tarvittavaa liuosta. Ennen suodatusta on hyvä myös siivilöidä liuos eri kokoisilla siivilöillä, niin saadaan eroteltua eri kokoisten mikromuovien määrä. Siivilöiden ja suodattamalla saadusta sakasta vielä erotellaan visuaalisesti havainnoimalla kaikki materiaali joka ei ole muovia, kuten orgaaninen materiaali ja mahdolliset muut roskat, kuten metalli ja lasi. [23]

3.1.3 Näytteistä saatava tieto

Käsitellyistä näytteistä saatavaa tietoa käytetään tunnistamaan meressä olevien muovien ominaisuuksia ja mitä eri muovityyppejä löydettiin, sekä niiden määrää ja miten erilaiset muovityypit ja muovihiukkasten koko vaikuttavat niiden sijoittumiseen meressä. Myös merieläinten nielemästä muovimäärästä tiedon kerääminen on monen tutkimuksen tavoitteena. [23]

Muovin pitkäikäisyyden ja hitaan hajoamisen vuoksi myös meressä esiintyvän muovijätteen ikä on eräs kohde, josta halutaan tietoa. Useimmat muovityypit ovat hyvin vastustuskykyisiä ikääntymiselle ja biologiselle hajoamiselle. Siksi muovijätteen iän määrittäminen voi olla hankalaa, ja se voi olla meressä hyvin pitkään ennen kuin minkäänlaista ikääntymistä voidaan todeta. Todellista hajoamisaikaa muovijätteelle ei tiedetä. Tietoa muovin iästä saadaan tutkimalla hajoamistasoa, eli sitä kuinka pieninä osina muovijäte esiintyy. [25]

Muovijätteen kerääntymiskohteet ovat tärkeä tietää, jotta saataisiin tarkka kuva siitä, mihin jäte vaikuttaa eniten. Näytteiden tutkimisella saadaan tietoa siitä, missä on eniten eri tyyppisiä muovijätteitä. Jätteen tyyppi, koostumus ja keskittymät vaihtelevat eri sijaintien välillä, ja niiden hajoamisnopeus vaihtelee paikasta toiseen. Hajoamisnopeuden lisäksi myös kertomisnopeus kiinnostaa tutkimuksissa, sillä niistä saadaan yhdessä tietoa siitä, kuinka paljon luonnollinen hajoaminen pystyy tasapainottamaan kertymistä. Tutkimusta tehdessä usein halutaan selvittää mikä vaikuttaa muovijätteen sijoittumiseen meressä.

3.2 Muovin tiheyden vaikutus

Muovin hajotessa meressä sen muodostavan polymeerin ketju hajoaa, jättäen jäljelle pienempiä polymeerejä. Pienimmiksi osikseen hajonneet ketjut ovat ympäristön elimistölle kelpaavia, ja ne häviävät lopullisesti. Niin pieniksi osiksi muovilla on kuitenkin pitkä matka, ja meressä esiintyykin paljon eri hajoamisvaiheessa olevaa muovijätettä, jossa esiintyy monia eriä tiheyksiä. Eri tiheyksistä koostuvat muovit sijoittuvat eri lailla, ja esiintyvistä tiheyksistä ja sen jakaumasta voidaan päätellä mikromuovijätteen ominaisuuksia.

Muovit ovat kevyitä materiaaleja, ja suurin osa käytettävistä muoveista ovat tiheydeltään merivettä pienempää, joten ne kelluvat pinnalla. Jotkut muovit kuitenkin ovat tiheämpää kuin merivesi, kuten PVC, ja ne uppoavat meressä. Muovin tiheys ei ole ainoa tekijä, joka vaikuttaa sen kelluvuuteen. Kun muovi biohajoaa, siihen kerääntyy hajoamista aiheuttavia organismeja, joten jotkut vettä kevyemmät muovit, kuten polyetyleni, vajoavat merivedessä. Kappaleen koolla ei ole vaikutusta kellumiseen, joten mikromuovit sekä kelluvat ja uppoavat muovityypistä riippuen. Pienemmiksi hiukkasiksi hajotessaan muovilla on kuitenkin enemmän pinta-alaa tilavuutta kohden, joten siihen on mahdollisuus kerääntyä enemmän organismeja nostaen sen painoa enemmän. [26]

3.3 Muovityyppien sijoittuminen meressä

Muovityypistä riippuen muovin tiheys vaihtelee, mikä vaikuttaa muovin sijoittumiseen vesipatsaassa tai meren pohjaan. Seuraavassa taulukossa esitellään muutaman muovityypin tiheys ja niiden kelluvuus merivedessä. Meriveden tiheys on $1,02\text{--}1,03\text{ g/cm}^3$.

Taulukko 1. Erilaisten muovityyppien tiheys ja kelluvuus [26].

Muovityyppi	Tiheys (g/cm^3)	Kelluvuus
HD-PE	0,96	kelluu
LD-PE	0,925	kelluu
EVA	0,95	kelluu
PP	0,91	kelluu
PVC	1,44	ei kellu
PS	1,05	ei kellu
PU	1,20	ei kellu
PET	1,38	ei kellu

Tässä taulukossa on otettu huomioon muovityyppien kelluvuus nimenomaan puhtaina, sillä muovin hajoamista aiheuttavat organismit voivat lisätä painoa kerääntyessään kappaleeseen, tehden siitä näin raskaampaa, jolloin se ei ole enää kelluvaa. Myös lisäaineet nostavat polymeerin tiheyttä. Uppoavat mikromuovit hautautuvat merenpohjaan tai rannalle. Merivirrat ja vuorovedet voivat kuljettaa uppoaviakin muovihukkasia pitkiä matkoja, ja näin ne päätyvät syvimpiinkin merenpohjiin.

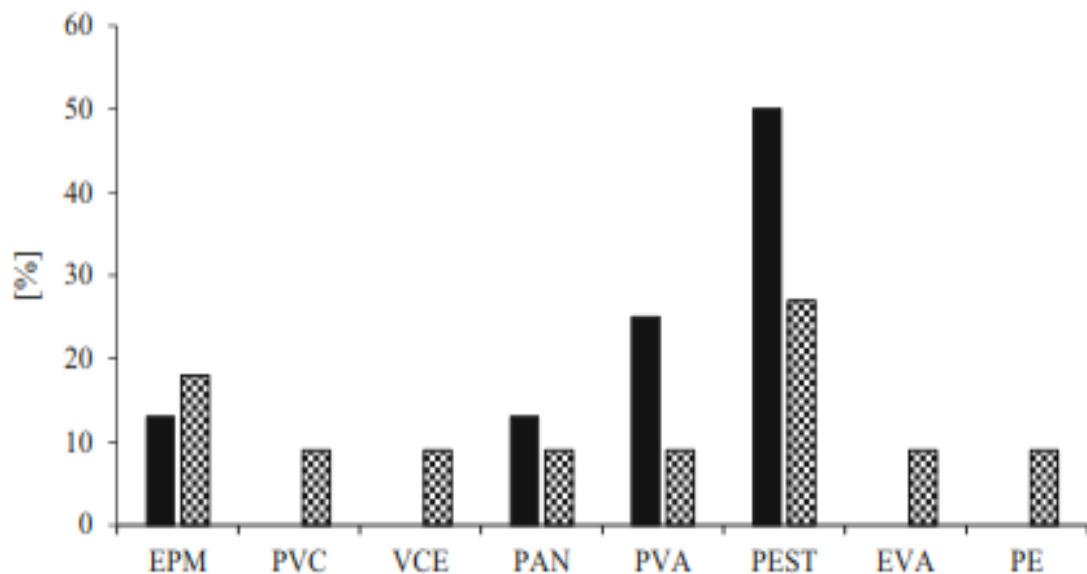
Yli puolet tuotetusta muovista on tiheydeltään pienempää merivesi. Siksi suuri osa mereen päätyvästä muovijätteestä jää meren pintakerrokseen kellumaan. Erityisesti polypropyleeniä ja polyetyleniä tuotetaan vuosittain niin paljon, että pinnalle kellumaan jäävä muovijäte on määrältään suurempi kuin uppoava muovijäte. Hajoamisprosessiin liittyvien mikrobien takia tapahtuva painon nousu kuitenkin lopulta aiheuttaa meressä pitempään olleiden kevyempienkin polymeerien vajoamisen syvemmälle. Tästä johtuen kevyempiäkin polymeerityyppejä löytyy myös meren pintakerrosta syvemmältä, jopa pohjasta asti.

4. MUOVITYYPPIEN JAKAUMA MERESSÄ

4.1 Eri muovityyppien jakauma meressä

Mikromuovin sijoittuminen meressä riippuu muovin tyypistä ja tiheydestä, ja esiintymistiheys vaihtelee meren eri alueiden välillä huomattavasti. Mikromuovia päätyy kuitenkin sen tyypistä riippumatta aina myös rannalle. Vuonna 2004 Plymouthissa, Isossa-Britanniassa suoritetussa tutkimuksessa rannoilta kerätyistä näytteistä löydettiin montaa eri mikromuoveja. Löytyneet mikromuovit olivat akryyli, alkydi, polyetyleni, polyamidi, polyesteri, polypropyleeni ja polyvinyylialkoholi [27].

Vuonna 2017 tehdyssä tutkimuksessa eteläisellä Baltian merellä kerätyssä datassa erilaisten polymeerityyppien prosentuaalinen osuus rannalla ja merenpohjassa. Tutkimustuloksista tehdyssä taulukossa näkyy polyesterillä (PEST) olevan huomattavasti suurin osa muovista. Osa muoveista, kuten polyvinyylidikloridietyleeni (VCE) ja polyetyleenivinyylisetaatti (EVA) sijoittuvat ainoastaan rannoille. Rannoille jäävät polymeerit ovat kaikki paitsi polyetyleni (PE) tiheydeltään suurempia kuin merivesi.



Kuva 1. Polymeerityyppien jakauma merenpohjassa mustin pylväin ja rannalla valkoruutuisin pylväin. [28]

Pelkästään rannoille sijoittuvat polymeerityypit ovat käyttökohteiltaan sellaisia, että ne ovat päivittäiskäytössä ihmisillä, kuten polyesteri ja PVC vaatteissa, ja polyetyleenivinyylisetaatti esimerkiksi urheiluvälineissä. Näin ne päätyvät helposti jäteveeteen. Rantojen muovijätepitoisuuden onkin havaittu olevan suoraan yhteydessä ihmisten läheisyyteen [29]. Siitä johtuen jäteveeteen pääsääntöisesti päätyvät muovityypit painottuvat enemmän rannoille kuin syvemmälle meren pohjaan.

Vuonna 2015 Etelä-Korean rannikolla tehdyssä tutkimuksessa kerättiin tietoa siitä, mitä eri polymeerityyppejä merivedestä löytyy. Tutkimuksessa haluttiin selvittää

polymeerityyppien jakaumaa. Tutkimuksista saaduista tuloksista taulukoitiin löytyneiden polymeerihiukkasten määrä litraa kohti.

Taulukko 2. Etelä-Korean rannikolta löytyneiden eri polymeerityyppien määrä [30].

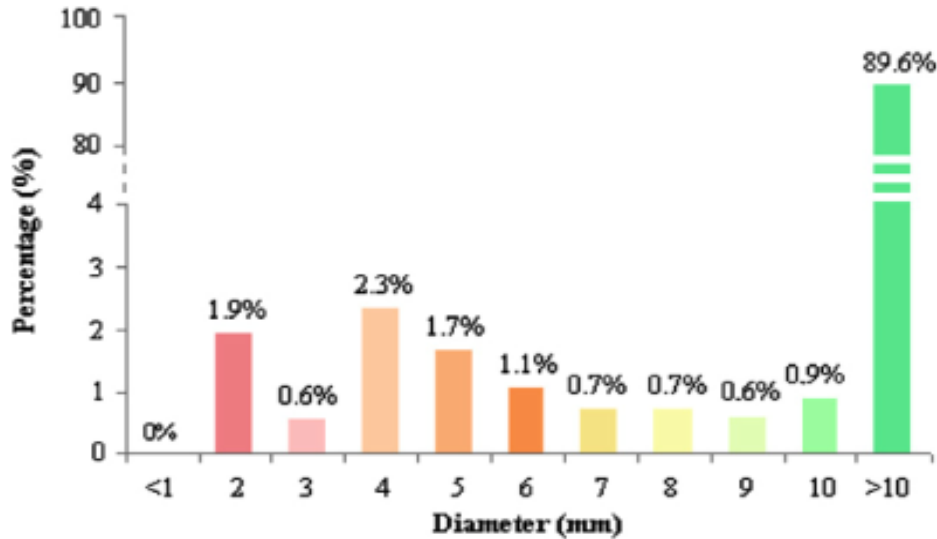
Polymeerityyppi	Määrä (hiukkasta/litra)	Osuus (%)
Alkyydi	64	35
Poly(akrylaatti-styreeni)	29	16
Polypropyleeni	15	8,2
Polyetyyleeni	15	8,2
Epoksi	10	5,6
Polystyreeni	9,4	5,2
Polyesteri	8,6	4,7
Synteettinen kumi	0,6	0,3
Muut	30	16

Eniten löytyneet polymeerit, alkyydi ja poly(akrylaatti-styreeni) ovat peräisin laivoista: alkyydiä käytetään sideaineena laivojen maalissa ja poly(akrylaatti-styreeni) on kuituvahvistettu muovi, jota käytetään laivojen rakentamisessa.

4.2 Raekoon mitattu jakauma muovityypeille

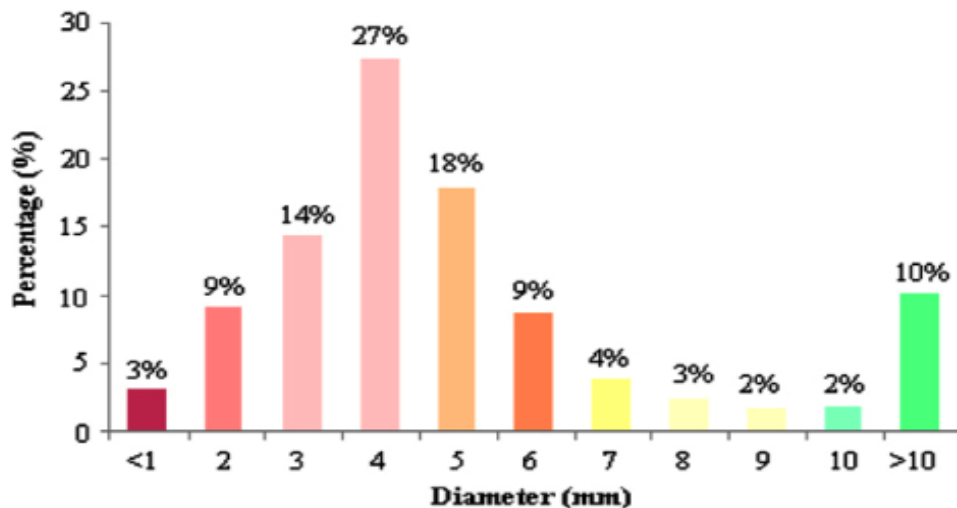
Mikromuovina pidetään muovihiukkasia jotka ovat halkaisijaltaan alle 5 millimetriä. Pienimmät muovihiukkaset, joita merestä on löytynyt ovat halkaisijaltaan 1,6 mikrometriä [31].

Vuonna 2011 tehdyssä tutkimuksessa Portugalin rannikolla kerättiin näytteitä rantahiekasta kahden senttimetrin paksuisina kerroksina. Näytteistä löytyneet muovikappaleet ja -hiukkaset lajiteltiin koon mukaan. Mikromuovihiukkasia oli kappalemäärältään huomattavasti eniten. Alle 5 millimetriä halkaisijaltaan olevien kappaleiden lukumäärä oli 72 prosenttia kaikista muovikappaleista. Tutkimuskohteina olleilta rannoilta löydettiin keskimäärin 925 muovikappaletta neliometriä kohden. Tämä muovimäärä on suhteellisen korkea, ja sen suuruus on yhteydessä näytteiden keräämisajankohdan ja korkean vuoroveden yhteen osumiseen, sekä merivirtojen ja rantojen keskinäiseen sijoittumiseen. Myös asutuksen läheisyys vaikutti muovimäärään selkeästi sitä nostaen, mitä lähempänä rantaa asutus oli. [29]



KUVA 2. Painojakauma löytyneiden muovihiukkasten kokoluokille. [31]

Lähes 90 prosenttia muovijätteen massasta oli yli 10 millimetrin halkaisijaltaan olevilla kappaleilla. Suurin osa muoveista oli polyetyleenä, polyesterinä tai polystyreeninä. Näille muoveille onkin tyypillistä päätyä luontoon runsaasti hyvin pieninä hiukkasina. Kuvan 2 painojakauma on luonnollisesti painottunut isoille kappaleille, koska suuret kappaleet painavat enemmän. Mikromuovikappaleiden määrän tarkastelemiseksi on kuitenkin mahdollista käyttää toisenlaista kuvaaja, jossa näytetään kappalemäärien jakauma raekoon mukaan.



KUVA 3. Eri raekokojen jakauma kappalemäärien mukaan. [31]

Kuvasta 3 nähdään kuinka mikromuovit kattavat 71 % kerättyjen muovikappaleiden määrästä. Tämä kuvaa hyvin mikromuovien aiheuttamaa ongelmaa, eli kuinka nämä mikromuovihiukkaset jäävät helposti huomiotta niiden ollessa vain pieni osa näkyvää ongelmaa, mutta todellisuudessa niiden vaikutus meressä on suurempi kuin isojen muovikappaleiden.

5. HAJOAMINEN

5.1 Hajoamisen tutkinta

Muovien hajoaminen on kemiallinen muutos muoveja muodostavassa polymeerissä, jossa pitkä polymeeriketju hajoaa pienemmiksi ketjuiksi. Polymeeriketjun moolimassa pienenee sen hajotessa, ja sen myötä myös polymeerin mekaaninen kestävyys heikkenee. Polymeerit voivat hajota bioottisesti ja abioottisesti.

Mittaamalla polymeerien ominaisuuksien muuttumista, kuten painon, vetolujuuden ja pinnan ulkonäön muuttumista. Näiden tutkimiseen käytettäviä keinoja ovat esimerkiksi paisuntakoe, mikroskopia ja differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria.

5.2 Luonnolliset hajoamismekanismit

Muovien luonnollinen hajoaminen on erittäin hidasta. Luonnollinen hajoaminen muoville alkaa valon aiheuttamasta hajoamisesta, fotolyysistä. UV-valo aiheuttaa korkealla energiallaan happiatomien reagoimisen polymeerimolekyylien kanssa. Fotolyysin nopeus riippuu muovityypistä, ja usein muovit sisältävät lisäaineita joiden tarkoitus on juurikin estää tai estää auringonvalon aiheuttama hajoaminen. Myös merivesi hidastaa fotolyysiä, koska vesi ei päästä kaikkea säteilyä läpi ja sen kylmyys hidastaa reaktiota, sekä vähentää saatavilla olevan hapen määrää. Fotolyysi aiheuttaa muovin rakenteellista heikkenemistä ja hajoamista pienemmiksi paloiksi, kunnes polymeeriketjut ovat pienentyneet tarpeeksi pieniksi mikro-organismien kulutettavaksi. [32]

Polymeerit hajoavat luonnostaan myös termo-oksidiivisesti. Korkea lämpötila voi aiheuttaa polymeeriketjun rikkoutumisen ja niiden reagoimista keskenään. Polymeeristä irtoaa vetyatomeja lämpöenergian takia ja polymeeristä tulee epävakaata ja reaktiivista. Vedyn luovuttanut polymeeri reagoi hapen kanssa, ja hapen kanssa reagoanut polymeeri aiheuttaa vedyn irtoamisen toisesta polymeeriketjusta. Näin tapahtuvasta hajoamisesta muodostuu yleensä monomeerejä, kaasuja ja vettä. Termo-oksidiivisen hajoamisen vaatima lämpötila vaihtelee polymeerikohtaisesti, ja mitä helpommin vety irtoaa polymeeriketjusta, sen alempi lämpötila vaaditaan. Useimmille polymeereille vaaditut lämpötilat ovat niin korkeita, että tämä termo-oksidiivinen hajoaminen on hidasta luonnossa. [31]

Luonnossa tapahtuu myös polymeerien hydrolyyttistä hajoamista. Hydrolyysi on aineenhajoamista takaisin rakennusaineikseen vedessä. Hydrolyysinopeus riippuu polymeerisidosten, veden ja hydrolyysituotteiden määrästä. Hapot toimivat hydrolyysin katalyyttinä, joten joistakin polymeereistä vapautuvat happamat yhdisteet, kuten karboksyyliiryhmät nopeuttavat hydrolyyttistä hajoamista. Hydrolyysin kautta hajoamista

esiintyy erityisesti laboratorio-olosuhteissa suoritettavissa hajoamistutkimuksissa yhdistettynä oksidatiiviseen hajoamiseen, kun taas luonnossa tehdyissä tutkimuksissa oksidatiivinen hajoaminen on selkeästi hallitseva hajoamisen muoto, eikä hydrolyyttistä hajoamista juurikaan esiinny. [34]

Bioottinen hajoaminen tapahtuu yleensä vasta abioottisen hajoamisen jälkeen, sillä siinä syntyvät pienemmät muovihiukkaset ovat alttiita biohajoamisen keinoille. Pienet muovihiukkaset voivat läpäistä niitä hajottavan mikrobin solukalvon, jonka sisällä mikrobin entsyymit hajottavat polymeeriketjua. [35]

Merivedessä kaikki nämä hajoamiskeinot voivat tapahtua, mutta kaikki hajoamistyytit eivät vaikuta kaikkiin polymeerityyppeihin. Esimerkiksi polyetyleni, polypropyleeni, polyvinyylidikloridi ja polystyreeni hajoavat eniten fotolyysin kautta. Polyetyleni hajoaa myös hyvin biohajoamisen kautta ja polypropyleeni hieman huonommin. Polystyreeni ja polyvinyylidikloridi taas hajoavat paljon huonommin, johtuen niissä käytettävästä suuresta määrästä lisäaineista ja suuremmasta molekyylimassasta. Polyetylenitereftalaatti hajoaa kaikkien abioottisten hajoamistapojen avulla, mutta niistä merkittävimmät sille ovat fotolyysi ja hydrolyysi. Polyuretaani hajoaa parhaiten fotolyysillä ja biohajoamisella. [35]

5.3 Keinotekoiset tavat muovien hajottamiseksi

Muovijätteen keinotekoisesti hajottaminen on yhä kasvavan muovijättemäärän kannalta tärkeä kehityskohde. Luonnollinen hajoaminen ei yksinkertaisesti riitä käsittelemään kaikkea muovijätettä minkään järkeväen aikamääreen puitteissa. Muovijätteen käsittelyyn on olemassa jo monia keinoja. Suuri määrä muovijätteestä menee kierrätykseen. Vuonna 2014 suomessa kierrätettiin 57,4 prosenttia muovista, kun koko EU:n alueella kierrätettiin 65,5 prosenttia. [36]. Mereen joutuneen muovijätteen keinotekoisesti hajottamisen tekee kuitenkin vaikeammaksi sen leviäminen mereen, josta se pitäisi kerätä, jotta se voitaisiin käsitellä kuten suoraan kierrätettäväksi vietävä muovi. Lisäksi muovijäte on levinnyt merissä hyvin laajalle ja syvälle, ja toisaalta mikromuovihiukkasten kerääminen on hankalaa, koska niitä ei silmällä havaitse. Siksi pitää kehittää keinoja, joilla muovi voidaan hajottaa suoraan meressä niin, että siitä ei jää haitallisia aineita ympäristöön. Tätä vaikeuttaa taas muoviin lisättävät useat lisäaineet, jotka voivat olla muovista irrotessaan ympäristölle haitallisia.

Jäteveden käsittelyssä on otettu käyttöön muutamia keinoja muovijätteen erottamiseksi vedestä, ja näin estämällä sen päätyminen mereen. Erityisesti mikromuovien erottamiseen on kiinnitetty huomiota, koska sen erottaminen vedestä on huomattavasti monimutkaisempaa kuin suurempien kappaleiden. Eräs käytössä oleva keino mikromuovien erottamiseksi hyödyntää tiheyseroja. Siinä nostetaan jäteveden tiheyttä liuottamalla siihen suoloja, kuten natriumkloridia tai sinkkikloridia, jolloin tiheys voi nousta jopa $1,7 \text{ g/cm}^3$. Näin tätä kevyemmät hiukkaset nousevat pintaan ja ne voidaan

helposti erotella. Toinen keino nousuvirtaliettäminen, jossa kaasua tai nestettä suunnataan virtaamaan ylöspäin, jolloin virtaus vie uppoavat hiukkaset mukanaan pinnalle, josta ne saadaan kerättyä. Näiden erottelukeinojen soveltaminen suoraan meressä olevaan muovijätteeseen ei onnistu, mutta niitä voisi soveltaa muotoon, jossa ne sopisivat meriveden puhdistamiseen. [37]

Ihmisten tuottamaa hydrofobista materiaa, kuten polyetyleenä, polypropeenä tai polyetyleenitereftalaattia, voidaan poistaa merestä hyödyntämällä niiden kykyä sitoutua niitä keräämään tarkoitettuun yksikköön ja jäädä kiinni silikageeliin, joka helppo erottaa merivedestä. [37]

Erottelun jälkeen muovijäte vietäisiin kierrätettäväksi samalla tavalla kuten suoraan kierrätettäväksi tuotu muovi. Kierrätysprosessia häiritsee polymeerien pilaantuminen, jota tapahtuu aina niille käytössä ja sen jälkeen, mutta meressä ne altistuvat saastuttaville olosuhteille normaalia enemmän. Pelkästään vesi aiheuttaa saastumista, mutta merivedessä on myös muita saastuttavia tekijöitä, kuten polttoainetta ja hyönteismyrkkyjä. Polymeerijätteen puhdistuminen tapahtuu esimerkiksi silppuamalla se pieneksi. Jätesilppu puhdistetaan ylimääräisistä kappaleista, kuten etiketeistä ja liasta, pesemällä se vedellä. Pesty jäte voidaan sentrifugoida, jolloin saadaan poistettua epäpuhtauksia. Tämän tyyppisellä prosessilla saadaan eroteltua halutut, kierrätettävät polymeerit käyttöä varten. Puhdistamisen jälkeen monet polymeerit voidaan sulattaa ja ottaa uudestaan käyttöön. Kierrättämiseen kelpaamattomat polymeerit voidaan hävittää lähes aina polttamalla. [4]

Eräs mahdollinen ratkaisu mikromuovijätteen tuhoamiseksi on mikromuoveja tuhoavien mikro-organismien hyödyntäminen. Mikro-organismit ovat jo nyt tärkeässä osassa muovien biohajoamisessa, mutta niiden ongelmana on se, että ne tarvitsevat tarpeeksi pieniä muovikappaleita hajottaakseen niitä. Tutkimalla mikro-organismien muodostumista, rakennetta ja toimintaa muovijätteen yhteydessä voitaisiin löytää keinoja parantaa niiden tehokkuutta. Mikrobien hyödyntämisestä ja parantelusta ei kuitenkaan ole vielä paljoa onnistuneita esimerkkejä, joten tämä alue tarvitsee lisää tutkimusta. Erityisesti tutkimus mikrobien kykyyn tuhota mikromuoveja nimenomaan luonnollisessa ympäristössään ja mikrobien ja mikromuovien vuorovaikutukseen voisi auttaa arvioimaan mikrobien mahdollista potentiaalia muovijätteen lopullisessa hajottamisessa. Vuonna 2011 suoritetussa tutkimuksessa selvitettiin parannellun bakteerikannan kykyä hävittää polykloorattuja bifenyylejä merenpohjan sedimenttikerroksessa laboratorioolosuhteissa. Parannellut bakteerit toimivat PCB:n hävittämisessä luonnollista bakteerikantaa paremmin, mutta tutkimuksessa käytettyjen paranneltujen bakteerien toiminta luonnollisissa olosuhteissa on epävarmaa. Mikrobien keinotekoinen hyödyntäminen muovijätteen hävittämiseen olisi toimivaksi osoittautuessaan erittäin hyvä ratkaisu, koska silloin ympäristöön ei tarvitsisi päästää mitään sinne kuulumatonta, koska käytössä olisi vain mikrobeja, joita merestä löytyy joka tapauksessa. [38, 39]

6. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin muovijätettä ja erityisesti mikromuovihiukkasia meressä. Yleisimpien mereen päätyvien muovien markkinatilannetta tutkimalla huomattiin näiden muovien tarpeen vain kasvavan, mikä johtaa varmasti myös muovijätteen määrän kasvamiseen rajoittamisyrytyksistä huolimatta. Merten muovipitoisuus on jo nyt noussut erittäin haitalliselle tasolle, ja jos muovin tuotanto jatkaa kasvamistaan, ongelma tulee vain pahenemaan. Siksi mikromuovihiukkasten sijoittuminen ja hajoaminen meressä on tärkeä tutkimuksen ala.

Muovit sijoittuvat meressä tiheydensä mukaan. Merivettä tiheimmät polymeerityypit uppoavat heti merenpohjalle, missä ne sekoittuvat pohjan sedimenttikerrokseen. Tiheydeltään pienemmät polymeerit jäävät merenpinnalle tai sen lähelle. Hajotessaan muovihiukkasiin kuitenkin kertyy monia pieneliöitä, jotka nostavat hiukkasten tiheyttä ja aiheuttavat niiden uppoamisen, joten kaikkia muovityyppejä on löydettävissä sekoittuneena merenpohjan sedimenttiin. Suurin osa tuotetusta muovista on kuitenkin tiheydeltään merivettä pienempää, joten meren pinnalla olevan muovin määrä on erittäin suuri.

Merestä löytyvien muovityyppien jakauma riippuu myös mittauspaikasta: polyvinyylidikloridietyleeniä ja polyetyleenivinyylisetaattia löytyy paljon rannoilta asutuksen läheltä, koska se on merivettä raskaampaa, eikä kulkeudu veden mukana kauas lähteeltään. Asutuksen lähellä jakauma painottuu ihmisten päivittäisessä käytössä oleville polymeereille, kuten vaatteiden polyesterille ja polyvinyylidikloridille, sekä pakkausmateriaalina käytettävälle polyetyleenille. Kauempana asutuksesta ja rannasta löytyy paljon esimerkiksi laivoista irtoavia polymeerejä.

Merestä löytyvän muovijätteen kappalekoko painottuu vahvasti mikromuoveille, eli halkaisijalta 5 mikrometriä pienempiin hiukkasiin. Eräissä tutkimuksissa kerätyistä muovikappaleista 71 % kerätyistä kappaleista oli mikromuoveja. Mikromuovien suuri määrä johtuu osittain niiden pienestä koosta, ja osittain niiden muodostumistavasta: pienikokoisia mikromuoveja päätyy helposti huomaamatta esimerkiksi jäteveden mukana mereen, ja mereen päätnyt suurempi muovijäte myös hajoaa pieniksi hiukkasiksi. Mikromuovien pieni koko on osa niiden aiheuttaman ongelman haastavuutta, sillä ne ovat vaikea havaita, vaikka niitä olisikin suuria määriä, mutta se ei silti vähennä niiden vaarallisuutta. Juuri mikromuovien meressä hajoamiseen kohdistuvaa tutkimusta olisi vietävä eteenpäin, sillä se on ongelman ikään nähden suhteellisen uusi tieteenala.

Muovit hajoavat monella eri tavalla meressä. Meressä muovit hajoavat fotolyttisesti, termo-oksidiivisesti, hydrolyttisesti ja bioottisesti. Fotolyttinen hajoaminen on ensimmäinen hajoamistapa, jolle muovi altistuu, mutta merivesi heikentää valon tehoa.

Luonnossa tapahtuva termo-oksidiivinen hajoaminen on hidasta, koska se vaatii lämpöenergiaa. Varsinkin merivedessä lämpötilat ovat liian alhaisia tehokkaalle termo-oksidiiviselle hajoamiselle. Hydrolyyttinen hajoaminen on polymeeriketjun hajoamista happamissa olosuhteissa. Hydrolyyttinen hajoaminen on hidasta meressä. Bioottisessa hajoamisessa pieneliöt hajottavat muovihiukkasia, mutta ne vaativat hyvin pieniä hiukkasia, eivätkä pysty hajottamaan suuria kappaleita. Kuten nähdään, kaikkia luonnollisia hajoamiskeinoja hidastaa jokin meren aiheuttama haaste. Siksi on tärkeää löytää keinotekoisia keinoja muovijätteen hävittämiseksi meressä.

Merten muovijäteongelman keinotekoisia ratkaisuja voisi olla joko muovien kerääminen merestä, tai niiden hajoamisen kiihdyttäminen. Muovien keräämiseen on olemassa keinoja, joita käytetään jo esimerkiksi jäteveden käsittelyssä, mutta ne eivät kuitenkaan ole siirrettävissä sellaisenaan meriolosuhteisiin. Vaatii lisää kehitystyötä, että mahdollisia muovin erottelukeinoja saadaan siirrettyä merelle. Sama ongelma on myös muovien keinotekoisella hajottamisella suoraan meressä. Tiedossa on monenlaisia keinoja, miten muovien hajottamista voidaan kiihdyttää, mutta mitkään niistä eivät ole vielä valmiita mereen sovellettaviksi. Lupaava ratkaisumalli on biohajoamiseen osallistuvien mikro-organismien hyödyntäminen. Parantelemalla näitä mikrobeja voidaan nopeuttaa niiden toimintaa, ja samalla mereen ei tarvitsisi laittaa mitään sinne kuulumatonta. Vaikka mikrobien hyödyntämiseen keskittyvä tutkimus on hyvin tuoretta, yleinen mielipide on, että se tulee olemaan tulevaisuudessa tärkeässä osassa mikromuovijäteongelman ratkaisemisessa.

LÄHTEET

- [1] T. Atkins, M. Escudier, *A Dictionary of Mechanical Engineering*, Oxford University Press, 2013.
- [2] I.E. Napper, R.C. Thompson, Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions, *Marine Pollution Bulletin* vol. 112, issues 1–2, 2016, pp 39–45.
- [3] Li Na Ji, Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET), *Applied Mechanics and Materials*, vol. 312, February 2013, pp. 406–410.
- [4] A.M. Al-Sabagh, F.Z. Yehia, Gh. Eshaq, A.M. Rabie, A.E. ElMetwally, Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate, *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, 2016, Egyptian Petroleum Research Institute, pp. 53–64.
- [5] J.W. Gooch, *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, 2011, Springer-Verlag New York
- [6] D. Tripathi, *Practical guide to polypropylene*. Shrewsbury: RAPRA Technology. 2001.
- [7] J. Sims, Polystyrene, *Environmental Encyclopedia*, Gale, 2003, Detroit
- [8] M. Kohan, *Nylon Plastic Handbook*, Carl Hanser Verlag, 1995, Munchen
- [9] A. Di Benedetto, R. Ramos, Marine debris ingestion by coastal dolphins: What drives differences between sympatric species, *Marine Pollution Bulletin*, 2014, pp. 298–301
- [10] T. Artham, M. Doble, Fouling and Degradation of Polycarbonate in Seawater: Field and Lab Studies, *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 17, 2009, Springer US
- [11] Wenqing Yang, Qingyin Dong, Shili Liu, Henghua Xie, Lili Liu ja Jinhui Li, Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes, January 1 2012, *Procedia Environmental Sciences* vol 169, pp. 167–175
- [12] M. Porta, E. Zumeta. “Implementing the Stockholm Treaty on Persistent Organic Pollutants.” *Occupational and Environmental Medicine* 59.10 (2002): 651–652. *PMC*. Web. 3 July 2017.

- [13] Nasty chemicals abound in what was thought an untouched environment, *The Economist*, 18 February 2017, saatavissa: <https://www.economist.com/news/science-and-technology/21716891-entrenched-nasty-chemicals-abound-what-was-thought-untouched-environment>
- [14] Crude Oil Price Forecast: Long term 2017 to 2030, Knoema, October 3, 2016, <https://knoema.com/yxptpab/crude-oil-price-forecast-long-term-2017-to-2030-data-and-charts>, lainattu 15.5.2017.
- [15] Transparency Market Research; Plastic Packaging Market to Value US\$370.25 Billion by 2020 Driven by Growing Demand from Healthcare Industry: Transparency Market Research, Food Weekly News, Atlanta, Georgia, June 4, 2015, pp. 110.
- [16] Global Bottled Water Market to Rise to US\$279.65 Billion by 2020, Transparency Market Research, Food Weekly News, February 26, 2015, Atlanta, Georgia, pp 434.
- [17] Market Study: Polypropylene, 2014, Ceresana
- [18] Global cold insulation market poised to surge from USD 3.50 billion in 2015 to USD 5.40 billion by 2021 - MarketResearchStore.com. (2016, Jul 21). *NASDAQ OMX's News Release Distribution Channel* Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1805674009?accountid=27303>
- [19] Global Polyamide Market, Acmite Market Intelligence, 2014
- [20] Polycarbonate Market Size & Share - Industry Report, 2024, Grand View Research, October 2016
- [21] S. Muralidharan, K. Sheehan, "Tax" and "Fee" Message Frames as Inhibitors of Plastic Bag Usage Among Shoppers: A Social Marketing Application of the Theory of Planned Behavior, *Social Marketing Quarterly*, vol. 22, 2016, pp. 200–217
- [22] Plastic Recycling Market - Positive Long Term Growth Outlook 2024, Transparency market research, 30 January 2017, lainattu 18.7.2017.
- [23] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, T. S Galloway, Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, 2011, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, Oxford, pp. 2588–2597

- [24] A.P. Madeira Di Benedetto, R.M. Arruda Ramos, Marine debris ingestion by coastal dolphins: What drives differences between sympatric species?, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 83, June 15, 2014, pp. 298–301
- [25] C.J. Moore, Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat, 2008, *Environmental Research* vol 108, issue 2, pp. 131–139
- [26] Nerland, Halsband, Allan, Thomas, Microplastics in marine environments: Occurrence, distribution and effects, NIVA, 2014.
- [27] R.C Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D.McGonigle and A.E. Russell, Lost at Sea: Where is all the Plastic?, *Science*, vol 304, issue 5672, American Association for the Advancement of Science, 2004, pp. 838.
- [28] B. Graca, K. Szewc, D. Zakrzewska, A. Dołęga and M. Szczerbowska-Boruchowska, Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea—a preliminary study, *Environmental Science and Pollution Research*, vol 24, issue 8, maaliskuu 2017, Springer Berlin Heidelberg, pp. 7650–7661.
- [29] J Martins, P Sobral, Plastic marine debris on the Portuguese coastline: A matter of size?, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, issue 12, December 1, 2011, pp. 2649–2653.
- [30] Young Song, Sang Hong, Mi Jang, Gi Han and Won Shim, Occurrence and Distribution of Microplastics in the Sea Surface Microlayer in Jinhae Bay, South Korea, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol 69, issue 3, Springer US, lokakuu 2015, New York, pp. 279–287.
- [31] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband and T.S. Galloway, Microplastics as contaminants in the marine environment: A review, *Marine Pollution Bulletin*, vol 62, issue 12, December 1, 2011, pp. 2588–2597.
- [32] H. K. Webb, J. Arnott, R. J. Crawford, E.P. Ivanova, Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1–18. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/polym5010001>, 2013
- [33] M. Da Cruz, L. Van Schoors, K. Benzarti, X. Colin, Thermo-oxidative degradation of additive free polyethylene, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, 10.5.2016

- [34] T. Artham, M. Doble, Fouling and Degradation of Polycarbonate in Seawater: Field and Lab Studies, *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 17, 2009, Springer US
- [35] B. Gewert, M.M. Plassmann, M. MacLeod, Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment, *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol 17, issue 9, September 1, 2015, pp. 1513–1521.
- [36] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics, lainattu 8.8.
- [37] A.F. Herbort, K. Schuhen, A concept for the removal of microplastics from the marine environment with innovative host-guest relationships, *Environmental Science and Pollution Research*, vol 24, issue 12, July 16, 2016, Springer Berlin Heidelberg, pp. 11061–11065.
- [38] N. Kalogerakis, J. Arff, I.M. Banat, O.J. Broch, D. Daffonchio, T. Edvardsen, H. Eguiraun, L. Giuliano, A. Handå, K. Lopez-de-Ipina, I. Marigomez, I. Martinez, G. Øie, F. Rojo, J. Skjermo, G. Zanolli, F. Fava, The role of environmental biotechnology in exploring, exploiting, monitoring, preserving, protecting and decontaminating the marine environment, *New Biotechnology*, vol 32 issue 1, January 25 2015, pp. 157–167.
- [39] R.B. Payne, H.D. May, K.R. Sowers, Enhanced Reductive Dechlorination of Polychlorinated Biphenyl Impacted Sediment by Bioaugmentation with a Dehalorespiring Bacterium, *Environmental Science & Technology*, vol 45, issue 20, September 8, 2011, pp 8772–8779.