

Aapo Ahokas

# MUOVIEEN HIILIJALANJÄLKI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Ilari Jönkkäri  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Aapo Ahokas: Muovien hiilijalanjälki  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikka  
Huhtikuu 2023

---

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan mittaria, joka kuvaa kasvihuonepäästöjen määrää, jotka syntyvät ihmisten toiminnasta. Hiilijalanjälki ilmoitetaan yleensä hiilidioksidiekvivalenttina (CO<sub>2</sub>e). Muovit ovat laajasti käytettyjä materiaaleja, mutta niiden valmistus ja käyttö voivat vaikuttaa merkittävästi ilmastoon. Tämän tutkielman tarkoituksena on tutkia muovien hiilijalanjälkeä ja selvittää parhaita keinoja sen vähentämiseen.

Aluksi käydään läpi bio-, biohajoavia öljypohjaisia- ja öljypohjaisia muoveja, ja tarkastellaan niiden eroja. Tutkimuksessa huomataan, että itse raaka-aineiden lisäksi myös energialähteellä on suuri vaikutus hiilijalanjälkeen. Muovin polymerointi-, muokkaus-, viimeistely-, pakkaus-, kuljetus- ja kierrätysvaiheessa esitellään erilaisia keinoja hiilijalanjäljen vähentämiseen, ja pohditaan tulevaisuuden näkymiä. Tutkimuksessa tarkastellaan lisäksi myös kustannuksia ja sitä, miksi yritykset ja ihmiset eivät aina halua siirtyä ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin.

Muovien hiilijalanjäljen pienentäminen on keskeinen toimenpide kestävän kehityksen ja ilmastomuutoksen torjunnan näkökulmasta. Tämä voidaan saavuttaa noudattamalla tutkielmassa esitetyjä keinoja, kuten kierrättämällä muovia, käyttämällä biopohjaisia muoveja, lyhentämällä kuljetusmatkoja ja siirtymällä uusiutuvaan energiaan muovin tuotannossa. Nämä toimenpiteet voivat auttaa vähentämään muovien ympäristövaikutuksia ja luomaan kestävämpää tulevaisuutta.

Avainsanat: muovi, hiilijalanjälki, kestävä kehitys, kiertotalous, ilmastomuutos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. RAAKA-AINEET .....	3
2.1 Biomuovit .....	3
2.2 Öljypohjaiset biohajoavat muovit .....	4
2.3 Öljypohjaiset muovit .....	5
2.4 Vertailu .....	5
3. POLYMEROINTI .....	8
4. MUOKKAUS JA VIIMEISTELY .....	10
5. PAKKAUS JA KULJETUS .....	12
5.1 Pakkaus .....	12
5.2 Kuljetus .....	12
6. KIERRÄTYS .....	14
7. KUSTANNUKSET .....	17
8. YHTEENVETO .....	18
LÄHTEET .....	20

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

PLA	Polylaktidi
PHA	Polyhydroksialkanoaatti
PHB	Polyhydroksibutyraatti
PE	Polyeteeni
PET	Polyteenitereftalaatti
PBAT	Polybutyleeni-adipaatti-tereftalaatti
PCL	Polykaprolaktoni
PP	Polypropeeni
PVC	Polyvinyylikloridi
PS	Polystyreeni
HDPE	Korkeatiheyksinen polyeteeni
LDPE	Matalatiheyksinen polyeteeni
LLDPE	Lineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni

# 1. JOHDANTO

Hiilijalanjälki on mittari, joka kuvaa kasvihuonekaasupäästöjen määrää, jotka syntyvät suoraan tai välillisesti ihmisen toiminnasta, kuten energiantuotannosta, liikkumisesta, asumisesta, ruoantuotannosta ja kulutuksesta. Hiilijalanjälki ilmoitetaan yleensä hiilidioksidiekvivalenttina (CO<sub>2</sub> e), joka on yksikkö, joka kuvastaa eri kasvihuonekaasujen ilmastovaikutuksia yhtenäisellä tavalla.

Hiilijalanjäljen vähentäminen on tärkeää ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Kasvihuonekaasupäästöt, erityisesti hiilidioksidipäästöt, ovat tärkein syy ihmisen aiheuttamaan ilmaston lämpenemiseen. Korkea hiilijalanjälki tarkoittaa, että ihmiset ja yhteiskunnat kuluttavat ja tuottavat paljon päästöjä, mikä puolestaan lisää kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä. Tämä aiheuttaa ilmaston lämpenemistä ja sen mukanaan tuomia vakavia ympäristö- ja taloudellisia seurauksia, kuten äärimmäiset sääilmiöt, merenpinnan nousu, maaperän eroosio ja lajien sukupuuttoon kuoleminen.

Hiilijalanjäljen vähentäminen on tärkeää myös kestävä kehityksen kannalta. Kestävä kehitys tarkoittaa taloudellisen, sosiaalisen ja ympäristöllisen hyvinvoinnin saavuttamista nykyisille ja tuleville sukupolville. Vähentämällä hiilijalanjälkeä voimme vähentää ympäristöhaittoja, kuten ilmansaasteita ja vesistöjen saastumista, sekä edistää luonnon monimuotoisuutta ja säilyttää luonnonvaroja. Hiilijalanjäljen vähentäminen voi myös luoda uusia taloudellisia mahdollisuuksia, kuten uusiutuvien energialähteiden kehittämistä ja energiatehokkaiden teknologioiden käyttöönottoa.

Muovit puolestaan ovat monimutkainen ja ajankohtainen aihe ympäristökeskustelussa. Muovien ominaisuudet tekevät niistä erittäin hyödyllisiä materiaaleja monilla eri teollisuudenaloilla, kuten pakkaus- ja elektroniikkateollisuudessa. Muovit ovat kevyitä, kestäviä, monipuolisia ja edullisia, mikä on tehnyt niistä suosituksen valinnan moniin sovelluksiin. Kuitenkin muovien käytöllä on myös huomattavia ympäristövaikutuksia. Muovijätteestä on tullut vakava ympäristöongelma, koska suuri osa muoveista ei hajoa luonnossa ja voi pysyä ympäristössä satoja vuosia. Meret ovat erityisen alttiita muovijätteelle, ja jäte aiheuttaa haittaa merten eliöstölle. Lisäksi muovin valmistusprosessi aiheuttaa muita ympäristöongelmia, kuten kasvihuonekaasujen päästöjä.

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on tutkia muovien hiilijalanjälkeä. Muovit ovat laajalti käytettyjä materiaaleja monilla eri aloilla, mutta niiden valmistus ja käyttö voivat vaikuttaa merkittävästi ilmastoon. Keskeisenä tutkimuskysymyksenä on: "Mitkä ovat parhaita keinoja hiilijalanjäljen vähentämiseen muoviteollisuudessa?" Tässä tutkielmassa tarkastellaan muovien valmistusprosessia ja sen ympäristövaikutuksia hiilijalanjäljen näkökulmasta. Erityisesti työssä tutkitaan raaka-aineiden valintaa, muovien valmistusprosessin eri vaiheita, muokkausta ja viimeistelyä, pakkausta ja kuljetusta sekä kierrätystä. Lisäksi tarkastellaan erilaisia keinoja vähentää muovien hiilijalanjälkeä, pohditaan kustannuksiin liittyviä ongelmia ja esitellään joitain tulevaisuuden mahdollisuuksia kestävämmän muovituotannon saavuttamiseksi. Tämän tutkimuksen tavoitteena on antaa arvokasta tietoa muovien valmistuksesta ja ympäristövaikutuksista, jotta voidaan tehdä tietoon perustuvia päätöksiä kestävämmän tulevaisuuden puolesta.

## 2. RAAKA-AINEET

Kun halutaan vähentää hiilijalanjälkeä muoviteollisuudessa, on raaka-ainevalinnoilla merkittävä rooli. Yhtenä vaihtoehtona voidaan käyttää materiaaleja, jotka ovat peräisin uusiutuvista lähteistä, kuten kasveista, ja täten vähentää uusiutumattomia resursseja tuotannossa. Toinen vaihtoehto on hyödyntää kierrätystä ja käyttää tuotteita uudelleen. Polymerointivaiheessa esimerkiksi kierrätys voi olla merkittävä keino vähentää hiilijalanjälkeä, koska kierrätysmateriaalien käyttö vähentää tarvetta valmistaa uusia polymeerejä samalla vähentäen jätteen määrää.

### 2.1 Biomuovit

Biomuovi on muovi, joka on valmistettu osin tai kokonaan uusiutuvista raaka-aineista. Osa biomuoveista on myös biohajoavia, joten sen käyttö on ympäristöystävällisempää kuin perinteisten muovien, sillä se hajoaa hiilidioksidiksi, vedeksi ja biomassaksi, joka ei vahingoita ympäristöä. [1]

Tyypillisiä raaka-aineita biomuovien valmistukseen ovat maissi, peruna, tapioka, riisi ja vehnä. Niitä voidaan valmistaa myös öljyistä, kuten palmunsiemenistä, pellavansiemenistä, soijapavuista tai käymistuotteista, kuten polylaktidi (PLA). Lisäksi on myös olemassa polyhydroksialkanoaatteja (PHA), jotka valmistetaan biosynteesillä mikro-organismien avulla. Näitä ovat itse PHA:n lisäksi esimerkiksi polyhydroksibutyraatti (PHB). [1]

Korvaamalla 65,8 % maailman muoveista biomuoveilla säästettäisiin 241–316 Mt CO<sub>2</sub>e hiilidioksidipäästöjä vuodessa. Biomuoveja on markkinoilla sekä biohajoavia (PLA, PHA) että ei-biohajoavia (polyeteeni PE ja polyeteenitereftalaatti PET). Biopohjaiset PE ja PET on käytännössä täysin samat ominaisuudet fossiilipohjaisiin PE ja PET verrattuna. Biohajoavilla on taas hieman heikommat mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet yleisesti, kun verrataan niitä ei-biohajoaviin muoveihin. [2]

Biohajoavista ja biopohjaisista muoveista PLA on ensimmäinen suuressa määrin tuotettu polymeeri [3]. Se on termoplastinen polyesteri, mikä mahdollistaa sen prosessoinnin erilaisilla tekniikoilla, kuten ekstruusiolla ja ruiskuvalulla [4].

PLA voi esiintyä osakiteisenä tai kokonaan amorfisena muotona riippuen valmistusprosessista ja käytetyistä raaka-aineista. Osakiteisella PLA:lla on kiteinen rakenne, kun taas amorfisella PLA:lla ei ole selkeää kiderakennetta. Osakiteinen PLA on yleensä kovempaa ja haurasta, kun taas amorfisella PLA:lla on parempi sitkeys ja taipuisuus. [5]

PLA:n ominaisuudet tekevät siitä houkuttelevan moniin käyttökohteisiin. Esimerkiksi sen läpinäkyvyys mahdollistaa sen käytön pullojen, säilytysrasioitten ja kääremuovien valmistuksessa. PLA onkin siis hyvä ympäristöystävällinen vaihtoehto perinteisille öljypohjaisille muoveille. [4]

PLA on saavuttanut merkittävää suosiota erityisesti pakkaus- ja kuluttajatuotteiden markkinoilla, joissa ympäristöystävälliset vaihtoehdot ovat yhä enemmän haluttuja. Se on esimerkki biopohjaisista muoveista, jotka pyrkivät vähentämään riippuvuutta fossiilisista raaka-aineista ja vähentämään muovijätteen kertymistä ympäristöön. [3]

## 2.2 Öljypohjaiset biohajoavat muovit

Öljypohjaiset biohajoavat muovit ovat muovityyppejä, jotka on valmistettu öljypohjaisista raaka-aineista, mutta jotka on suunniteltu hajoamaan luonnossa biologisesti. Ne ovat yksi muovien kestävämmistä vaihtoehdoista, sillä ne voivat hajota mikro-organismien vaikutuksesta ja muuttua luontoon palautuviksi aineiksi, kuten vedeksi. Tämä eroaa perinteisistä öljypohjaisista muoveista, jotka eivät hajoa ympäristössä ja voivat aiheuttaa pitkäaikaista ympäristöhaittaa.

Synteettisiä alifaattisia polyestereitä voidaan luoda monien erityyppisten biohajoavien tuotteiden valmistamiseksi esimerkiksi pakkauksiin ja kalvoihin, jotka hajoavat teollisissa kompostointiolosuhteissa. Markkinoilla on tällä hetkellä ecoflex ® (PBAT), ecovio ® (PBAT:n ja PLA:n seos) ja PCL. [1]



## 2.3 Öljypohjaiset muovit

Öljypohjaisten muovien raaka-aineena käytetään esimerkiksi eteeniä, bentseeniä, butadieeniä ja propeenaa, joita syntyy öljyn jalostusprosessissa. Öljypohjaiset muovit voivat olla monenlaisia, ja niiden ominaisuudet riippuvat käytetyistä raaka-aineista ja valmistusmenetelmästä. Yleisimpiä öljypohjaisia muoveja ovat PP (polypropeeni), PS (polystyreeni), PVC (polyvinyyliloridi), PE ja PET. [6]

## 2.4 Vertailu

Posen et al. tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin eri muovien hiilijalanjälkeä. Öljypohjaisista muoveista tarkasteltiin seuraavia: HDPE (korkean tiheyden polyeteeni), LDPE (matalan tiheyden polyeteeni), LLDPE (lineaarinen matalan tiheyden polyeteeni), PP, PET, PS ja PVC. [7]

Taulukkoon 1 on merkitty kyseisten muovilaatujen päästökertoimet sekä uusiutumattomilla (konventionaalinen), että uusiutuvilla energialähteillä (vähähiilinen). Päästökerroin kuvaa muovin valmistuksesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrää, ja pienempi päästökerroin osoittaa pienempää ympäristövaikutusta. Lisäksi mainitaan mahdollinen biomuovi, joka voisi korvata öljypohjaisen muovin. [7]

**Taulukko 1 Posen et al. tutkimuksen öljypohjaisten muovien hiilijalanjälki [7]**

Muovilaatu	Konventionaalinen päästökerroin (kg CO <sub>2</sub> e/kg muovia)	Vähähiilisen energian päästökerroin (kg CO <sub>2</sub> e/kg muovia)	Vaihtoehtoinen muovi raaka-aineen korvaamisskenaarioissa
HDPE	1.5	0.59	bio-HDPE
LDPE	1.8	0.66	bio-LDPE
LLDPE	1.5	0.65	bio-LLDPE
PP	1.5	0.85	PP/PLA
PET	2.4	1.0	PLA

PS	3.1	1.6	PLA
PVC	2.2	0.63	bio-PVC

Taulukossa 2 on esitetty eri biomuovityyppien päästökerroin kahdella eri raaka-aineella, maissilla ja lännenhirssillä valmistettuna, sekä vähähiilisellä energiantuotannolla ja ilman sitä.

**Taulukko 2 Posen et al. tutkimuksen biomuovien hiilijalanjälki [7]**

Muovilaatu	Maissista valmistetut biomuovit (kg CO <sub>2</sub> e/kg muovia)	Maissista valmistetut vähähiilisellä energialla (kg CO <sub>2</sub> e/kg muovia)	Lännenhirssillä valmistetut biomuovit (kg CO <sub>2</sub> e/kg muovia)
PLA	1.9	0.09	0.25
bio-PVC	1.9	1.3	1.3
bio-HDPE	0.89	-0.55	-0.38
bio-LDPE	1.1	-0.32	-0.14
bio-LLDPE	0.89	0.57	-0.39

Taulukoita tarkastelemalla huomataan, että eri muovilaatujen välillä on merkittäviä eroja niiden konventionaalisten päästökerrointen ja vähähiilisen energian päästökerrointen välillä. Esimerkiksi bio-HDPE ja bio-LDPE saavat negatiivisia päästökerroinlukuja vähähiilisen energiantuotannon ja lännenhirssin skenaarioissa, mikä tarkoittaa, että niiden valmistus ei ainoastaan vähennä päästöjä, vaan se poistaa ilmakehästä hiilidioksidia tai muita kasvihuonekaasuja, mikä johtaa nettomääräiseen päästöjen vähenemiseen.

Öljypohjaisten ja biomuovien välillä huomataan myös eroja. PVC:n, HDPE:n, LDPE:n ja LLDPE:n bioversiot ovat selvästi ympäristöystävällisempiä verrattuna niiden vastaaviin öljypohjaisiin. Biomuovit ovat siis hiilijalanjäljen kannalta parempi vaihtoehto öljypohjaisille.

Yleisesti suurimmat erot saadaan hiilijalanjälkeen, kun siirrytään vähähiilisiin energialähteisiin. Esimerkiksi taulukossa mainittu ero maissista valmistettujen biomuovien (PLA,

bio-PVC, bio-HDPE, bio-LDPE ja bio-LLDPE) päästökerroissa vähähiilisen energiantuotannon ja konventionaalisen energiantuotannon välillä on havainnollistava esimerkki tästä. Vähähiilisellä energiantuotannolla valmistettujen biomuovien päästökerroin on merkittävästi alhaisempi kuin vastaavasti konventionaalisella energiantuotannolla valmistettujen biomuovien päästökerroin. Tämä korostaa, että energian tuotantotapa on suurin tekijä biomuovien hiilijalanjäljessä, ja siirtyminen vähähiilisiin energialähteisiin vaikuttaa positiivisesti biomuovien ympäristöystävällisyyteen. [7]

### 3. POLYMEROINTI

Polymeroinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa pienistä molekyyleistä, joita kutsutaan monomeereiksi, muodostetaan pitkäketjuisia polymeerimolekyyliä. Tämä prosessi voi tapahtua erilaisilla tavoilla ja käyttäen erilaisia raaka-aineita, joten sen hiilijalanjälki voi vaihdella huomattavasti riippuen monista tekijöistä. [8]

Polymeroinnin hiilijalanjälkeen vaikuttaa esimerkiksi käytettävän energian määrä ja tyyppi. Jos energia tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, kuten öljyllä tai maakaasulla, se johtaa suuriin hiilidioksidipäästöihin, jotka vaikuttavat ilmastonmuutokseen. Jos sen sijaan käytetään uusiutuvia energialähteitä, kuten aurinko- tai tuulivoimaa, sen hiilijalanjälki voi olla merkittävästi pienempi. [9]

Polymeroinnin hiilijalanjälkeen vaikuttaa myös raaka-aineiden kuljetus, varastointi ja käsittely. Raaka-aineiden hankinta ja kuljetus kuluttavat energiaa ja voivat aiheuttaa päästöjä. Lisäksi polymeerien valmistuksessa käytetään usein kemikaaleja, jotka voivat aiheuttaa ympäristöongelmia, jos niitä käytetään väärin tai niitä pääsee ympäristöön. [10]

Polymerointiprosessit voidaan jakaa kahteen ryhmään: additiopolymerointiin ja polykondensaatioon. Additiopolymerointi on yksi yleisimmistä tavoista valmistaa polymeerejä, joissa monomeerit lisätään reaktioon ilman sivutuotteiden poistoa. Tämä prosessi perustuu monomeerien lisäämiseen toisiinsa kovalenttisilla sidoksilla reaktioon osallistuvan katalyytin avulla. Polykondensaatioissa taas kaksi tai useampi monomeeri reagoi keskenään ja muodostaa polymeeriketjuja vapauttaen sivutuotteena vettä tai muita pienimolekyyllisiä yhdisteitä. Tämä prosessi perustuu monomeerien reaktioon, jossa kovalenttiset sidokset muodostuvat monomeerien välille ilman ulkoista katalyyttiä. [11]

Polykondensaatioprosessissa käytetään yleensä reaktiivisia monomeerejä, jotka sisältävät useita reaktiivisia ryhmiä, kuten hydroksyyli-ryhmiä ja karboksyylihapporyhmiä. Polyadditiossa taas monomeerit sisältävät kaksoissidoksia. Näitä ovat esimerkiksi alkeenit. Molempien prosessien raaka-aineet voivat olla peräisin fossiilisista tai uusiutuvista raaka-aineista. [11]

Polykondensaatioprosessi vaatii yleensä korkeampia lämpötiloja ja voi vaatia pitkiä reaktioaikoja, mikä voi aiheuttaa suuremman energiankulutuksen verrattuna polyadditioprosessiin, joka voidaan toteuttaa huoneenlämmössä tai matalammissa lämpötiloissa. Suurempi lämpötila nostaa energiankulutusta, ja siten hiilijalanjälkeä. [11]

Koska polykondensaatioprosessissa voi syntyä sivureaktioita ja sivutuotteita, kuten vettä tai muita pienempiä molekyylejä, voivat ne vaatia erillistä käsittelyä ja johtaa materiaali- ja energiahävikkiin. Polyadditioprosessissa sivureaktioita ja sivutuotteita esiintyy vähemmän, mikä johtaa pienempään hiilijalanjälkeen. [11]

## 4. MUOKKAUS JA VIIMEISTELY

Muovin muokkaamiseen ja viimeistelyyn on lukuisia eri keinoja. Eri keinot myös tuottavat eri määriä turhaa jätettä, ja kuluttavat vaihtelevasti energiaa. Myös sarjojen koko on verrannollinen energiankulutukseen, sillä isompaa sarjaa tehdessä yksittäisen tuotteen energiakulutus vähenee.

Tyypillisimpiä muovien muokkausmenetelmiä ovat muun muassa lämpömuovaus, ekstruusio, kalanterointi, ahto- ja siirtopuristus, ruiskuvalu, puhallusmuovaus ja rotaatiovalu. Jokaisen prosessin periaate liittyy muovin lämmittämiseen sen muokkaamiseksi. [12]

Lämmityksen rooli muovien muokkausmenetelmissä onkin siis tärkeä, ja sen vaikutus hiilijalanjälkeen riippuu muun muassa käytettävien energialähteiden ja lämmitysjärjestelmien energiatehokkuudesta ja hiilidioksidipäästöistä. Tästä syystä on tärkeää pyrkiä löytämään kestäviä ja ympäristöystävällisiä tapoja muovien lämmitysprosessiin, kuten uusiutuvat energialähteet, joiden käyttö vähentää hiilijalanjälkeä merkittävästi. [9]

Muovien käsittely korkeissa lämpötiloissa edellyttää joissain tapauksissa esilämmitystä. Tämä koskee erityisesti suurempia muotteja ja järjestelmiä, joissa on tärkeää varmistaa, että avainkomponentit ovat saavuttaneet tarvittavan lämpötilan ennen kuin muovin prosessointi aloitetaan. Esilämmityksen aikana ei vielä synny tuotantoa, mutta siitä huolimatta energiaa kuluu. Tämä on tärkeä huomioida, kun suunnitellaan ja toteutetaan muovien prosessointia teollisessa mittakaavassa. [13]

Yksi keskeisimmistä syistä ylimääräisen muovijätteen syntyyn on muovin valmistuksessa ja muokkauksessa tarvittavien raaka-aineiden ja materiaalien hukka. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että valmistusprosessissa raaka-aineen määrä ylittää tarvittavan määrän. Esimerkiksi rotaatiovalussa tämä voi käydä raaka-aineen syöttövaiheessa. Syynä tähän voi olla vaikea tai epätarkka raaka-aineen mittausta tai inhimillinen virhe, jolloin valmistajan tai tuotantolinjan työntekijä lisää vahingossa liikaa raaka-ainetta seokseen tai tuotantoon. Myös tuotantolinjan suunnitteluvirhe tai tekninen ongelma voi johtaa liian suureen raaka-aineen käyttöön tai hävikkiin. [13]

Yksi ratkaisu ylimääräisen muovijätteen vähentämiseksi onkin raaka-aineiden tarkempi annostelu ja valmistusprosessien optimointi. Tämä tarkoittaa sitä, että valmistusprosessissa käytetään tarkasti oikea määrä raaka-aineita, jolloin ylimääräisen muovijätteen syntyminen vähenee. Tämä edellyttää muoviteollisuudelta investointeja uusiin teknologioihin, joilla voidaan valmistaa tarkempia mittauksia ja käyttää raaka-aineita tehokkaammin.

Eri menetelmissä tämä onnistuu helpommin kuin toisissa, esimerkiksi rotaatiovalulla ja ruiskuvalulla on eroja materiaalihävikissä. Rotaatiovalu on prosessi, jossa muotti pyörii tasaisesti ja muovijauhe tai esipuristetut muovilevyt sulavat ja levittyvät muotin seinämiin painovoiman avulla. Tämän jälkeen muotti jäähtyy ja valmiin tuotteen voi irrottaa muotista. Ruiskuvalu puolestaan on prosessi, jossa muovi sulatetaan ja ruiskutetaan korkeapaineella muottiin, jossa se jähmettyy ja ottaa halutun muodon. [12]

Rotaatiovalussa materiaalihävikki on vähäisempää, koska prosessissa käytetään yleensä vain tarvittava määrä muovia valmistettavaan tuotteeseen. Muotti pyörii tasaisesti, mikä mahdollistaa tasaisen materiaalin jakautumisen muotin seinämiin, minimoiden materiaalin kerääntymisen tietyille alueille ja siten vähentäen materiaalihävikkiä. Lisäksi rotaatiovalussa voidaan hyödyntää muovijauhetta, joka voi vähentää materiaalihävikkiä verrattuna muihin valmistusmenetelmiin. [12]

Ruiskuvalussa taas materiaalihävikki on suurempi. Muottiin ruiskutetun muovin täytyy täyttää muotin ontelot, ja tämän ylimääräisen muovin on poistuttava muotista jälkeensä. Tämä ylimääräinen muovi leikataan tai jauhetaan pois, mikä aiheuttaa materiaalihävikkiä. Erityisesti monimutkaisten muotojen tai hukkamateriaalia sisältävien tuotteiden valmistuksessa materiaalihävikki voi olla suurempi ruiskuvalussa. [14]

## 5. PAKKAUS JA KULJETUS

Pakkauksen ja kuljetuksen merkitys hiilijalanjälkeen on myös merkittävä. Lisääntynyt muovituotteiden tarve ja pitkän välimatkan kuljetukset lisäävät huomattavasti kasvihuonekaasuja. Samanlailla pakkausteollisuus, mikä pohjautuu lähes kokonaan muoviin, kuluttaa huomattavia määriä energiaa. Onkin tärkeää löytää keinoja ja uusia teknologioita vähentääkseen hiilijalanjälkeä sekä pakkauksessa, että kuljetuksessa. [15]

### 5.1 Pakkaus

Vuosittain maailmanlaajuisesti valmistetusta, yli 280 miljoonasta tonnista tuoreesta muovista, jotka käytetään pakkauksiin, vain 14 prosenttia kerätään kierrätystä varten. Kun otetaan huomioon muovin lajittelu ja uudelleenprosessointi, vähenee muovin materiaaliarvo viiteen prosenttiin alkuperäisestä, kun se otetaan uudelleenkäyttöön. [15]

Tämä tarkoittaa, että suuri osa muovijätteestä päätyy kaatopaikoille, luontoon tai poltetaan energiaksi. Muovijätteen kertyminen vaikuttaa haitallisesti ympäristöön, sillä se ei hajoa biologisesti ja sen hajoaminen voi kestää jopa satoja vuosia.

### 5.2 Kuljetus

Muovien kuljetuksen hiilijalanjälki vaihtelee monien eri tekijöiden mukaan, kuten kuljetusmatkan pituuden, käytetyn kuljetusmuodon ja kuljetusvälineen tehokkuuden mukaan. Kuljetus tuottaa EU:n alueella melkein neljäsosan kaikista kasvihuonepäästöistä. [10]

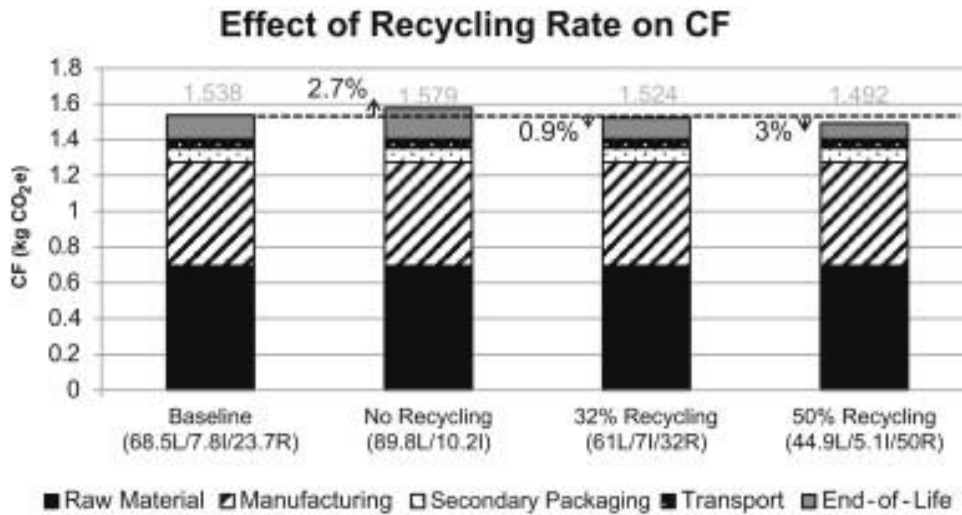
Muovien kuljetuksen yleisimmät tavat ovat rekka- ja laivakuljetukset. Rekkakuljetuksissa kasvihuonekaasupäästöt syntyvät pääasiassa polttoaineen kulutuksesta. Päästöjen määrä riippuu ajoneuvon koosta, polttoaineen laadusta, ajotavasta ja kuljetusmatkan pituudesta. Laivakuljetuksissa taas päästöt syntyvät pääasiassa polttoaineen kulutuksesta, mutta myös laivan koon ja tehokkuuden vaikutus on suuri.



Muovien kuljetuksen päästöjen vähentämiseksi on useita keinoja. Yksi tärkeimmistä on kuljetusmatkan lyhentäminen ja kuljetusreittien optimointi. Lisäksi tehokkaampien kuljetusvälineiden käyttö, kuten energiatehokkaiden rekkojen tai ympäristöystävällisempien laivojen, voi vähentää päästöjä merkittävästi. Myös polttoaineen vaihtaminen ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin, kuten biopolttoaineisiin tai sähkөөn, voi vähentää päästöjä. [10]

## 6. KIERRÄTYS

Muovin kierrätys on tärkeää hiilijalanjäljen vähentämisessä. Dormer et al. tekemässä tutkimuksessa tutkittiin kuluttajille päätyvien PET muovipakkausten hiilijalanjälkeä neljällä eri tavalla (kuva 1). [16]



**Kuva 1 Iso-Britannian PET:n hiilijalanjälki neljällä eri kierrätysasteella vuonna 2012 [16]**

Huomataan, että vuoden 2012 23,65 % kierrätysasteeseen verrattuna kierrättämättä jättäminen lisää hiilijalanjälkeä 2,7 %. Kun kierrätysaste taas paranee 32 %, vähenee se 0,9 %. Viimeisenä jos kierrätys saataisiin jopa 50 %, vähenisi hiilijalanjälki jo 3 %.

Kierrätys voidaan jakaa kemialliseen ja mekaaniseen kierrätykseen. Kemiallinen kierrätys tarkoittaa muovimateriaalin palauttamista alkuperäisiin raaka-aineisiinsa kemiallisten tai termokemiallisten reaktioiden avulla. Esimerkiksi muovijätettä voidaan käsitellä erilaisilla kemiallisilla prosesseilla, kuten pyrolyysillä, jossa alkuperäiset raaka-aineet korvataan jollain muulla aineella tai depolymeroinnilla, jonka avulla muovi voidaan hajottaa takaisin alkuperäisiin raaka-aineisiinsa. Nämä voidaan sitten käyttää uuden muovimateriaalin valmistamiseen. Kemiallinen kierrätys mahdollistaa erilaisten muovilaatujen kierrättämisen ja sitä voidaan käyttää myös likaantuneiden tai monimutkaisten muovijätteiden käsittelyyn. [17]

Mekaaninen kierrätys puolestaan tarkoittaa muovimateriaalin mekaanista käsittelyä, kuten murskaamista, sulattamista ja uudelleenmuotoilua uusien tuotteiden valmistamiseksi. Esimerkiksi muovipakkauksista voi saada kierrätysmateriaalia murskaamalla ne pienemmiksi paloiksi ja sulattamalla ne uudeksi muoviraaka-aineeksi, joka voidaan käyttää uusien tuotteiden, kuten pullojen tai putkien, valmistamiseen. [17]

Esimerkkinä mekaanisesta kierrätyksestä on PET:n kierrätys. Petcoren mukaan vuonna 2014 PET:n kierrätysaste oli 57 %, joka on verrattuna muihin muoveihin todella korkea. Kierrätys alkaa keräämisellä, esimerkiksi kierrätyspisteiden avulla. Keräämisen jälkeen PET puhdistetaan epäpuhtauksista käsin tai automaattisten lajittelujärjestelmien avulla, jonka jälkeen se puristetaan paaleiksi kuljetusta varten. Puhdistus on tärkeä vaihe, jotta kierrätetty lopputuote sisältää samat ominaisuudet kuin neitseellisestä PET:stä valmistetut tuotteet. [17]

Kierrätetyn PET:n termomekaanista hajoamista ja molekyylipainon pienenemistä vastaan on kehitetty erilaisia tekniikoita, kuten kiinteän tilan jälkikondensaatio. Siinä PET lämmitetään lasisiirtymän ja sulamispisteen väliin. Kondensaatio reaktiot tapahtuvat ketjujen pääryhmien välillä polymeerin amorfisessa faasissa. [17]

Kierrätykseen liittyy kuitenkin haasteita. Yksi suurimmista haasteista muovien kierrätyksessä on niiden moninaisuus. Muovit ovat erilaisia ja niillä on erilaiset ominaisuudet, mikä vaikeuttaa niiden käsittelyä kierrätysprosessissa. Jotkin muovit sisältävät lisäaineita, kuten väriaineita tai pehmentimiä, jotka voivat vaikuttaa kierrätyksen tehokkuuteen. Tämä tekee muovien kierrätyksestä erittäin monimutkaista ja kallista. [18]

Toinen merkittävä haaste on muovijätteen kontaminoituminen. Muovit kontaminoituvat helposti, ja niissä voi olla esimerkiksi ruokajäämiä, liimaa tai muita aineita, jotka hankaloittavat niiden kierrätystä. Kontaminoituneet muovit voivat myös vaikuttaa kierrätysprosessin tehokkuuteen ja nostaa sen hintaa. [18]

Lisäksi kierrätyksen taloudellisuus on haaste. Muovien kierrättäminen on usein kalliimpaa kuin uusien valmistaminen, mikä voi vähentää kierrätyksen houkuttelevuutta yrityksille ja kuluttajille. Kierrätyksen on laskettu lisäävän 10–25 % kustannuksia verrattuna nykyiseen jätteenkäsittelyyn. [18]

Viimeinen merkittävä haaste on kuluttajien käyttäytyminen. Monet kuluttajat eivät tiedä, miten muovia tulisi kierrättää tai he eivät jaksakaan huolehtia siitä. Tämä voi johtaa siihen,

että muovia heitetään sekajätteeseen tai väärään kierrätysastiaan, jolloin se ei päädy kierrätykseen vaan päättyy kaatopaikalle tai jopa luontoon. Lisäksi kuluttajat voivat olla tietämättään harhaanjohtavia mainosten tai pakkausmerkintöjen suhteen, mikä voi johdattaa siihen, että he lajittelevat muovia väärin. Esimerkiksi, jos muovipakkaus on merkitty kierrätyskelpoiseksi, mutta siinä on muovi- ja metalliosia, kuluttaja saattaa lajitella sen väärin ja heittää sen väärään kierrätysastiaan. Lisäksi joissain tapauksissa kierrätysjärjestelmät ovat puutteellisia tai hankalia, mikä voi tehdä kierrättämisestä vaikeaa kuluttajille. Jotta muovien kierrätysaste saataisiin nousuun, tarvitaan tehokasta kuluttajakoulutusta ja selkeitä ohjeita, jotka auttavat kuluttajia lajittelemaan muovijätteensä oikein. [19]

## 7. KUSTANNUKSET

Hiilijalanjäljen vähentäminen ei ole aina helppoa. Siirtyminen ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin voi aiheuttaa taloudellisia ongelmia. Kustannuksia nostavat esimerkiksi siirtyminen uusiutuviin energialähteisiin ja biomuoveihin.

Suurin ongelma siirryttäessä uusiutuviin energialähteisiin on olemassa olevan energiainfrastruktuurin muuttaminen. Muutoksia voi olla tarpeen tehdä sähköverkkoihin ja jakelujärjestelmiin, erityisesti hajautetun uusiutuvan energian tuotannon yleistyessä. Esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman tuotanto voi tapahtua pienemmässä mittakaavassa lähellä kulutuspaikkoja, kuten asuinrakennusten katolla tai maatiloilla. Lisäksi asiakkaat eivät ole olleet kovin innostuneita uusiutuvaan energian dynaamisesta hinnoittelusta, joka esimerkiksi tuulivoiman tapauksessa vaihtelee sään mukaan. Syynä tähän on epävarmuus siitä, että he hyötyisivät siitä yksilöllisesti. [20]

Biomuovien kustannukset taas ovat korkeammat kuin perinteisten muovien johtuen raaka-aineista, valmistusprosessista, ominaisuuksista, kysynnästä ja tarjonnasta. Biomuovien raaka-aineet voivat olla kalliimpia ja hankalampia hankkia, valmistusprosessit voivat olla monimutkaisempia, biomuovien ominaisuudet ovat joissain tapauksissa heikompiä ja biomuovien kysyntä ja tarjonta on edelleen pienempää kuin perinteisten muovien. Biomuovien osuus onkin vain 1 % kaikesta muovituotannosta. Tämä kaikki vaikuttaa biomuovien korkeampiin kustannuksiin. [21]

Hyvänä esimerkkinä näistä on Posen et al. tekemä tutkimus, jossa huomattiin, että siirryessä vähähiilisiin energialähteisiin, nousivat kustannukset 10–200 dollaria per tuhat kiloa muovia. Biomuoveihin siirryessä taas kustannukset nousevat muutamista sadoista muutamiin tuhansiin dollareihin. [7]

## 8. YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella muovien valmistusprosessia ja sen ympäristövaikutuksia hiilijalanjäljen näkökulmasta. Tutkimuksessa kiinnitettiin erityistä huomiota raaka-aineiden valintaan, muovien valmistusprosessin eri vaiheisiin, muokkaamiseen, viimeistelyyn, pakkaamiseen, kuljetukseen ja kierrättämiseen. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin erilaisia keinoja vähentää muovien hiilijalanjälkeä ja esiteltiin joitain tulevaisuuden mahdollisuuksia kestävämmän muovituotannon saavuttamiseksi.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että muovien valmistus ja käyttö voivat vaikuttaa merkittävästi ilmastoon ja ympäristöön. Perinteiset muovit ovat peräisin fossiilisista polttoaineista, ja niiden hävittämiseen liittyy usein ympäristöongelmia. Tutkimus kuitenkin tarjosi useita konkreettisia keinoja muovien käytön vähentämiseksi ja kestävämmän muovituotannon saavuttamiseksi.

Esimerkkeinä mainittiin biopohjaiset materiaalit, jotka ovat peräisin uusiutuvista raaka-aineista, kuten kasveista. Biopohjaiset muovit voivat olla hyvä vaihtoehto perinteisille muoveille, sillä ne voivat vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Lisäksi tutkimuksessa esiteltiin kierrätysmuovien käyttöä, joka voi auttaa vähentämään uusien muovien valmistusta ja siten myös niiden ympäristövaikutuksia. Kierrätysmuovit voivat olla peräisin käytetyistä muovituotteista, ja niiden uudelleenkäyttö voi säästää raaka-aineita ja energiaa verrattuna uusien muovien valmistukseen.

Tutkimuksessa esiteltiin myös muita keinoja vähentää muovien hiilijalanjälkeä, kuten energiatehokkaammat valmistusprosessit ja kuljetusten optimointi. Esimerkiksi energiatehokkaampi valmistusprosessi voi vähentää tuotannon energiankulutusta ja siten pienentää ilmastopäästöjä. Kuljetusten optimointi voi puolestaan vähentää logistiikkapäästöjä ja parantaa koko toimitusketjun ympäristösuorituskykyä.

Ympäristöystävällisyys voi toisaalta myös olla kallista. Taloudelliset tekijät ovat yksi merkittävä syy siihen, miksi yritykset eivät aina siirry ympäristöystävällisempiin muoveihin. Ympäristöystävällisten muovien valmistus voi olla kalliimpaa verrattuna perinteisiin muoveihin. Esimerkiksi biopohjaiset tai kierrätysmuovit voivat olla kalliimpia tuottaa, koska niiden raaka-aineiden hankinta, jalostus ja prosessointi voivat olla monimutkaisempia tai vaatia erikoistuneita laitteita ja teknologiaa. Tämä voi lisätä tuotantokustannuksia ja vähentää yritysten kannattavuutta, erityisesti tiukassa kilpailuympäristössä, jossa hintakilpailu on kovaa.

# LÄHTEET

- [1] Greene, J. P. (2014). *Sustainable Plastics: Environmental Assessments of Biobased, Biodegradable, and Recycled Plastics*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- [2] Jiajia, Z., Sangwon, S (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9(5), 374–378.
- [3] Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. (2010). Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(1), 25–40.
- [4] Ebnesajjad, S. (2012). *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications*. Elsevier Science & Technology Books.
- [5] Lamberti, F. M., Román-Ramírez, L. A., Wood, J. (2020). Recycling of Bioplastics: Routes and Benefits. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(10), 2551–2571.
- [6] Hyvä, paha muovi | Ellibs Lukuohjelma. Noudettu 12. huhtikuuta 2023 osoitteesta <https://www.ellibslibrary.com/reader/9789523128590>
- [7] Posen, I. D., Jaramillo, P., Landis, A. E., & Griffin, W. M. (2017). Greenhouse gas mitigation for U.S. plastics production: Energy first, feedstocks later. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034024.
- [8] Mandal, B. M. (2010). *Fundamentals Of Polymerization*. World Scientific Publishing Company
- [9] Carter, M., Lingl, P., Carlson, D., & The David Suzuki Foundation. (2010). *Doing Business in a New Climate: A Guide to Measuring, Reducing and Offsetting Greenhouse Gas Emissions*. Taylor & Francis Group.
- [10] Pizzol, M. Deterministic and stochastic carbon footprint of intermodal ferry and truck freight transport across Scandinavian routes. *Journal of Cleaner Production*, (2019), 224, 626–636.
- [11] Fried, Joel R. *Polymer Science and Technology*. Third edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2014. Print.
- [12] Osswald, Tim Hernández-Ortiz, Juan P.. (2006). *Polymer Processing - Modeling and Simulation*. Hanser Publishers.
- [13] Suomela-Uotila, H. (2014). *Materiaali- ja energiatehokkuus muovipohjaisten pakkausten kehityksessä*.
- [14] Ávila, J., Borja, V., López-Parra, M. & Ramírez-Reivich, A. C. (2018, tammi-kuuta 10). Energy and GHG Emissions Assessment in a Plastic Injection Process at Machine Component Level: A Case Study of ABS Plastic Part Produced in a Hybrid Injection Molding Machine. ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.



- [15] Szaky, Tom. *The Future of Packaging: From Linear to Circular*. Oakland: Berrett-Koehler Publishers, 2019. Print.
- [16] Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P. & Cullen, J. Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production* (2013), 51, 133–141.
- [17] Ragaert, K., Delva, L. & Van Geem, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* (2017), 69, 24–58.
- [18] Hegberg, B. A., Brenniman, G. R. & Hallenbeck, W. H. (1992). *Mixed plastics recycling technology*. Noyes Data Corp.
- [19] Francis, R. (2016). *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- [20] Imelda. *Variable Pricing and the Cost of Renewable Energy*. National Bureau of Economic Research, 2018. Print.
- [21] Filho, Walter Leal et al. "An Assessment of Attitudes Towards Plastics and Bioplastics in Europe." (2021): n. pag. Print.