

Iida Saarimaa

TEKNISET HAASTEET KULUTTAJAMUOVIPAKKAUSTEN KIERTOTALOUDEN MUKAISESSA KIERRÄTTÄMISESSÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Iida Saarimaa: Tekniset haasteet kuluttajamuovipakkausten kiertotalouden mukaisessa kierrättämisessä

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma

Huhtikuu 2023

Kiertotalous on talousjärjestelmä, jossa energia- ja materiaalikierrot pyritään sulkemaan. Kiertotaloudessa neitseellisen materiaalin käyttöä pyritään minimoimaan esimerkiksi kulutusta vähentämällä, tuotteita uudelleenkäyttämällä sekä kierrättämällä. Globaalisti kierrättäminen on näistä painotetuista osista, vaikka materiaalin arvon säilymisen kannalta sen pitäisi olla vasta yksi viimeisimmistä vaihtoehdoista. Kierrättämisen painottamisesta huolimatta siihen liittyy paljon teknisiä ongelmia, jotka ovat esteenä kiertotalouden mukaiselle, toistuvalla kierrättämiselle. Tässä työssä määritellään vaatimukset, jotka kiertotalouden mukaisen kierrättämisen tulisi täyttää sekä tarkastellaan, minkälaisia haasteita niiden saavuttamiseen liittyy. Näitä haasteita sekä niiden ratkaisuja käsitellään kuluttajamuovipakkausten kierrättämisen kautta, ja aineistona käytetään aiheeseen liittyvää kirjallisuutta.

Työssä suurimmiksi haasteiksi todetaan kierrätysmateriaalin riittävyyden, laadun sekä kestävyys- ja takuun takaaminen. Kiertotalouden mukaisessa yhteiskunnassa hyvälaatuisia kierrätysmateriaaleja tulee siis olla saatavilla niin, että sitä pystytään kilpailukykyisesti käyttämään uusissa tuotteissa. Tämän lisäksi kierrättämisen tulee olla niin ekologisesti, sosiaalisesti kuin taloudellisesti kestävä.

Kuluttajamuovipakkausten tapauksessa sekä keräys- että kierrätysasteet ovat vielä kaukana EU:n asettamista tavoitteista, ja niiden nostamisessa esimerkiksi kuluttajien informointi ja pakkausten kierrätyksen huomioiva suunnittelu on tärkeää. Oikeanlainen suunnittelu mahdollistaa myös mahdollisimman vähäisen laadun heikkenemisen mekaanisessa kierrätyksessä. Mekaaninen kierrätys kuitenkin aiheuttaa aina jonkin verran polymeeriketjujen hajoamista, mutta sekä siinä että kemiallisessa kierrätyksessä myös muovin seassa olevat epäpuhtaudet ovat riski kierrätysmuovin laadulle. Toisaalta huonontunutta laatua voidaan parantaa erilaisilla lisäaineilla, mutta myös niiden käytössä on omat haasteensa kiertotaloudessa.

Sekä riittävyyden että laadun ongelmiin ratkaisuna nähdään mekaanisen sekä kemiallisen kierrätyksen integroiminen. Kuitenkin tämän toteuttaminen kestävästi on haastavaa, vaikka sekä mekaaninen että kemiallinen kierrätys ovat kestävämpiä vaihtoehtoja kuin muovin polttaminen tai loppusijoittaminen kaatopaikalle. Tulevaisuudessa uusia kestävämpiä ratkaisuja löytyy myös teknologian kehityksen ja digitalisaation kautta.

Avainsanat: kiertotalous, muovien kierrättäminen, kuluttajamuovipakkaus, kestävyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KULUTTAJAMUOVIPAKKAUKSET JA NIIDEN KIERRÄTTÄMINEN	3
3. KIERRÄTETYN MATERIAALIN RIITTÄVYYS	7
3.1 Keräysasteen nostaminen	8
3.2 Kierrätysasteen nostaminen	10
4. KIERRÄTETYN MATERIAALIN LAATU	15
4.1 Kierrätyksen vaikutus materiaalien ominaisuuksiin	15
4.2 Uudelleenkierrätettävyys	18
4.3 Vaadittujen tuoteominaisuuksien saavuttaminen	22
5. KIERRÄTETYN MATERIAALIN KESTÄVYYS	25
6. YHTEENVETO	30
LÄHTEET	32

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3R	Reduce, reuse, recycling eli vähentäminen, uudelleen käyttö ja kierrättäminen
MFR	Melt Flow Rate, sulavirtaindeksi, ennen MFI
MWIR	Mid-wavelength infrared eli keskiaaltainen infrapunasäteily
NIR	Near-infrared eli lähi-infrapunasäteily
O	Others eli muut muovilaadut
PE	Polyeteeni
PE-HD	Korkeatiheyksinen polyeteeni, myös HDPE
PE-LD	Matalatiheyksinen polyeteeni, myös LDPE
PET	Polyeteenitereftalaatti
PLA	Polylaktidi
PS	Polystyreeni
PVC	Polyvinyylikloridi
TRL	Technology readiness level, teknologian kypsyystaso

1. JOHDANTO

Kiertotalous on esimerkiksi EU:ssa tavoiteltu talousjärjestelmä, jossa materiaali- ja energiakierron pyritään sulkemaan [1]. Järjestelmässä lineaarinen elinkaari korvataan kiertävällä mallilla, jossa materiaali pidetään käytössä mahdollisimman pitkään 3R-periaatteen avulla eli kulutusta vähentämällä (engl. reduce), tuotteita ja komponentteja uudelleen käyttämällä (engl. reuse) sekä kierrättämällä (engl. recycle). Tavoitteena on turvata ekologinen, taloudellinen ja sosiaalinen kestävyys sekä nykyisille että tuleville sukupolville. Kiertotalouteen siirtyminen tarkoittaa muutoksia niin tuotteissa kuin kuluttajien, yritysten sekä yhteiskuntien toiminnassa. [2]

Jo vuonna 1999 tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että pelkkä tuotteen kierrätys sen käytön loputtua kuluttaa energiaa jopa enemmän kuin perinteinen lineaarinen malli, jossa tuote hyödynnetään energiaksi esimerkiksi polttamalla käytöstä poiston jälkeen. Samassa tutkimuksessa kävi ilmi, että tuotteen ylläpito, uudelleenkäyttö sellaisenaan ja komponentteina sekä lopulta sen materiaalien kierrättäminen säästää energiaa ja vähentää jätteen määrää merkittävästi verrattuna lineaariseen malliin. [3] Silti edelleen globaalisti kierrättäminen on 3R-periaatteen painotetuin osa, jolloin uudelleenkäyttö ja kulutuksen vähentäminen jäävät sen varjoon [4]. Tästä syntyy siis selkeä ristiriita, minkä vuoksi on tärkeää tarkastella kierrättämistä myös kriittisesti.

Huomioitavaa on, että vaikka kierrättämiseen keskitytään muita kiertotalouden toimenpiteitä enemmän, Euroopassa kierrätetyn materiaalin osuus kaikesta käytetystä materiaalista vuonna 2020 oli vain noin 12 %. Suomessa vastaava luku oli 2 %. [5] Lisäksi Suomessa vuonna 2021 kaikesta yhdyskuntajätteestä kierrätettiin vain 37 %. Suomi kuitenkin pyrkii kiertotalouden edelläkävijämaaksi, jolloin tavoitteena on nostaa tämä kierrätysaste 65 %:iin vuoteen 2035 mennessä. [6] Tavoitteiden ja nykytilanteen suuri ero kertoo selkeästi sen, että nykyisiä kierrätyksen toimintamalleja tulee kehittää. Tämän työn tarkoituksena onkin selvittää, millaisia vaatimuksia kiertotalouden mukaisen kierrättämisen tulee täyttää. Toisena tavoitteena on pohtia, millaisia haasteita vaatimusten täyttämiseen liittyy ja miten niitä voidaan ratkaista. Tutkimus rajataan käsittelemään prosessien haasteita, eli aiheeseen liittyvän lainsäädännön vaikutusta ei tarkastella.

Työssä käytetään esimerkkimateriaalina kuluttajamuovipakkauksia, jotka tuovat hyvin esiin kiertotalouden ja kierrättämisen haasteet. Jopa EU:n etenemissuunnitelmassa kohti resurssitehokasta Eurooppaa on erillinen toimintaohjelma muovien kiertotaloudesta. Syy erittelyyn löytyy muovien ongelmista, sillä muovien uudelleenkäyttö- ja kierrätysaste on alhainen, niiden tuotannossa ja poltossa syntyy kasvihuonekaasuja, ja ne aiheuttavat merkittäviä jäteongelmia joutuessaan luontoon. [1] Vuonna 2017 kaikesta EU:ssa käytetystä muovista 59 % oli pakkauskäyttöön, ja siitä 42 % kierrätettiin [1], [7]. Nyt EU:n tavoitteena on, että vuonna 2030 Euroopan sisällä tuotetusta muovipakkausjätteestä 55 % kierrätettäisiin. [1] Suomessa tämän lisäksi pyritään 50 %:n kierrätysasteeseen vuoteen 2025 mennessä, mutta esimerkiksi vuonna 2021 kierrätysaste oli vain 24 % [8], [9]. Muovipakkausten kierrättämistä tulee siis tehostaa, jotta tavoitteet voidaan saavuttaa ja kiertotalouteen siirtyminen olisi mahdollista.

Työssä aiheen käsittely alkaa kuluttajamuovipakkauksien teorian käsittelyllä luvussa 2. Seuraavissa luvuissa puolestaan käsitellään kiertotalouden eri vaatimuksia, sekä niihin liittyviä ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja. Luvussa 3 ensimmäisenä vaatimuksena käsitellään kierrätysmateriaalin riittävyttä keräys- ja kierrätysasteen nostamisen näkökulmasta. Neljännessä luvussa toiseksi vaatimukseksi esitellään kierrätysmateriaalin laatu, johon liittyviä ongelmia eritellään luvuissa 4.1 ja 4.2. Ratkaisuja esitettyihin ongelmiin puolestaan pohditaan luvussa 4.3. Viimeisenä kiertotalouden vaatimuksena nähdään kestävyys, johon liittyviä ristiriitoja käsitellään luvussa 5. Vaikka työssä keskitytäänkin muovipakkauksiin, esitellyt kiertotalouden vaatimukset pätevät myös muihin tuotteisiin.

2. KULUTTAJAMUOVIPAKKAUKSET JA NIIDEN KIERRÄTTÄMINEN

Kuluttajamuovipakkaukset ovat nimensä mukaisesti kuluttajalle päätyviä muovipakkauksia. Niitä käytetään esimerkiksi elintarvikkeiden tai muiden tuotteiden pakkaamiseen. Suomessa kuluttajamuovipakkaukset kerätään kierrätystä varten pullonpalautus- tai Rinki-pisteiden kautta. Pakkauksissa käytettävät muovit, niiden yleisimmät käyttökohteet ja materiaalimerkinnot sekä keräystapa kierrätystä varten ovat listattuna taulukkoon 1.

Taulukko 1: Kuluttajamuovipakkausten materiaalimerkinnot, muokattu lähteestä [10].

Merkintä	Materiaali	Käyttö ja kierrätys
	Polyeteenitereftalaatti, joko öljy- tai osittain biopohjainen	Virvoitusjuoma- ym. pullot Pantilliset pullonkeräykseen muut muovinkeräykseen
	Korkeatiheyksinen polyeteeni (myös HDPE), joko öljy- tai biopohjainen	Mehupullot Pantilliset pullonkeräykseen muut muovinkeräykseen
	Polyvinyylikloridi	Harvoin pakkauksissa, mutta voidaan käyttää esim. lelupakkauksissa Muovinkeräykseen
	Matalatiheyksinen polyeteeni (myös LDPE), öljy- tai biopohjainen	Muovikassit ja -kalvot Muovinkeräykseen
	Polypropeeni, joko öljy- tai biopohjainen	Rasiat ja kalvot Muovinkeräykseen
	Polystyreeni	Rasiat ja purkit Muovinkeräykseen
	Yllä olevien yhdistelmä tai muu muovi	Pakkauksia Jos yli puolet muovia, kierrätys muovinkeräyksen kautta

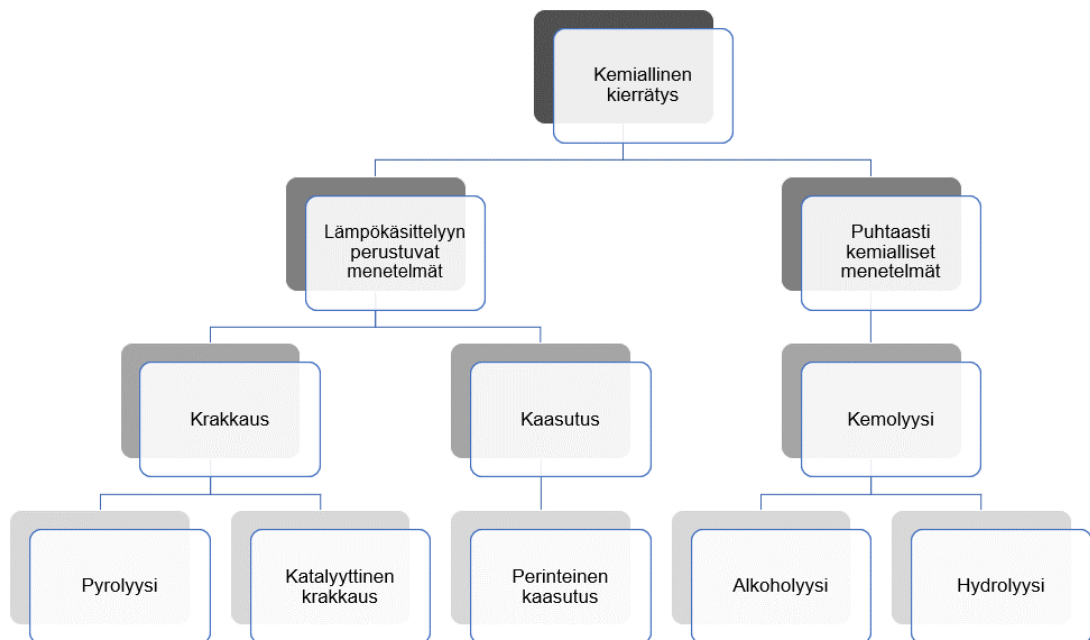
Muovit ovat perinteisesti öljypohjaisia, mutta pakkauksissa voidaan käyttää myös biopohjaisia muoveja [11]. Kuitenkin EU-tasolla biopohjaisten muovien kulutus on noin 0,5–1 % kaikesta kulutetusta muovista vuosittain [1], mutta niiden käyttö lisääntyy tulevaisuudessa. Biopohjaiset muovit ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia kuin öljypohjaisetkin, mutta niiden valmistukseen on käytetty esimerkiksi sokeriruokoa tai tärkkelystä. Esimerkiksi PE- ja PET-muovit voidaan valmistaa joko kokonaan tai osittain uusiutuvista raaka-aineista. [12] Biopohjaiset muovit kerätään ja kierrätetään kuten öljypohjaisetkin, eikä niille ole erillisiä materiaalimerkintöjä EU-alueella [13]. Biopohjaisten muovien lisäksi pakkauksissa voidaan käyttää myös biohajoavia muoveja. Näistä yleisin on PLA (polylaktidi), jonka ominaisuudet vastaavat polystyreeniä. [11], [12] PLA:ta käytetään esimerkiksi pakkauskalvoissa sekä pulloissa [14]. PLA kerätään muun muovin seassa, mikäli pakkauksessa ei toisin mainita [13]. Biopohjaisista sekä biohajoavista muoveista käytetään usein yleisnimitystä biomuovi.

Pakkauksissa käytettävät muovit ovat kestumuoveja, eli ne pystytään sulattamaan ja prosessoimaan uudelleen tuotteiksi, joten ne pystytään myös kierrättämään. Muovit kerätään ja kierrätetään joko suljetusti tai avoimesti. Esimerkki suljetusta kierrosta on pantillisten muovipullojen kierrätys Suomessa. Pullot kerätään erillisten automaattien kautta, jolloin keräykseen päätyvä materiaali ja sen aiempi käyttötarkoitus tunnetaan tarkasti. Näin kierrätetty muovimateriaali voidaan jälleen käyttää esimerkiksi virvoitusjuomapulloihin eli samanarvoiseen tuotteeseen. Suljettua kiertoa voidaan kutsua myös primäärikierrätykseksi, joka terminä kattaa myös tuotteen käytön uudelleen sellaisenaan. Tällä tavoin kierrätettynä materiaalin ominaisuudet sekä arvo säilyy paremmin. [15]

Muu muovijäte kierrätetään avoimesti, eli jätteen seassa on muovia useista eri lähteistä. Tällöin kierrätysmenetelmät voidaan jakaa vielä edelleen sekundääriseen ja tertiääriseen kierrätykseen. Sekundäärinen eli mekaaninen kierrätys tarkoittaa muovien muokkausta raaka-ainegranulaateiksi. Menetelmän vaiheita keräyksen jälkeen ovat esimerkiksi rouhinta, pesu, kuivaus, lajittelu, sulatus ja granulointi. Myös suljetun kierron kautta kerätty muovi kierrätetään mekaanisesti. [15] Tällä hetkellä Rinki-ekopisteiden kautta kerätty muovijäte kuljetetaan Fortumin muovijalostamolle kierrätettäväksi, missä muovien lajittelu tapahtuu peräkkäisillä lähi-infrapunaspektroskopiaan (NIR, near-infrared) perustuvilla automaattisilla laitteistoilla. [16] Kierrätysmuoviasetuksen [17] vuoksi avoimesti kierrätettyä muovia ei tällä hetkellä voi käyttää elintarvikepakkauksissa kontaktimateriaalina, sillä se ei täytä tiukkoja turvallisuusvaatimuksia.

Tertiäärinen kierrätys puolestaan tarkoittaa muovin kemiallista kierrätystä takaisin muovin raaka-aineiksi. Tämä tapahtuu pilkkomalla polymeeriketjut oligo- tai

monomeereiksi muun muassa krakkauksella, kaasutuksella tai puhtaasti kemiallisilla menetelmillä. Krakkaus ja kaasutus ovat termolyttisiä eli lämpökäsittelyyn perustuvia menetelmiä. Niiden lopputuotteena syntyy öljyä, vahamaista ainetta tai kaasua. Krakkausmenetelmiä ovat esimerkiksi pyrolyysi ja katalyyttinen krakkaus. Pyrolyysissä polymeerit pilkotaan lämmön avulla hapettomissa olosuhteissa 300–700 °C:ssa. Katalyyttisessä krakkauksessa käytetään katalyyttejä, joiden avulla prosessilämpötila saadaan laskettua 450–550 °C:seen. Kaasutus on prosessina pyrolyysin kaltainen, mutta se ei tapahdu hapettomissa oloissa, vaan prosessissa käytetään apuna ilmaa. Kaasutuksessa prosessilämpötila on 700–1 200 °C. Menetelmille yhteistä on korkean prosessilämpötilan johtaminen parempaan lopputuotteen laatuun. [18] Käsitellyt kemiallisen kierrätyksen menetelmät ja niiden jaottelu on nähtävissä kuvasta 1.



Kuva 1. Kemiallisen kierrätyksen menetelmät, muokattu lähteestä [18].

Puhtaasti kemialliset menetelmät perustuvat kemolyysiin, jossa polymeeriketjut pilkotaan pienemmiksi osiksi eli depolymerisoidaan kemikaalin avulla. Pilkkominen ei siis perustu lämpöön, minkä vuoksi prosessilämpötilat ovat termolyttisiin menetelmiin verrattuna matalampia. Menetelmät soveltuvat kuitenkin vain homogeenisen muovijätteen kierrättämiseen, kun taas termolyttisillä menetelmillä voidaan kierrättää myös heterogeenistä jätettä. [18], [19] Kemolyysiin perustuvia menetelmiä on useita, ja ne on nimetty käytetyn kemikaalin mukaan. Yleisimpiä kemikaaleja ovat vesi ja erilaiset alkoholit, ja niitä käytetään esimerkiksi hydrolyysissä ja alkoholyyysissä [19]. Myös PLA on kierrätettävissä näillä menetelmillä [20].

Kuten mekaaniseen kierrätykseen, myös kemialliseen kierrätykseen liittyy aina erilaisia esikäsittelyvaiheita, mutta ne vaihtelevat jonkin verran käytetyn menetelmän mukaan. Kuitenkin on yleistä, että jäte pestään, kuivataan sekä rouhitaan tai jotenkin muuten muokataan homogeeniseksi syötteeksi ennen varsinaista prosessia [21]. Esimerkiksi pyrolyysin syötteeksi ei sovi jäte, joka koostuu erimuotoisista muovipakkauksista, jotka saattavat sisältää myös muita materiaaleja tai orgaanista jätettä. Ratkaisuksi VTT kehitti modulaarisen ekstruuderin, jolla erimuotoiset muovipakkaukset käsitellään pyrolyysiin sopivaksi homogeeniseksi sulaksi. [22] Myös lajittelu on tärkeä kemiallisen kierrätyksen esikäsittelyvaihe, sillä eri menetelmien syötteille on erilaisia rajoituksia [18], [22], [23].



Kuva 2: TRL-tasot, muokattu lähteestä [24].

Kuvassa 2 on esitelty teknologisen kypsyyden (TRL, engl. technology readiness level) tasot. Perinteisellä pyrolyysillä ja kaasutuksella sekä katalyyttisellä krakkauksella on tason 9 TRL, eli kuvan 2 mukaisesti näillä menetelmillä kemiallinen kierrätys pitäisi onnistua kilpailukykyisesti [18]. Suomessa rakennetaan useita muovien kemialliseen kierrätykseen keskittyviä jätteidenkäsittelylaitoksia, joista osa on jo toiminnassa. Esimerkiksi Nokialla toimiva Wastewise Group Oy kierrättää PE- ja PP-pohjaisia muoveja pyrolyysin avulla [25]. Myös jotkin kemolyysiin perustuvat teknologiat, esimerkiksi hydrolyysi, ovat kaupallistettuja, eli nekin voidaan luokitella TRL-tasolle 9 [21].

3. KIERRÄTETYN MATERIAALIN RIITTÄVYYS

Kiertotaloudessa käytetty materiaali pyritään pitämään mahdollisimman pitkään käytössä, minkä jälkeen se kierrätetään ja käytetään uudelleen. Tällöin kierrätettyä materiaalia on nykyistä enemmän saatavilla. Siirtyminen tähän vaatii kuitenkin sekä materiaalin keräys- että kierrätysasteen kasvattamista. Keräysasteella tarkoitetaan kierrätyskeskukselle päätyvän erilliskerätyn jätteen osuutta kaikesta muovijätteestä [26]. Kierrätysaste taas on monimutkaisempi määritellä, sillä sen määritelmä on muuttunut vuonna 2020. Vanhan määritelmän mukaan kierrätysaste tarkoittaa samaa kuin keräysaste, eli sillä mitattiin vain keräykseen päätyvän jätteen määrää. Vuonna 2020 jätelainsäädännön uudistuksen vuoksi määritelmä kuitenkin muuttui siten, että vain uusioraaka-aineeksi päätyvä muovi huomioidaan kierrätysasteessa. Uudella tavalla laskettuna kierrätysaste on siis uusiokäyttöön päätyvän muovin suhde kaikkeen muovijätteeseen. [27]

Uusi määritelmä on mittaavampi, sillä se huomioi kierrätysprosessin onnistumisen. Siksi kierrätysasteen saavuttamiseen liittyy vahvasti myös kierrätysprosessin saanto, joka kuvaa prosessin lopputuotteena saadun uusiomateriaalin määrää suhteessa prosessin raaka-aineen eli kierrätettävän jätteen määrään. Ilman korkeaa saantoa ei kierrätysastekaan voi olla kovin korkea ainakaan kustannustehokkaasti. Toisaalta uusi määritelmä tarkoittaa myös sitä, että keräysasteen tulee olla huomattavasti korkeampi kuin 55 %. Keräysaste on teoreettinen maksimi kierrätysasteelle, mutta todellisuudessa rejektiksi lajiteltu muovi laskee lopullista kierrätysastetta. Rejektin määrää kuvataan lajitteluasteella. Kun rejektiä on 20 % kerätystä muovista, lajitteluaste on 80 %. Jos keräysaste, lajitteluaste sekä kierrätysprosessin saanto olisivat kaikki 80 %, kierrätysasteeksi saadaan 51,4 %. [9] EU:n tavoitteleman 55 %:n kierrätysasteen saavuttaminen vaatii siis jopa yli 80 %:n onnistumista niin keräyksessä, lajittelussa kuin itse kierrätysprosesseissa.

On huomioitavaa, että tällä hetkellä Suomessa kerätään ja kierrätetään laajamittaisesti vain muovipakkauksia, eli muoviset tuotteet lajitellaan edelleen sekajätteeksi tai viedään kierrätyslaitokselle. Kiertotalouteen siirryttäessä myös muiden muovituotteiden kierrätystä tulisi kehittää, vaikka pakkaukset ovatkin muovien suurin yksittäinen käyttökohde [1]. Lisäksi muovijätteen määrien kasvaessa ja keräyksen tehostuessa myös kierrätykseen vaadittu kapasiteetti tulee nousemaan. Tulevaisuudessa tarvitaan siis useampia kierrätyslaitoksia ympäri Suomen, ja niitä onkin jo suunnitteilla [9].

3.1 Keräysasteen nostaminen

Suomessa vuonna 2021 pantittomien muovipakkausten keräysaste oli noin 41 % [9] ja pantillisten 90 % [28]. Tavoiteltu 55 %:n kierrätysaste kattaa kaikki muovipakkaukset eli sekä pantilliset että pantittomat. Jotta kierrätysaste saataisiin nostettua tavoitteeseen, tulisi erityisesti pantittomien muovipakkausten keräysasteen olla merkittävästi suurempi. Siksi onkin tärkeää saada kaikki kuluttajat kierrättämään. Sen saavuttamiseksi Suomen Uusiomuovi Oy on eritellyt erilaisia keinoja POLKU 2025 -suunnitelmaansa. Yhtenä keinona kerrotaan kuluttajien sekä yrityksiensä tiedottaminen kierrättämisen oikeista tavoista sekä eduista [8]. Tämä onkin tärkeää, sillä muovien kierrättämisen liittyy paljon epävarmuutta. Vaikka netistä löytyykin useita verkkosivuja muovien kierrättämisen ohjeista, osa niistä sisältää vanhentunutta tietoa. Esimerkiksi PVC-pakkaukset voidaan nykyään kerätä muun muovin mukana [29], mutta vanhemmille sivuille tätä tietoa ei ole päivitetty [30], [31]. On siis mahdollista, että kuluttaja toimii vanhentuneen tiedon perusteella ja päätyy kierrättämään väärin. Lisäksi ohjeiden selvittäminen vaatii kuluttajalta kiinnostusta kierrättämiseen sekä kärsivällisyyttä etsiä uusin tieto. Helpot, saatavilla olevat ohjeet voisivat siis lisätä kierrättäjien määrää. Kuitenkin nettisivujen sijaan tieto olisi helpommin saatavilla suoraan pakkauksista, ja tällaisia ohjeita onkin jo nähtävissä muun muassa Saarioisen (Kuva 3 a) ja Valion pakkauksissa (kuva 3 b).



Kuva 3. Pakkauksien kierrätysohjeet a. Salaatinkastikepullossa b. Maitotölkissä.

Kuvan 3 a salaatinkastikepakkauksen kierrätysohjeistuksessa mainitaan, että pakkauksen muoviosat tulee irrottaa toisistaan. Tämä sääntö pätee aina, kun tuotteessa käytetään montaa muovia. Tässä tapauksessa salaatinkastikepakkauksen korkki on tehty eri materiaalista kuin itse pullo. Jos pakkaus viedään keräykseen korkki kiinni pullossa, korkin polypropeeni voi joutua pullon PET:n kanssa samaan

kierrätysjakeeseen tai koko pakkaus rejektiin. Myös jauhelihapakkauksien rasia ja kalvo voivat olla eri muovia, jolloin myös niiden irrottaminen toisistaan on tärkeää.

Kuvan 3 b pakkauksessa materiaalien erottelun lisäksi ohjeistetaan huuhtelemaan pakkaus. Pakkauksien huuhtelu onkin tärkeää, sillä pakkauksiin jäävä lika häiritsee kierrätysprosessia. Kuitenkaan pesuohjetta ei ole Saarioisen salaatinkastikepurkissa, vaikka myös sen huuhtelu on yhtä tärkeää. Pakkauksiin liitetyt ohjeistukset eivät siis aina kerro kaikkea tarpeellista, eli kuluttajalle jää jälleen vastuu oikeaoppisesta lajittelusta. Kuitenkin pakkauksiin liitettäviä ohjeistuksia voitaisiin yhtenäistää esimerkiksi lainsäädännön avulla, jolloin kaikista pakkauksista löytyisi materiaalikoodi sekä ohjeistus pakkauksen lajitteluun huomioiden pakkauksen huuhtelu sekä eri materiaalien irrottaminen toisistaan.

Tiedottamisen lisäksi toinen tapa kasvattaa keräysastetta on keräyspisteiden määrän lisääminen sekä sijoittelu niin, että kaikilla on mahdollisuus kierrättää. Tämäkin keino löytyy Suomen Uusiomuovi Oy:n POLKU 2025 -suunnitelmasta [8]. Tällä hetkellä kierrättäminen onnistuu helposti esimerkiksi taloyhtiöissä asuville sekä isoimpien kauppojen asiakkaille. Kuitenkin pienemmissä kunnissa kierrätyspisteet saattavat löytyä vasta naapurikunnasta tai olla erillään kaupoista, jolloin kotona syntynyt jäte täytyy erikseen viedä keräykseen. [32] Tämä saattaa muodostua jopa esteeksi kierrättämisestä kiinnostuneelle. Keräyspisteiden helppo saatavuus myös alentaa kynnystä kierrättämisen aloittamiselle.

POLKU 2025 -suunnitelmassa esitellään myös suunnittelun vaikutus keinona kierrätysasteen nostamiselle [8]. Kierrätyksen huomioivassa suunnittelussa nimensä mukaisesti suunnitellaan tuote helposti kierrätettäväksi. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi yleisesti kierrätettävien materiaalien valintaa tuotteeseen sekä tuotteen suunnittelemista niin, että materiaalit ovat mahdollisimman yksinkertaisesti irrotettavissa toisistaan. [33, s. 127] Suunnittelu vaikuttaa kuitenkin kierrätettävyyden lisäksi myös keräysasteen nostoon tekemällä kierrättämisestä kuluttajalle helpompaa. Esimerkiksi juuri helposti toisistaan irrotettavat materiaalit helpottavat lajittelua, mikä laskee kuluttajan kynnystä kierrättää kotitalousjätteensä.

Vaikka kierrättämisen tekisi kuinka helpoksi, sen aloittaminen vaatii kuluttajalta tahtoa ja muutoksia arkipäiväiseen käyttäytymiseen. Mikäli kierrättämiskäyttäytyminen opetetaan jo lapsena, se todennäköisesti tekee kierrättämisestä itsestäänselvyuden myös aikuisuudessa. Siksi onkin tärkeää, että kierrättäminen opetetaan jo peruskoulussa. Kiertotalousosaamisen opettaminen onkin tärkeä osa kiertotalouteen siirtymisessä ja sen onnistumisessa [34]. Lisäksi digitalisaatio voi olla ratkaisu kuluttajien

kannustamiseen. Esimerkiksi ruotsissa on kehitetty kierrätyksestä palkitseva sovellus, Bower. Boweriin skannatut tuotteet kierrätetään tavallisesti, mutta sovelluksen kautta siitä saa pisteitä, joita keräämällä saa alennuksia tai rahapalkkioita. Sovelluksessa näkyy myös kierrättämisen kautta vähennetty hiilidioksidin määrä, mikä konkretisoi kuluttajalle kierrättämisen hyödyt. [35] Näin tavallisesta kierrättämisestä saadaan kuin ilman erillistä keräyspistettä toimiva pantillinen järjestelmä, joka toimii muovien lisäksi muillekin kierrätettäville materiaaleille. Sovelluksen kautta kuluttaja saa palkinnoista ylimääräisen motivaationlähteen kierrättämiseen ja siten se voi myös lisätä kierrättäjien määrää ja nostaa keräysastetta. Sovellus ei kuitenkaan ota huomioon sitä, päätyykö kuluttajan kierrättämä muovi todella uuden kierrätysmuovin raaka-aineeksi.

3.2 Kierrätysasteen nostaminen

Vuonna 2021 kierrätysaste oli uusimman määritelmän mukaan noin 24 %, eli kierrätysmuovia tuotettiin 25,6 kilotonnia [9]. Kierrätetyn materiaalin saatavuuden takaamiseksi kierrätysprosessin tulisi olla mahdollisimman tehokas ja saannon mahdollisimman korkea. Vuonna 2019 Fortumille saapuneesta muovijätteestä vain 37 % pystyttiin kierrättämään uudelleenkäytettäväksi raaka-aineeksi, ja saanto on pysynyt samalla tasolla vuoteen 2021 asti [36], [37]. Heikko saanto johtuu pääosin suuresta rejektin määrästä. Fortumin tavoitteena on kuitenkin nostaa kierrätysaanto yli 60 %:iin lähivuosina, mutta se vaatii teknologian kehittymistä. Fortumin mukaan pelkkä mekaaninen kierrätys ei tulevaisuudessa riitä, vaan sen lisäksi tarvitaan esimerkiksi kemiallista kierrätystä. [37] Tämä pitänee paikkansa, sillä mekaaniseen kierrätykseen liittyy monia ongelmia.

Yksi ongelmista on muovijätteen epäpuhtaudet, sillä likaisen muovin mekaaninen kierrättäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa [22]. Epäpuhtauksia ovat esimerkiksi muovin seassa olevat muut materiaalit sekä lika. Suuri osa kuluttajamuovipakkauksista on elintarvikepakkauksia, joten pakkausten mukana kierrätykseen kulkeutuu usein esimerkiksi orgaanista jätettä sekä pakkausten etikettejä. Ongelman ratkaisemisessa tärkeässä osassa ovat kuluttajat, sillä mitä puhtaampina muovipakkaukset lajitellaan, sitä vähemmän epäpuhtauksia tarvitsee poistaa kierrätyslaitoksilla. Kuluttajien opastaminen tekee siis kierrätysprosessista helpomman ja mahdollisesti jopa tuottavamman, sillä jos muovijätettä ei saada pestyä kierrätyslaitoksella tarpeeksi puhtaaksi, sitä ei välttämättä tunnisteta lajittelulinjastolla ja se päättyy rejektinä poltettavaksi.

Myös biohajoavat muovit voivat epäpuhtauksien tavoin aiheuttaa ongelmia valtamuovien kierrättämisessä. Ne voivat heikentää mekaanisesti kierrätetyn materiaalin laatua

joutuessaan tavallisen muovin sekaan aiheuttaen kierrätetyn muovin ennenaikaista hajoamista [38, s. 104]. Biohajoavia muoveja, erityisesti PLA:ta, pystyisi kuitenkin kierrättämään myös mekaanisesti omana jakeenaan, vaikka se onkin alun perin tarkoitettu kompostoitavaksi. Kuitenkin kierrättäminen vaatisi suurempien PLA-määrien päätymistä kierrätettäväksi, mitä ei tällä hetkellä tapahdu. [20] Siksi esimerkiksi Fortumille päätyvä PLA sekä muut biohajoavat muovit poltetaan energiaksi [12]. Tulevaisuudessa biohajoavien muovien yleistyessä on kuitenkin mahdollista, että niille syntyy oma kierrätysvirta ja näin myös biohajoava muovi saataisiin kiertoon. On esitetty, että se kuitenkin vaatisi 5–18 kilotonnin jätevirran PLA:ta vuosittain [20]. Silloin voisi olla hyödyllistä, että PLA:lla olisi erillinen keräys, jolloin sen kierrättäminen tulisi helpommaksi eikä se häiritsisi muiden muovien kierrättämistä [39].

Kuitenkin monimutkaisempi ongelma muovien mekaanisessa kierrätyksessä on monikerrosmuovien kierrättäminen. Monikerrosmuoveja käytetään esimerkiksi elintarvikepakkauksissa parempien säilyvyysominaisuuksien takaamiseksi. Ne koostuvat useammasta kerroksesta polymeerejä sekä liima-aineita. [40] Ensimmäinen ongelma niiden kierrättämisessä syntyy jo siinä, että kaikki monikerrosmuovit saavat kierrätyskoodin 07, vaikka ne ovat keskenään usein hyvin erilaisia ja sisältävät eri materiaaleja. Tehokkaamman lajittelun saavuttamiseksi niissä olisi hyvä olla tarkemmat tunnisteet siitä, mitä materiaaleja ne sisältävät. Tämä olisi hyödyllistä myös siksi, että lajittelulaitteistot tunnistavat vain muovin päällimmäisen kerroksen [40]. On siis mahdollista, että monikerrosmuoveja päätyy eriteltyjen muovijakeiden sekaan haitaten siten kierrätysprosessia ja lopputuotteen laatua.

Suurin ongelma monikerrosmuovien kierrättämisessä on kuitenkin kerrosten erottelussa. Tällä hetkellä monikerrosmuovien eri kerroksia ei pystytä erottelamaan toisistaan ennen mekaanista kierrätystä, joten muoveja ei pystytä kierrättämään [40]. Ilman erottelua kerrosten prosessointi yhdessä aiheuttaisi ongelmia lopputuotteen laatuun, mutta usein sulaprosessointi ei ole edes mahdollista. Tämä johtuu siitä, että eri muoveilla on eri sulamispisteet, minkä vuoksi on mahdollista, ettei jokin monikerrosmuovin polymeereistä sula toisen prosessointilämpötilassa. Jos taas korkeamman sulamispisteen muovi pyritään sulattamaan, voi matalamman sulamispisteen muovi alkaa hajoamaan. [38, ss. 28–30] Siksi tällä hetkellä monikerrosmuovit hyödynnetään energiantuotannossa polttamalla.

Kerroksien erotteluun kehitetään kuitenkin jatkuvasti uusia keinoja, joten tulevaisuudessa monikerrosmuovit voidaan mahdollisesti kierrättää myös mekaanisesti esikäsiteltyjen jälkeen. Lupaavimmat menetelmät ovat liuoksiin perustuvia. Eräs tällainen menetelmä on delaminaatio (engl. delamination), jossa kerrokset erotellaan

liuottamalla niiden välissä oleva liimakerros. Toinen menetelmä perustuu muovien erilaiseen liukoisuuteen. Valikoivassa liuottamisessa (engl. selective-dissolution) monikerrosmuovin eri muovilaatuja liuotetaan irti muovilaatu kerrallaan. Tällä hetkellä nämä menetelmät eivät kuitenkaan vielä toimi teollisessa ympäristössä. [40] Termolyytisillä menetelmillä, kuten pyrolyysillä ja kaasutuksella, monikerrosmuovien kierrättäminen on kuitenkin mahdollista ilman kerrosten erottelua [18]. Toisaalta biohajoavat muovit asettavat omat rajoituksensa tähänkin, sillä esimerkiksi PLA:n kierrättäminen kemiallisesti onnistuu vain homogeenisestä jätteestä [19]. PLA:ta sisältävät monikerrosmuovit päätyvät siis joka tapauksessa energiahyötykäyttöön, sillä niiden kierrätys ei ole mahdollista nykyisillä teknologioilla.

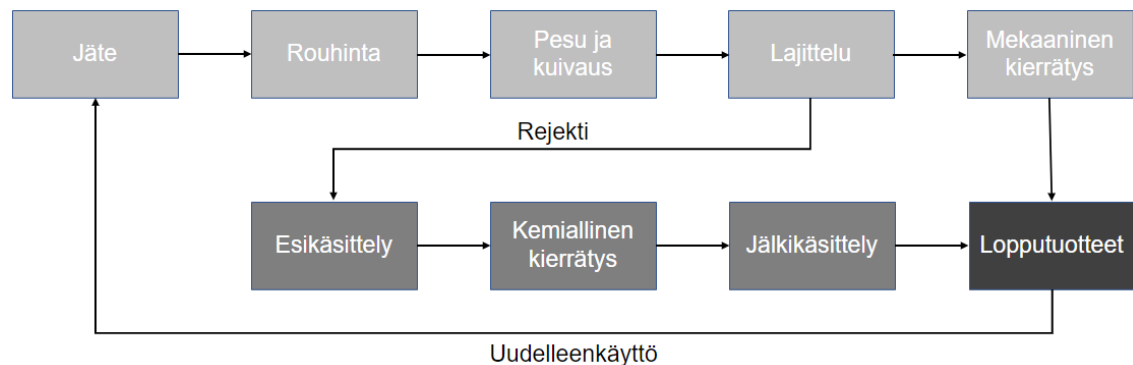
Kemialliseen kierrätykseen liittyy myös muita rajoituksia, vaikka se nähdäänkin usein ratkaisuna mekaanisen kierrätyksen ongelmiin. Eräs haasteista on menetelmien herkkyys syötteen materiaaleille. Esimerkiksi pyrolyysillä ei voi kierrättää PET:iä tai PVC:tä, sillä niiden hajoamistuotteet ovat riski prosessille [22]. Katalyyttisessä krakkauksessa taas muovijätteessä mahdollisesti oleva typpi tai kloridi estävät katalyyttien toiminnan vaarantaen koko prosessin [18]. Depolymerointimenetelmät, kuten hydrolyysi ja alkoholyysi, puolestaan soveltuvat vain kondensaatiopolymeereille, joita ovat esimerkiksi polyesterit sekä polyamidit [23]. Näiden rajoitusten takia tarkemmat tunnistustiedot monikerrosmuoveissa olisivat hyödyksi myös kemiallisessa kierrätyksessä. Tällöin prosessin kannalta haitalliset muovit osattaisiin varmemmin lajitella rejektiksi.

Muita rajoituksia asettaa syötteen epäpuhtaudet. Yleisesti kemiallinen kierrätys ja erityisesti termolyytiset menetelmät kestävät syötteen epäpuhtauksia paremmin kuin mekaaninen kierrätys [22], mutta ne voivat silti häiritä prosesseja. Esimerkiksi pyrolyysissä syötteen puhtaus vaikuttaa suoraan prosessin tehokkuuteen. Samoin kaasutuksessa prosessin saanto heikkenee, jos muovijätteen seassa on orgaanista jätettä tai kuituja. Epäpuhtaudet aiheuttavat myös merkittäviä ongelmia depolymerointimenetelmissä, minkä vuoksi niissä syöte vaatiikin eniten esikäsitteilyä. Epäpuhtausherkkyyden vuoksi näitä menetelmiä on vaikea hyödyntää teollisessa ympäristössä, vaikka depolymeroinnin lopputuotteet ovat kaupallisesti arvokkaimpia. [41]

Vaikka pyrolyysillä, kaasutuksella, katalyyttisellä krakkauksella sekä hydrolyysillä on korkein mahdollinen TRL-taso, niillä on silti omat rajoitteensa, kuten myös muilla kemiallisilla menetelmillä. Kemiallinen kierrätys ei siis yksinään riitä ratkaisemaan muovien kierrätysasteen nostoon liittyviä ongelmia. Kuitenkin sen avulla voidaan pienentää poltettavaksi päätyvän muovijätteen määrää. Termolyytisissä menetelmissä

muovijätteen heterogeenisyys, lika tai muut epäpuhtaudet pienissä määrin eivät häiritse prosessia, jolloin myös huonommin lajiteltua ja pestyä muovia voidaan kierrättää. Lisäksi esimerkiksi katalyyttisen krakkauksen saanto voi olla jopa 100 % onnistuessaan hyvin. [21], [22]

Tehokkain tapa nostaa kierrätysastetta olisi siis integroida mekaaninen ja kemiallinen kierrätys kuvan 4 mukaisesti, jolloin mekaanisen kierrätyksen rejektit kierrätettäisiin mahdollisuuksien mukaan kemiallisesti. Qureshi et al. [22] esittelivät tutkimuksessaan kuvan 4 kaltaisen kaavion pyrolyysin integroimisesta kierrätysjärjestelmään, mutta tätä ideaa voisi jalostaa niin, että pyrolyysin lisäksi olisi käytössä myös toinen kemiallisen kierrätyksen menetelmä. Tällöin myös esimerkiksi PET:n kemiallinen kierrätys onnistuisi helposti. Tutkimuksessa todettiin myös, että tehokkain tapa olisi rakennuttaa kemiallisen kierrätyksen laitokset mekaanisen kierrätyksen yhteyteen, jolloin rejektien kuljettaminen tapahtuu nopeasti ja taloudellisesti. [22]



Kuva 4. Mekaanisen ja kemiallisen kierrätyksen integroiminen, koottu lähteistä [22, s. 9], [38, s. 54]

Kierrätysprosessien erilaisten ongelmien vuoksi yksi tärkeimmistä keinoista kierrätysasteen nostamiseksi on suunnittelu. EU:n tavoitteiden mukaan vuonna 2030 kaikki muovipakkaukset tulee olla joko uudelleenkäytettäviä tai kierrätettäviä [1], minkä vuoksi kierrätettävyyden suunnittelu korostuu. Suunnittelun kautta voidaan vaikuttaa monilla tavoilla. Esimerkiksi vesiliukoisten liima-aineiden käyttö on suositeltavaa aina kun se on mahdollista, jolloin saman tuotteen eri muovilaadut irtoaisivat toisistaan jo pesuvaiheessa. Tämän lisäksi materiaalien merkkäminen tehostaa muovien erottelua ja monikerroskalvojen tunnistamista. [33, s. 92] Merkinnät voitaisiin tehdä esimerkiksi fluoresoivilla etiketeillä tai merkkiaineilla, mutta tällöin nykyiset NIR-laitteistot vaativat muokkausta [42]. Toisaalta kierrättämisen kannalta olisi hyvä, että pakkaukset suunniteltaisiin sisältämään vain yhtä muovia aina, kun se on mahdollista [33, s. 127].

Tämän lisäksi täysin mustien muovituotteiden suunnittelua olisi hyvä välttää, sillä niitä ei pystytä erottelemaan optisesti [43]. On kuitenkin tutkittu, että merkintäaineiden avulla

myös mustat muovituotteet voidaan erotella UV- ja röntgenfluoresenssispektroskopiaan perustuvilla lajittelumenetelmillä [44]. Lisäksi Suomessa on kehitetty mustan muovin tunnistava MWIR-teknologiaan (engl. mid-wavelength infrared, keskiaaltainen infrapunasäteily) perustuva kierrätyskamera [45]. Mustien muovien tunnistaminen voitaisiin siis mahdollistaa esimerkiksi ottamalla käyttöön MWIR-teknologia kierrätyslaitoksilla. Kuitenkin tärkeintä suunnittelussa on ottaa huomioon käytössä oleva infrastruktuuri [33, s. 91] — niin kauan kun Suomessa käytössä olevalla teknologialla ei voi tunnistaa mustia tai monikerroksisia muoveja, niiden käyttöä pakkauksissa tulee välttää. Esimerkki kierrätyksen kannalta hyvin suunnitellusta pakkauksesta on kuvassa 6.

4. KIERRÄTETYN MATERIAALIN LAATU

Kierrätysasteen nostaminen ei yksinään mahdollista kiertotaloutta, sillä kierrätettyä materiaalia tulisi myös hyödyntää nykyistä enemmän. Tällä hetkellä käyttöä rajoittaa muun muassa kierrätysmuovin heikompi laatu verrattaessa neitseelliseen muoviin. Tästä syystä sitä usein käytetään alkuperäistä tasoa alempaan käyttökohteeseen, eli materiaalin arvo heikkenee (engl. downcycling). Poikkeuksena on suljetun kierron kautta kierrätettävät virvoitusjuomapullot, joita voidaan kierrätyksen jälkeen edelleen käyttää elintarvikepakkaamiseen. Toisaalta avoimesti kierrätettyä muovia voidaan käyttää elintarvikepakkausissa monikerrosmuovien sisemmissä kerroksissa, mutta niiden aiemmin todettujen ongelmien vuoksi tämä ei välttämättä ole kiertotalouden mukainen keino. [17]

Kierrätysmuovin käyttöön vaikuttavan laadun voi jakaa prosessoitavuuteen sekä mekaanisiin ominaisuuksiin. Prosessoitavuuteen vaikuttaa reologiset ja termiset ominaisuudet. Reologisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi viskositeetti ja leikkausohenevuus, ja termisistä ominaisuuksista esimerkiksi sulamis- ja hajoamislämpötilat vaikuttavat prosessiparametreihin. Polymeerin prosessoitavuutta mitataan usein sulavirtaindeksillä eli MFR:llä (engl. melt flow rate), josta ennen käytettiin myös termiä MFI (engl. melt flow index). Kun sulavirtaindeksi on suuri, polymeeri virtaa hyvin eli sen viskositeetti on pieni. [46] Viskositeetin muuttuminen vaikuttaa ensisijaisesti prosessiparametreihin, mutta sen noustessa on mahdollista, ettei prosessointi onnistu kaikilla laitteilla [47]. Mekaanisista ominaisuuksista puolestaan esimerkiksi lujuus, jäykkyys ja sitkeys voivat muuttua kierrätyksen takia, mikä vaikuttaa muovin käyttökohteisiin.

Tärkein yksittäinen kierrätysmuovin laatuun vaikuttava tekijä on polymeerin molekyylimassa. Se usein pienenee polymeerin hajotessa, mikä laskee sekä sulaviskositeettia että lujuutta ja tekee muovista hauraamman. Molekyylimassan muutokset vaikuttavat siis sekä prosessoitavuuteen että mekaanisiin ominaisuuksiin. Näiden ominaisuuksien lisäksi myös kierrätysmuovin ulkonäöllä on vaikutusta sen jatkokäyttöön.

4.1 Kierrätyksen vaikutus materiaalien ominaisuuksiin

Erityisesti mekaaninen kierrätys vaikuttaa merkittävästi kierrätetyn materiaalin laatuun. Esimerkiksi tekstiili- sekä kartonkikuitujen kierrätyksessä kuitujen pituus lyhenee

jokaisella kierrätyskerralla [48]. Muoveillakin sama ilmiö näkyy polymeeriketjujen kemiallisena hajoamisena, joka johtuu mekaanisen kierrätyksen aiheuttamasta mekaanisesta ja termisestä rasituksesta sekä hapettumisesta [38, s. 46]. Muoveilla hajoaminen näkyy esimerkiksi ketjujen katkeamisena, haarautumisena ja ristisilloittumisena [38, ss. 97–98]. Pääsääntönä on, että ketjujen liikkeen vaikeutuessa viskositeetti nousee. Esimerkiksi ristisilloittuminen vaikeuttaa ketjujen liikettä, mutta sen myötä sulan sekaan jää myös liukenematonta materiaalia, sillä ristisilloittuneet osat eivät sula tai liukene. Kuitenkin eri muovilaadut reagoivat rasitukseen eri tavoilla, eli kaikki muovit eivät ristisilloitu mekaanisen kierrätyksen aikana. Muovilaadun lisäksi kierrätyskertojen määrä vaikuttaa siihen, miten muovin ominaisuudet muuttuvat kierrätyksen seurauksena, joten aihetta käsitellään tarkemmin luvussa 4.2.

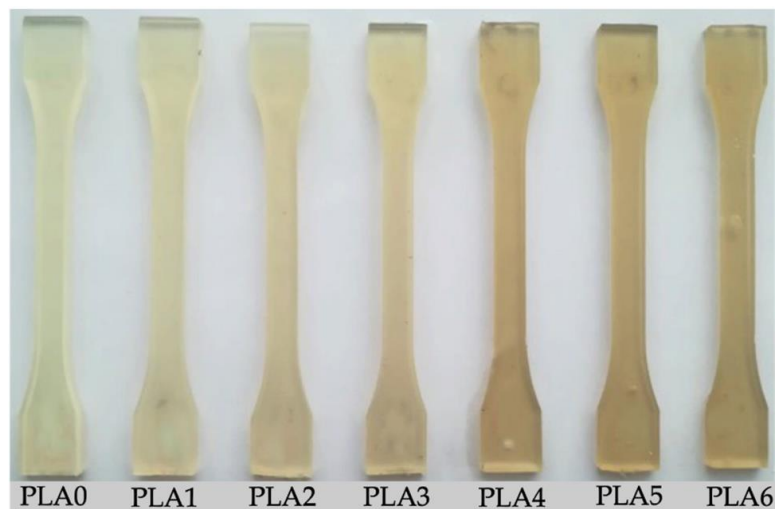
Lämmön ja mekaanisen rasituksen lisäksi mahdolliset epäpuhtaudet ja muut materiaalit heikentävät kierrätetyn muovin laatua. Lisäksi jätteen seassa olevat metallit voivat vahingoittaa kierrätyslaitteistoja. [38, ss. 49–51] Epäpuhtauksina muovijakeessa voidaan nähdä myös eri muovilajikkeet. Muovien sekoittuminen toisiinsa yleisesti huonontaa niiden ominaisuuksia, sillä muovit ovat harvoin kemiallisesti yhteensopivia [38, s. 41]. Pakkauksissa käytettävistä muoveista vain HDPE ja LDPE ovat yhteensopivia keskenään [38, s. 43]. Muovien sekoittuminen voi myös kiihdyttää polymeerien hajoamista. Esimerkiksi PVC:n joutuminen PET-muovijakeen sekaan on ongelma, sillä PVC:n hajoamistuote, vetykloridi, toimii katalyyttinä PET:n polymeeriketjujen katkeamiselle. Siksi pienikin PVC-määrä PET:n seassa vaikuttaa merkittävästi sen molekyyliinmassaan. [49] Samoin PET:n jäämät PVC:ssä aiheuttavat sulamattomia partikkeleita kierrätysmuovin sekaan [15]. Lisäksi kierrätysjakeen kosteus vaikuttaa polymeerien hajoamiseen. Erityisesti PET sekä PLA ovat hyvin herkkiä kosteudelle kierrätysprosessissa, sillä se aiheuttaa hydrolyysireaktion, joka johtaa ketjujen katkeamiseen. [49], [50]

Kierrätysmuovien laatuun vaikuttaa myös erilaiset lisä- ja väriaineet. Lisäaineita on muoveissa muutamista prosenteista jopa 60 %:iin. Osa niistä on kierrätyksen kannalta edullisia, kuten stabilisaattorit, pehmittimet sekä täyteaineet (engl. stabilizers, plasticisers, fillers). Joillain lisäaineilla, kuten UV-absorbaattoreilla ja palonestoaineilla (engl. UV absorbers, flame retardants), puolestaan ei ole kierrätysmuovin laadun kannalta kovin suurta merkitystä, eli ne eivät suoranaisesti häiritse prosessia mutta ne eivät myöskään ole sen eduksi. [51] Kuitenkin esimerkiksi bromia sisältäviä palonestoaineita ei nykyisessä lainsäädännössä enää sallita muovituotteissa, joten niiden mahdolliset jäämät tulisi poistaa kierrätysjakeen seasta [52]. Lisäksi tarpeettomat lisäaineet muovissa voivat nostaa muovin tiheyttä turhaan ja siten rajoittaa sen käyttöä

jatkossa. Kuitenkin jotkin lisäaineet, kuten haju- ja väriaineet, ovat suoraan haitallisia kierrätysmuovin laadun kannalta ja vaativat siksi korjaavia toimenpiteitä. [51]

Lisäaineita ei pystytä tällä hetkellä poistamaan teknisesti tai taloudellisesti toimivalla tavalla, ja näin ollen ne jäävät kierrätettyyn muovimateriaaliin. Jotkin näistä lisäaineista muodostavat vapaita radikaaleja ja tyydyttymättömiä ryhmiä, jotka yksinään tai yhdessä muiden epäpuhtauksien kanssa vaikuttavat merkittävästi muovin ominaisuuksiin. Tällöin erityisesti muovin lämpötilan sekä hapettumisen kestävyys heikkenee verrattuna neutraaliin muoviin. Viimeisten puhdistusvaiheiden tarkoituksena onkin poistaa mahdollisimman paljon tällaisia yhdisteitä ja lisäaineita, jolloin lopputuotteen laatu paranee. [51] Koska lisäaineet harvoin reagoivat muovin sulatuslämpötiloissa, niiden poistaminen voi tapahtua esimerkiksi suodattimien kautta [38, ss. 50–51], [51]. Jos lisäaineet tai muut epäpuhtaudet sulavat muovin prosessointilämpötiloissa, niiden poistaminen sulan seasta on mahdotonta [38, s. 51]

Kuten aiemmin todettiin, muovin seassa olevat väriaineet aiheuttavat ongelmia kierrätetyn materiaalin laatuun. Väripigmentit ovat muiden lisäaineiden tapaan partikkeleita, joiden poistaminen on haastavaa, eli väri jää kierrätysmuoviin. Eri väriaineiden sekoittuminen aiheuttaa luonnollisesti värien sekoittumista, jolloin lopputuotteen väri voi olla hyvin sekalainen sekä vaihdella eräkohtaisesti [38, s. 22]. Kuitenkin myös väriaineettomat eli kirkkaat muovit voivat myös kärsiä visuaalisesti mekaanisen kierrättämisen seurauksena. Esimerkiksi polystyreenin ja PLA:n on tutkittu kellastuvan tai tummuvan uudelleenprosessoinnin seurauksena [53], [54]. Kuvasta 5 nähdään PLA:lle tapahtuva kellastuminen kuuden kierrätysyösklin aikana.



Kuva 5. PLA:n kellastuminen mekaanisen kierrätyksen toistuessa [54].

Kemiallisessa kierrätyksessä lisäaineita ja muita epäpuhtauksia pystytään poistamaan jonkin verran, ja laadultaan heikentyneitäkin muovioita voidaan kierrättää hyvälaatuisiksi

monomeereiksi [22]. Kuitenkin myös kemiallisesti kierrätetyn materiaalin laadussa esiintyy ongelmia. Termolyttisissä menetelmissä korkea prosessilämpötila johtaa usein hyvään laatuun. Siksi melko matalissa lämpötiloissa tapahtuvien pyrolyysin ja katalyyttisen krakkauksen lopputuotteiden laatu jää melko matalaksi. Toisaalta kaasutuksessa prosessilämpötila on korkeampi, mutta lopputuotteiden laatu jää silti hieman vajavaiseksi. Siksi näiden prosessien lopputuotteita tulee vielä jälkikäsitellä, jotta tuotetusta raaka-aineesta voidaan valmistaa hyvälaatuisia muoveja. [18] Depolymeroinnilla kierrättämisestä saadaan yleisesti neutseellisen taseisia monomeereja, mutta mahdolliset epäpuhtaudet huonontavat lopputuotteen laatua [21].

4.2 Uudelleenkierrätettävyys

Uudelleenkierrätettävyys vaihtelee paljon materiaalin mukaan. Esimerkiksi selluloosakuidut voivat kiertää 4–6 kertaa ennen kuin kuidun pituus on laskenut liian paljon ja kuitu lajitellaan rejektinä poltettavaksi [48]. Metallit puolestaan kiertävät hyvin, sillä ne voidaan sulattaa ja käyttää uudelleen ilman merkittäviä ominaisuusmuutoksia. Muoveille ei ole yhtä selkeää lukua niiden uudelleenkierrätettävyydestä, sillä eri muovilaadut eroavat paljon toisistaan. Myös eri muovilaatujen kierrätettävyydestä tehdyt tutkimukset ovat erilaisia, mikä estää niiden suoran vertailun. Kuitenkin tutkimuksista saadaan tärkeää tietoa siitä, miten uudelleenprosessointi vaikuttaa muovien ominaisuuksiin. Nämä tiedot on koottu taulukkoon 2.

Laajimmat tutkimukset on tehty polyeteenille, sillä HDPE:n ja LDPE:n uudelleenkierrätettävyyttä on tutkittu jopa sadalla ekstruusiosykliillä [47], [55]. HDPE:n kohdalla havaittiin, etteivät mekaaniset ominaisuudet juurikaan muuttuneet ensimmäisen kymmenen kierrätysyöklin aikana. Vasta näiden syklien jälkeen polymeerin jäykkyys ja kovuus alkoivat heikkenemään. Vastaavasti prosessoitavuus vaikeutuu huomattavasti jo ensimmäisen 30 syklin aikana viskositeetin noustessa. 30 syklin jälkeen ekstruuderiin aiheutuva paine kääntyi laskuun, mikä johtunee hajoamismekanismien muuttumisesta. Tutkimus esittää, että ensimmäisen 30 kierrätysyöklin aikana ketjujen haaroittuminen olisi hallitseva hajoamiskeino, kun taas näiden syklien jälkeen se olisi ketjujen katkeaminen. 60 uudelleenprosessointisyöklin jälkeen polymeerisulan seassa oli noin 1 painoprosentti sulamatonta materiaalia, mikä johtuu polymeerin ristosilloittumisesta. Sadan syklin jälkeen sulamatonta materiaalia oli jopa noin neljännes, eli kierrätyskertojen kasvaessa ristosilloittumisen todennäköisyys kasvaa. Kuitenkin vielä sadankin kierrätyskerran jälkeen HDPE säilytti jopa 80 % sen alkuperäisistä mekaanisista ominaisuuksista, eivätkä sen termiset ominaisuudet muuttuneet juuri ollenkaan. [47]

LDPE:n kohdallakin termiset ominaisuudet pysyvät muuttumattomina sadan kierrätysyökin ajan, ja viskositeettikin nousi melkein yhtä nopeasti kuin HDPE:llä. [55] Kuitenkin muuten LDPE:n käyttäytyminen uudelleenprosessoinnin aikana eroaa HDPE:n käyttäytymisestä. Tutkimuksessa LDPE:n molekyyli­massa muuttui eri tavoilla jokaisen öykin jälkeen välillä laskien ja välillä nouten. Tutkimuksen mukaan tämä johtuu hajoamismekanismien vaihtelusta jokaisen kierrätyskerran aikana siten, että välillä ketjujen katkeilu on yleisempää kuin ristisilloittuminen ja välillä toisinpäin. Ristisilloittuminen on kuitenkin LDPE:ssä todennäköisempää kuin HDPE:ssä, sillä jo kymmenen kierrätysyökin jälkeen liukenemattoman materiaalin osuus oli yli 15 %. Sadan öykin jälkeen osuus oli jopa yli 35 %, mikä osoittaa ristisilloittumisen lisääntyvän kierrätyskertojen noustessa. [55] Ristisilloittumiseen liittyvä ero HDPE:n ja LDPE:n välillä johtuu niiden erilaisesta rakenteesta. LDPE on voimakkaasti haaroittunut polymeeri, joka on siksi alttiimpi ristisilloittumiselle [56]. Tutkimuksen yhteenvetona kuitenkin todetaan, että LDPE:tä voidaan kierrättää jopa 40 kertaa ilman prosessoitavuuden tai mekaanisten ominaisuuksien liiallista heikkenemistä. [55]

Kestomuovien ristisilloittuminen kierrätöksen yhteydessä ei kuitenkaan ole näin yleistä kaikilla muovilaaduilla, vaan sitä enemmän esiintyy muun muassa ketjujen katkeamista. Näin laajoja tutkimuksia eri muovien uudelleenkierrätettävyydestä ei ole tehty muille muovilaaduille, mutta esimerkiksi kymmenen, kahdeksan ja kuuden uudelleenprosessointisyökin tutkimuksia on. Sellaisia on tehty esimerkiksi polypropeenille, polystyreenille sekä polylaktidille. [53], [54], [57] Polypropeenia tutkittiin kymmenen kierrätösyökin verran. Havaittiin, että kierrätöskerrat laskivat viskositeettia ketjujen katkeamisen ollessa hallitseva hajoamisen menetelmä. Ketjujen katkeaminen johtaa korkeampaan kiteisyysasteeseen, joka nostaa kierrätetyn PP:n jäykkyyttä sekä myötöjännitystä. Samalla kuitenkin PP:n molekyyli­massa laskee ja siitä tulee hauraampaa. [57] Polypropeenia siis pystytään vielä prosessoimaan sekä käyttämään uudelleen näiden ominaisuusmuutosten jälkeen, mutta prosessiparametrit sekä lopputuotteen käyttökohde kuitenkin muuttunee erityisesti viskositeetin laskun sekä haurastumisen takia.

Myös polystyreenin kohdalla havaittiin samankaltaisia muutoksia polymeerin prosessoitavuudessa, sillä uudelleenkierrättäminen laski PS:n sulaviskositeettia. Syyksi todetaan PP:n tavoin ketjujen katkeaminen, joka johtuu termisestä hajoamisesta. Tämä hajoaminen aiheutti kahdeksan kierrätösyökin aikana noin 48 %:n laskun PS:n painokeskimääräiseen molekyyli­massaan. Kuitenkaan ketjujen katkeaminen ei polystyreenin tapauksessa vaikuttanut juurikaan sen kovuuteen. Ja toisin kuin polypropeenilla, kierrätöskertojen kasvaessa polystyreenin jäykkyys laski. [53] Tavallisen

polystyreenin lisäksi vaahdotettu polystyreeni (EPS, engl. expanded polystyrene) on mahdollista kierrättää hyvälaatuisiksi polystyreeniksi tai EPS:ksi, mutta se tehdään usein liuottamiseen perustuvilla tekniikoilla. Mekaaninen kierrätys ei siis ole EPS:n ensisijainen kierrätysmenetelmä. [56]

PLA:llakin toistuvat kierrätyskerrat aiheuttavat polymeeriketjujen katkeamista sekä viskositeetin laskua. Ketjujen katkeaminen johtuu esteriryhmien hydrolyysistä, joka tapahtuu sulatusvaiheessa lämpötilan nousun vuoksi. Kuitenkin viskositeetti laskee vain hieman ensimmäisten neljän syklin aikana, minkä jälkeen lasku on radikaalimpaa. Kuten polypropeenin, myös PLA:n kiteisyys nousee ketjujen katkeamisen myötä. Tämä johtaa materiaalin haurastumiseen. Polymeerin kovuus ei kuitenkaan juuri muutu, mutta iskulujuus laskee merkittävästi, jopa 48 %, kuuden prosessointisyklin aikana. Jälleen siis uudelleenkierrätys todennäköisesti muuttaa kierrätysmuovin käyttökohdetta, mutta tutkimuksen mukaan PLA:n mekaaninen kierrättäminen on mahdollista jopa kolme kertaa ilman merkittäviä ominaisuuksien muutoksia [54].

PET puolestaan voi reagoida mekaaniseen kierrätykseen hyvin erilaisilla tavoilla, mutta merkittävämmäksi hajoamistavaksi on esitetty termistä hapettumista, joka johtuu vapaiden radikaalien syntyisestä sulakäsittelyn aikana. Yleisesti se johtaa molekyylin makroskooppiseen muuttumiseen, eli ketjujen katkeamiseen, haaroittumiseen tai ristosilloittumiseen. Ketjujen katkeaminen on yleensä hallitseva menetelmä, joka laskee molekyyliä ja viskositeettia. [58] Sen vaikutuksesta myös PET:n iskulujuus laskee jopa kolmasosan viiden kierrätysyksen aikana. Samalla sen jäykkyys nousee, mutta polymeeri haurastuu. [56] Ketjujen katkeaminen voi aiheuttaa myös aldehydien muodostumista, mikä voi johtaa elintarvikepakkausissa maku- ja hajumuutoksiin maustamattomissa elintarvikkeissa, kuten kivennäisvesissä. Toisaalta kierrätysyksen määrän noustessa ketjut saattavat linkittyä toisiinsa aiheuttaen päinvastaiset vaikutukset prosessoitavuuteen ja johtaa lopulta ristosilloittumiseen. [58]

Myös PVC:tä voidaan kierrättää mekaanisesti. PVC on hyvin herkkä valolle ja lämmölle, ja altistuminen näille aiheuttaa sen hajoamista ketjujen katkeamisen kautta. Hajoaminen näkyy esimerkiksi muovin kellastumisena tai jopa mustumisena. [59] Kierrätetyn PVC:n viskositeetti nousee, ja uudelleenprosessoinnin aikaisen geelityksen vuoksi sen tiheys sekä kovuus nousevat. [60] Noin kahdeksannen kierrätysyksen jälkeen PVC:n jäykkyys alkaa laskemaan. Puolestaan vetolujuus hieman nousee kierrätysyksen määrän kasvaessa seitsemään sykliin asti. [61] Pitkälle edennyt hajoaminen sekä hapettomat olosuhteet myös altistavat PVC:n ristosilloittumiselle. [56], [59].

Taulukko 2. Muovien reagoiminen uudelleenkierrätykseen, koottu lähteistä [47], [49], [53]–[57], [59], [61]

Muovi	Yleisin hajoamistapa	Prosessoitavuuden muutos	Mekaanisten ominaisuuksien muutos
HDPE	Ketjujen haaroittuminen, syklimäärän kasvaessa voi ristosilloittua	Sulaviskositeetti nousee	Jäykkyys ja kovuus laskee
LDPE	Vaihtelee, syklimäärän kasvaessa voi ristosilloittua	Sulaviskositeetti nousee	-
PP	Ketjujen katkeaminen	Sulaviskositeetti laskee	Jäykkyys nousee, haurastuu
PS	Ketjujen katkeaminen	Sulaviskositeetti laskee	Jäykkyys laskee, kovuus ei juuri muutu
PLA	Ketjujen katkeaminen	Sulaviskositeetti laskee	Haurastuu, iskulujuus laskee, kovuus ei juuri muutu
PET	Ketjujen katkeaminen, syklimäärän kasvaessa voi ristosilloittua	Sulaviskositeetti laskee	Jäykkyys nousee, iskulujuus laskee, haurastuu
PVC	Ketjujen katkeaminen, syklimäärän kasvaessa voi ristosilloittua	Sulaviskositeetti nousee	Jäykkyys laskee, vetolujuus ja kovuus nousee

Tutkimuksia siitä, mitä toistuva kemiallinen kierrätys tekee polymeerille, ei ole tehty. Kemiallisessa kierrätyksessä lopputuotteena saadaan muovien raaka-ainetta eikä suoraan polymeerigranulaatteja, joten vastaavanlainen tutkimus ei ole yhtä suoraviivainen toteuttaa. Koska kuitenkin huonolaatuisestakin muovista saadaan tuotettua hyvänlaatuisia oligo- ja monomeerejä, on todennäköistä, että muovien kemiallinen kierrätys ei aiheuta samanlaisia määrällisiä rajoituksia muovien uudelleenkierrätykselle kuin mekaaninen kierrätys. Siksi kemiallinen kierrätys mekaanisen rinnalla esimerkiksi kuvan 4 mallin mukaan voisi olla kiertotalouden mukainen vaihtoehto. Myös Lamberti et al. [20] esittävät, että PLA:n kiertotalouden mukaisin kierrätystapa olisi kierrättää se ensin mekaanisesti niin monesti kuin mahdollista, minkä jälkeen se tulisi kierrättää kemiallisesti. Tällöin materiaali ikään kuin nollaantuu, ja mekaanista kierrätystä voidaan jälleen jatkaa. Samanlainen malli voisi olla ratkaisu myös muiden muovien kiertotalouden mukaiseen kierrättämiseen. Tällä hetkellä laadultaan heikentyneitä muoveja ei kuitenkaan pystytä erottelemaan hyvälaatuisista muoveista, mutta tulevaisuudessa teknologian kehittyessä muovien laadun seuraamiseen saatetaan löytää uusia ratkaisuja, jotka mahdollistavat tämän.

Kuitenkin käsitellyt tutkimustulokset antavat paremman kuvan muovien uudelleenkierrätettävyydestä kuin mitä se todellisuudessa on. Tämä johtuu siitä, että tutkimuksissa kierrätyksen simulointi toteutetaan perättäisillä ekstruusio- tai ruiskuvalusykkeillä. Näin ollen tutkimuksissa ei pystytä huomioimaan esimerkiksi käytön aikana tapahtuvaa hajoamista tai kierrätysjakeen sekaan joutuvia epäpuhtauksia. Lisäksi on huomioitava, että tutkimukset on suoritettu tietyillä prosessiparametreilla, joten niiden numeerisista tuloksista ei pystytä vetämään suoria johtopäätöksiä muovien kierrätettävyyden teollisessa ympäristössä.

Yksi suuri ero laboratorion ja todellisuuden välillä on myös lisäaineiden käyttö. Teollisessa valmistuksessa polymeerien sekaan lisätään aina erilaisia lisä- ja täyteaineita, jotka saattavat erota laboratoriokokeissa käytetyistä lisäaineista, tai niitä ei välttämättä ole käytetty ollenkaan. Kuten aiemmin todettiin, lisäaineita ei voida poistaa, ja sen vuoksi ne vaikuttavat osaltaan myös kierrätetyn muovin laatuun sekä kerääntyvät muoviin. Toisaalta lisäaineita voidaan käyttää myös kierrätetyn muovin laadun parantamiseen.

4.3 Vaadittujen tuoteominaisuuksien saavuttaminen

Kierrätetyn materiaalin laatua voidaan parannella, jotta halutut ominaisuudet saavutettaisiin. Tällä hetkellä kierrätettyyn muoviin, kuten PET:iin, sekoitetaan neutseellistä muovia parantamaan sen ominaisuuksia [58]. Tämä on teknisesti toimiva keino, mutta kiertotaloudessa neutseellisen materiaalin käyttöä pyritään vähentämään. Siksi kierrätetyn muovin laatua olisi hyvä pystyä parantamaan ilman neutseellisen muovin lisäystä. Yksi aiemminkin mainittu keino on lisätä uusia täyte- ja lisäaineita. Niiden käytön tavoitteena on ehkäistä hajoamista kierrätysprosessissa, parantaa menetettyjä ominaisuuksia tai mahdollistaa eri muovien yhteensopivuus [62].

Stabilisaattorit ovat hajoamista ehkäiseviä lisäaineita, joita käytetään vähentämään sekä käytön että kierrätyksen aikana tapahtuvaa hajoamista. Esimerkiksi PVC:n valo- ja lämpöherkkyyden takia niitä tarvitaan ehkäisemään jo käytön aikaista hajoamista, ja kierrätyksen yhteydessä niitä täytyy lisätä [56]. Lisäksi esimerkiksi polypropeenissa stabilisaattorit parantavat sen lämmönkestoa ja ehkäisevät haurastumista uudelleenprosessoinnin yhteydessä. Samalla PP:n viskositeetin laskua pystytään rajoittamaan, eli sen prosessoitavuus paranee. [62] Myös antioksidantit ehkäisevät erityisesti hapen ja lämmön aiheuttamaa hajoamista, joka näkyy muovituotteiden kellastumisena mutta myös esimerkiksi viskositeetin nousuna tai mekaanisten ominaisuuksien heikkenemisenä. Esimerkiksi polystyreenillä antioksidantteja käytetään mahdollistamaan uudelleenprosessointi ja ehkäisemään sen aikana tapahtuvaa kellastumista. [63] LDPE:n kohdalla ne ehkäisevät sulaviskositeetin muuttumista parantaen siten prosessoitavuutta sekä mekaanista käyttäytymistä [64]. Antioksidanttien lisäksi UV-absorbaattoreita ja -inhibiittoreita käytetään ehkäisemään valon aiheuttamaa hajoamista, mikä on usein tarpeen esimerkiksi HDPE:lle ja PP:lle [38, s. 101], [56].

Kompatibilisaattoreilla puolestaan voidaan lisätä epäyhteensopivien muovien yhteensopivuutta, sillä ne lisäävät polymeerien dispersiota seoksissa [38, s. 105]. Tällöin voidaan myös parantaa yhteensopimattomien muovien seoksen mekaanista käyttäytymistä. Kompatibilisaattorit kuitenkin toimivat parhaiten, kun ne on optimoitu

tietyille materiaaleille tietyillä pitoisuuksilla. Ne eivät siis välttämättä vaikuta kierrätysmuovissa, johon ne ovat jääneet edellisestä käyttökohteesta. [38, s. 106] Lisäksi kompatibilisaattoreilla voidaan parantaa lisäaineiden yhteensopivuutta. Kuitenkaan yleensä eri lähteistä peräisin olevat lisäaineet eivät häiritse toistensa toimintaa, eli niiden yhteensovittaminen on harvoin tarpeen. [51]

Myös ketjunpidentäjiä käytetään tietyillä polymeereillä parantamaan niiden ominaisuuksia, sillä ne nimensä mukaisesti pidentävät polymeeriketjuja ja siten nostavat molekyyliä massaa. Esimerkiksi PET:llä ketjunpidentäjät voivat yhdistää lineaarisesti kaksi ketjua toisiinsa, mutta yhdistyminen saattaa johtaa myös ristisilloittuneeseen rakenteeseen. Tätä kuitenkin pyritään välttämään. [49] Ketjunpidentäjillä voidaan nostaa myös biohajoavien polymeerien, kuten PLA:n, molekyyliä massaa [65]. Samalla ne parantavat myös PLA:n mikrokovuutta. Vakavasti hajonneelle PLA:lle ketjunpidentäjät eivät kuitenkaan enää tehoa ja liian suuret osuudet lisäaineita saattavat jopa huonontaa PLA:n ominaisuuksia. [66]

Epäpuhtauksien aiheuttamiin laatuongelmiin puolestaan tärkeimpiä ratkaisuja ovat tehokas lajittelu, pesu ja kuivaus. Mikäli epäpuhtaudet silti alentavat lopputuotteen ominaisuuksia, lisäaineilla tilannetta voidaan korjata. Kuitenkin, kuten aiemmin mainittiin, lisäaineiden kerääntyminen voi nostaa muovin tiheyttä ja muuttua siten ongelmaksi kiertotaloudessa, jossa muoveja kierrätetään useita kertoja. Tähän ratkaisuna voisi olla kemiallinen kierrätys, joka tehtäisiin, kun lisäaineita on muovin käytön kannalta haitallisen paljon.

Yksi ratkaisu muovin laadun heikkenemisen estämiseksi on suljettujen kiertojen laajentaminen muovipullojen lisäksi muihinkin muovipakkauksiin, jolloin myös muita muoveja voitaisiin käyttää uudelleen elintarvikepakkauksissa. Haasteiksi kuitenkin muodostuu esimerkiksi se, minkälaisia tuotteita voitaisiin kerätä vastaavanlaisesti ja kuka keräyksen järjestäisi. Suljetun kierron kaltaiseen lopputulokseen voitaisiin päästä myös fluoresoivien merkkiaineiden käytöllä, sillä silloin pakkaukset voitaisiin lajitella myös niiden käyttökohteen mukaan [42]. Tällöin on mahdollista, että kierrätysmuoviasetuksen mukaiset vaatimukset kierrätysmuovin käytöstä elintarvikepakkauksissa täyttyisivät. Sovellus on kuitenkin niin uusi, että tarkempia tutkimuksia ei ole tehty. Toisaalta tehdyissä tutkimuksissa on saavutettu jopa 100 %:n puhtausaste, minkä vuoksi fluoresoivat etiketit voisivat olla ratkaisu myös eri muovilaatujen sekoittumisen estämiselle [42]. Merkkiaineet voisivat myös mahdollistaa muovien kierrätyskertojen seuraamisen, ja siten kierrätysmuovin ominaisuuksia pystyttäisiin vakioimaan paremmin ja heikompileatuinen muovi osattaisiin ohjata kemialliseen kierrätykseen.

Värikkäiden muovien kierrätyksestä johtuva kierrätysmuovin sekalainen väri puolestaan voitaisiin peittää esimerkiksi mustalla väriaineella, joka peittää alleen muut värisävyt. Kuitenkin mustan muovin tunnistamisen vaikeuden takia kierrätysmuovin värjääminen mustaksi ei ole pitkällä tähtäimellä kannattavaa, sillä uudelleenkierrättäminen vaarantuu. Vaikka muovien väriaineita ei pystytä poistamaan, muoveissa käytettäviä liotinpohjaisia painovärejä pystytään poistamaan. Poistamiseen voidaan käyttää pinta-aktiivisia pesuaineita, jotka tietyissä olosuhteissa poistavat muut kuin hiilimustan painovärit. [67] Näin ollen myös hiilimustan painovärien käyttö voi olla este kirkkaan kierrätysmuovin tuotannolle.

Muovien kierrättämisen kannalta olisikin hyvä suunnitella tuotteet mahdollisuuksien mukaan täysin värittömiksi, jolloin mahdolliset logot sekä muut mainontaan ja brändiin liittyvät värjäykset tehtäisiin helposti irrotettaviin osiin [33, s. 122], kuten kuvan 6 pakkauksessa on tehty. Pakkaus itse on valmistettu polystyreenistä, jonka päällä on metallinen kansi sekä muovinen PET-kansi uudelleensuljettavuuden saavuttamiseksi. Pakkauksen ympärillä on kartongista valmistettu kuori, jossa näkyy tuotteen nimi sekä sen valmistanut yritys. Pakkaus on avaamattomana esteettinen ja värikäs, mutta se on valmistettu kirkkaista muoveista ja muutenkin kierrätettävistä materiaaleista. Lisäksi eri materiaalit irtoavat toisistaan helposti, ja ne on merkitty materiaalikoodilla.



Kuva 6. Jogurttipurkki a. Avaamattomana b. Materiaalit eriteltynä ja pestynä.

Muita kehityskohteita ovat esimerkiksi kirkkaat virvoitusjuomapullot, joiden korkit ovat usein silti värillisiä. Pullojen korkkien olisi hyvä olla myös värittömiä [27], sillä ne usein kierrätettäessä ovat kiinni kirkkaassa pullossa ja saattavat näin päätyä vaikuttamaan kierrätysjakeen väriin. Tulevaisuudessa todennäköisesti kuvan 6 kaltaisesti suunnitellut pakkaukset tulevat yleisemmiksi, jotta EU:n tavoite pakkauksien kierrätettävyydestä voidaan saavuttaa.

5. KIERRÄTETYN MATERIAALIN KESTÄVYYS

Kiertotalous sekä siihen siirtyminen tulee tehdä kestävästi, jotta se olisi järkevää. Kestävyys on monimutkainen käsite, ja sitä tulee usein tarkastella tapauskohtaisesti. Esimerkiksi elintarvikepakkauksien ensisijainen tehtävä on suojata sisällä olevaa tuotetta muun muassa pilaantumiselta, eli ei ole kestävää tehdä pakkauksesta mahdollisimman vähän saastuttava, mikäli se johtaa tuotteen ennenaikaiseen pilaantumiseen ja siten ruokahävikin määrän kasvuun. Kestävyys tulee siis huomioida koko elinkaaren ajalta, ja siksi pakkausten kierrättämiseen panostaminen on perusteltua, vaikka kierrättäminen yleisesti onkin yksi viimeisimmistä vaihtoehdoista materiaalin arvon säilymisen kannalta [68]. Kuitenkin myös pakkauksien uudelleenkäyttöä tulisi harkita silloin kun se on mahdollista. Esimerkiksi SINI on tuonut markkinoille pesutabletin, jonka voi liuottaa kestopullossa veteen ja näin saada pullollisen nestemäistä pesuainetta, jolloin tarvittava muovimäärä vähenee [69]. Uudelleenkäytön toteuttaminen kuitenkin esimerkiksi elintarvikkeille on huomattavasti vaikeampaa.

Kestävyys ei tarkoita pelkästään ympäristön suojelua, vaan tasapainon löytämistä ihmisten, talouden ja luonnon välille. Siksi se voidaan jakaa kolmeen ulottuvuuteen: Ekologiseen, sosiaaliseen ja taloudelliseen. [70, s. 6] Ulottuvuudet riippuvat toisistaan, ja joidenkin käsitysten mukaan ne ovat keskenään samanarvoisia. Tämä nähdään kuitenkin heikkona kestävyysnä, ja siksi tietyissä lähteissä ekologinen kestävyys kuvataan kaiken perustaksi, jolloin puhutaan vahvasta kestävydestä. [71] Näkemys perustuu siihen, että ekologinen ulottuvuus asettaa ikään kuin rajat, joiden ylittyä ulottuvuudet eivät voi olla enää tasapainossa. Kumpaa tahansa kuvausta käyttäessä kestävyys ydin pysyy samana – Mikään ulottuvuus ei saa parantaa omaa asemaansa toisen ulottuvuuden kustannuksella [70, s. 6]. Tähän asti luonnonvaroja on käytetty melko huolimattomasti, mikä näkyy esimerkiksi ylikulutuspäivän sijoittumisesta heinä-lokuun vaihteeseen [72]. Kestävässä kiertotaloudessa luonnonvaroja käytetään järkevästi, jolloin on mahdollista säästää niin luontoa kuin kustannuksiakin.

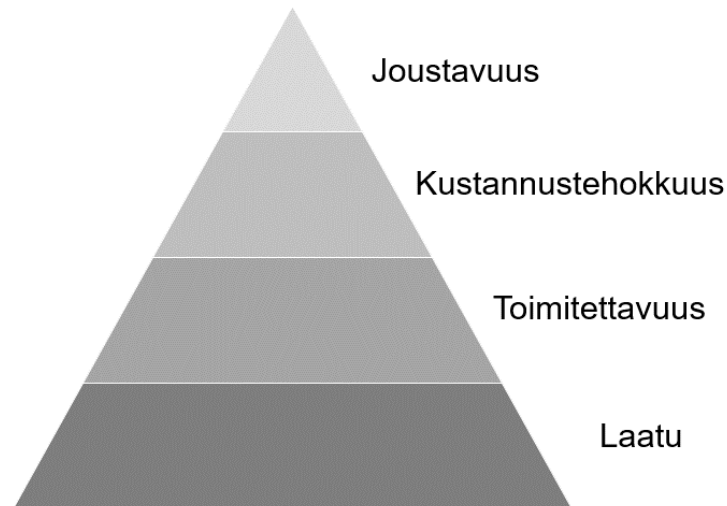
Ekologinen kestävyys tarkoittaa yksinkertaisimmillaan ympäristön kantokyvyn rajoissa elämistä [73]. Ekologista kestävyttä voidaan mitata eri ympäristövaikutusten avulla. Muovien käyttöön ja kierrättämiseen liittyviä ympäristövaikutuksia ovat esimerkiksi neitseellisen materiaalin, veden ja energian käyttö sekä tuotteen elinkaaren aikana syntyvät päästöt ja luontoon päätyvä jäte. Yleisesti ottaen kierrättäminen säästää luonnonvaroja ja vähentää jätettä sekä päästöjä verrattuna muovijätteen polttamiseen tai loppusijoittamiseen kaatopaikoille [19], [74]. Hyödyt ovat niin suuret, että jätteiden

kuljettaminen Fortumin tehtaalle toiselta puolelta Suomea on ympäristön kannalta kannattavaa [75]. Kuitenkin kierrätyskapasiteettia nostettaessa olisi hyvä miettiä myös tehtaiden sijoittelua, jotta turhat kuljetukset ja niistä syntyvät päästöt vähentyisivät.

Sosiaalinen kestävyys puolestaan kattaa ihmisten hyvinvoinnin sekä sen jatkuvuuden tuleville sukupolville [73]. Kiertotalouden tulisi siis antaa kaikille tasa-arvoiset mahdollisuudet ja esimerkiksi työolojen tulee olla inhimilliset. EU:n [1] mukaan muovien kiertotalouteen panostaminen luo jopa 200 000 uutta työpaikkaa 500:n uuden kierrätysaseman kautta. Työpaikkojen lisääntyminen on sosiaalisesti kestävä, mutta on hyvä muistaa, että kiertotalouteen siirryttäessä myös tietyt työt loppuvat, eli kokonaisuus ei välttämättä ole suoraan nettoposiitiivinen. [34]

Biomuovit sekä niiden kierrättäminen on hyvä esimerkki kestävyysajattelun aiheuttamista ristiriidoista. Ekologisuuden kannalta biopohjaiset sekä biohajoavat muovit ovat oiva ratkaisu muovien hiilijalanjäljen pienentämiseen, ja niiden kierrättäminen pienentää sitä vielä entisestään. Kuitenkin biomuovien käytön lisääntyessä niiden raaka-aineiden viljely voi viedä tilaa ruoantuotannolta, mikä on uhka sosiaaliselle kestävyydelle. Samalla tällainen viljely aiheuttaa esimerkiksi vesistöjen rehevöitymistä ja merkittävää vedenkulutuksen nousua. Jos biomuovia valmistetaan vain ruoantuotannon sivuvirroista, nämä kestävyysongelmat poistuvat, mutta tällöin biomuovien saatavuus saattaa jäädä pieneksi [76]. Kuitenkin biomuoveja kierrättämällä sivuvirroista valmistetut muovit saadaan pysymään kierrossa pidempään, jolloin saatavuuskin paranee.

Viimeinen kolmesta ulottuvuudesta on taloudellinen kestävyys, joka nimensä mukaisesti huomioi taloudellisen kannattavuuden. Kiertotalouden tulisi olla taloudellisesti kannattavaa niin tuotteiden, yritysten kuin yhteiskunnan tasolla. [73] Jotta muovin kierrättäminen ja kierrätysmuovin käyttäminen olisi taloudellisesti kestävä, kierrätysmuovin tulee olla kilpailukykyistä verrattuna neitseelliseen muoviin. Kuvassa 7 on esitetty kilpailukykyyn pyramidikaavio, jossa esitetään kilpailukykyyn vaadittavat osa-alueet. Kierrätysmuovin tapauksessa pyramidin kolme alinta osa-aluetta ovat tärkeimmät. Pyramidin huippu, joustavuus, kuvaa tuotannon kykyä sopeutua erilaisiin muutoksiin, ja tällä voidaan luoda kilpailukykyä silloin, kun pyramidin alemmat tasot ovat kunnossa [77].



Kuva 7. Kilpailukyvyyn pyramidikaavio, muokattu lähteestä [77, s. 54]

Kuvasta 7 nähdään, että kilpailukyvyyn perustana on hyvä laatu. Kuten aiemmin on todettu, muovin laatu huononee mekaanisen kierrätyksen takia, mutta heikentyntä laatua pystytään korjaamaan jonkin verran. Kierrätysmuovia voidaan laadun kannalta siis käyttää tuotteissa varsinkin silloin, kun kyseessä ei ole erityisen vaativat olosuhteet tai elintarvikepakkaus. Kuitenkin laatuun liittyvä epävarmuus on EU:n [1] mukaan alhaisen kysynnän syynä, ja ratkaisuksi esitetään kierrätysmuovin standardoimista. Standardoinnin jälkeen kierrätysmuovin käyttö mahdollisesti lisääntyy, kun kierrätysmuovin ominaisuudet ovat paremmin tiedossa.

Laatuun vaikuttaa merkittävästi myös jätteen esikäsittelyt. Vähäinen esikäsittelyiden tarve johtaa kestävään kierrätykseen, sillä mitä vähemmän niitä tarvitaan, sitä vähemmän kuluu esimerkiksi energiaa ja vettä. Suuri esikäsittelyjen määrä on riski myös taloudelliselle kannattavuudelle, sillä se lisää kustannuksia. Esikäsittelyjä tarvitaan sekä mekaanisessa että kemiallisessa kierrätyksessä. Erityisesti kemolyysiin perustuvat menetelmät vaativat paljon esikäsittelyjä, mutta toisaalta niissä hyvä laatu saavutetaan melko matalilla lämpötiloilla, jolloin energiaa säästyy. Termolyytisissä menetelmissä puolestaan hyvä laatu vaatii korkean lämpötilan, mikä johtaa myös korkeisiin energiakustannuksiin. [21]

Kilpailukyvyyn kannalta kierrätysmuovin hyvän laadun lisäksi sen pitäisi olla hyvin toimitettavissa (kuva 7), eli käytännössä kierrätysmuovia tulisi olla hyvin sekä luotettavasti saatavilla. Sekä mekaanisessa että kemiallisessa kierrätyksessä itse prosessin saanto on yleisesti hyvä, mutta rejektiksi päätyvä muovi laskee kierrätysastetta. Toimitettavuuden suurin riski on siis kierrätykseen kelpaamattomien muovien suuri määrä. Nämä muovit ovat myös ekologisen kestävyuden kannalta

ongelmallisia, sillä muovien kierrättäminen säästää luonnonvaroja. Rejektien kemiallinen kierrätys voisi olla mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan.

Toisaalta kuvan 7 mukaisesti tuotannon tulee olla myös kustannustehokasta eli kierrätysmuovin hinnan tulisi pystyä kilpailemaan neitseellisen muovin kanssa. Tällä hetkellä mekaanisesti kierrätetyn muovin hinta on noin 20–25 % neitseellistä muovia halvempaa [78], eli kierrätysmateriaalin käyttö tuotteissa tulee tuotteen valmistajalle halvemmaksi. Muovien kierrättämisen kustannukset kuitenkin riippuvat muun muassa esikäsittelyiden määrästä, jolloin kierrätysmuovin tuotannon kustannukset eivät välttämättä aina ole neitseellistä muovia pienemmät. Toinen mahdollinen uhka kustannustehokkuudelle on kierrätysmuovin uudelleenprosessoinnin vaikeutuminen viskositeetin nousun myötä. Jos viskositeettia ei saada laskettua esimerkiksi lisäaineilla, voi uudelleen prosessoinnin toistuesssa energian käyttö sekä kustannukset nousta sen myötä. [47]

Lisäksi kemiallisella kierrätyksellä edullisiin hintoihin on vaikeampi päästä. Erityisesti kemolyyysiin perustuvien menetelmien kautta saatu kierrätysmuovi on kallista, ja prosessit vaativat suuret vuosittaiset syötteet ollakseen kannattavia. Syötteen tulee olla korkea myös pyrolyysissä ja kaasutuksessa. [21] Esimerkiksi kaasutus vaatii 100 kilotonnin vuosittaisen syötteen ollakseen taloudellisesti kannattavaa [18]. Tämä aiheuttaa haasteen myös kemiallisen ja mekaanisen kierrätyksen integroimiseen, sillä Suomessa näin suuret rejektimäärät ovat todella vaikeita saavuttaa vuosittain markkinoille saatettujen muovipakkausten määrän ollessa noin 129 kilotonnin luokkaa [9]. Muovinkulutus on kuitenkin tähän asti noussut vuosittain [6], mutta 3R-periaatteen mukaan kiertotaloudessa kulutuksen tulisi vähentyä, eli tulevaisuudessa muovien jätemäärät voisivat kääntyä laskuun. Jos mekaanisen kierrätyksen rejektin lisäksi myös muita eri lähteistä peräisin olevia polymeerituotteita kierrätetään kemiallisesti, tarvittavat syötteet taloudellisuuden takaamiseksi on mahdollista saavuttaa [22].

Tällä hetkellä rejekti poltetaan energiaksi, jota kierrätyslaitos käyttää toimintaansa. Energia ei siis mene hukkaan, mutta energiantuoton hyötysuhde on pieni ja polttamisessa syntyy hiilidioksidipäästöjä [74]. Lisäksi esimerkiksi PVC:n polttamisessa syntyy vetykloridia, mikä on vaarallista ympäristölle [56]. Polttaminen energiaksi on siis ekologisesti ongelmallista, mutta kierrätyslaitos vaatii energiaa toimiakseen. Onkin huomioitavaa, että kestävässä kiertotaloudessa tuotantoon käytetty energia tulisi olla uusiutuvaa, mikä taas tarkoittaa merkittäviä investointeja uusiutuvaan energiatuotantoon.

Kuvasta 7 huomataan kilpailukyyn osa-alueiden olevan hyvin samankaltaisia kuin työssä esitellyt kiertotalouden mukaisen kierrättämisen vaatimukset. Tästä voidaan päätellä, että muovien kiertotalouden suurimpana haasteena on nimenomaan taloudellinen kestävyys. Tämä korostuu erityisesti kemiallisen kierrätyksen kohdalla, sillä vaikka teknologiat kehittyvät ja antavat ympäristön kannalta lupaavia tuloksia, on niiden avulla vaikea tehdä kannattavaa liiketoimintaa ilman suuria syötteitä. Suuri energiankulutus aiheuttaa kuitenkin myös haasteen ekologiselle kestävyydelle, mutta loppujen lopuksi myös kemiallinen kierrätys on ekologisempi vaihtoehto kuin muovijätteen polttaminen [74]. Kuitenkin mekaaninen kierrätys nähdään tällä hetkellä kestävimpanä kierrätystapana, ja siksi sen kannattaa tulevaisuudessakin pysyä ensisijaisena kierrätysmenetelmänä [19], [74]. Kemiallinen kierrätys tulisi kuitenkin nähdä vaihtoehtona silloin, kun muovijätettä ei voida kierrättää mekaanisesti. Kestävyyden kannalta kemiallisen kierrätyksen menetelmät vaativat kuitenkin vielä kehittämistä.

6. YHTEENVETO

Kiertotaloudessa materiaalien tehokas kierrättäminen on tärkeää, sillä ilman sitä neitseellisen materiaalin käyttöä on vaikea merkittävästi vähentää. Jotta kierrättäminen olisi kestävä kiertotalouden mukaista, kierrätettyä materiaalia tulisi pystyä hyödyntämään neitseellisen materiaalin tavoin. Työssä kiertotalouden vaatimukset jaotellaan kierrätetyn materiaalin riittävyteen, laatuun ja kestävyys. Käytännössä kierrätysmateriaalia tulee siis olla tarpeeksi saatavilla, ja sen laadun tulee olla riittävän hyvää, jotta kierrätysmateriaalin käyttökohteita voitaisiin lisätä. Lisäksi kierrätysmateriaalien tuotannon ja käytön tulee olla erityisesti ekologisesti ja taloudellisesti kestävä, jotta neitseellisten materiaalin korvaaminen sillä olisi järkevää. Vaikka työssä käsitelläänkin yksityiskohtaisesti vain kuluttajamuovipakkauksia, nämä ehdot tulee täyttyä myös muiden kierrätettävien materiaalien kohdalla. Tulevaisuudessa siis myös muiden tuotteiden, kuten tekstiilien, tarkastelu näistä näkökulmista on kannattavaa. Lisäksi lainsäädännön vaikutusta olisi hyvä tutkia tarkemmin jatkossa, sillä sen avulla voidaan esimerkiksi kannustaa kierrätyksen huomioivaan pakkaussuunnitteluun.

Työn toisena tavoitteena oli selvittää, millaisia haasteita esiteltyjen vaatimusten täyttämiseen liittyy ja kuinka niitä voidaan ratkaista. Kuluttajamuovipakkauksien kohdalla erityisesti kierrätysmuovin heikompi laatu on niiden uudelleenkäytön kannalta merkittävä ongelma. Tällä hetkellä muovipakkaukset kierrätetään mekaanisesti, mikä aiheuttaa polymeerien hajoamista ja ominaisuuksien heikkenemistä. Termisen ja mekaanisen rasituksen lisäksi epäpuhtaudet ovat merkittävä laatua alentava tekijä. Tehokkaimmat keinot ehkäistä lian ja vieraiden materiaalien aiheuttamat ongelmat ovat tehokas lajittelu sekä pesu. Tulevaisuudessa erityisesti lajittelua voitaisiin tehostaa fluoresoivilla merkkiaineilla, jolloin avoimella kierrolla voidaan päästä suljetun kierron kaltaisiin tuloksiin ja kierrätysmuovia voidaan mahdollisesti käyttää nykyistä laajemmin myös elintarvikepakkauksissa.

Vaikka muovijakeet olisivat puhtaita, toistuva mekaaninen kierrätys aiheuttaa väistämättä polymeerien hajoamista. Sen vaikutuksia voidaan kuitenkin muokata ilman neitseellisen materiaalin lisäystä esimerkiksi erilaisilla lisäaineilla. Toisaalta lisäaineiden suuri käyttö voi nostaa muovin tiheyttä vaikuttaen näin sen käyttökohteisiin. Pelkällä mekaanisella kierrätyksellä ei siis voida kierrättää samoja polymeerejä kovinkaan montaa kertaa. Siksi kemiallinen kierrätys tulisi integroida mekaanisen kierrätyksen yhteyteen, jolloin huonolaatuinen muovi voidaan kierrättää kemiallisesti hyvälaatuisiksi

muovin raaka-aineeksi. Tämä vaatii kuitenkin muovien laadun seuraamiseen liittyviä innovaatioita, jotta huonolaatuinen muovi voitaisiin erotella hyvälaatuisesta. Kemiallinen kierrätys on kuitenkin erityisesti ratkaisu kierrätysmateriaalin riittävyyteen liittyviin ongelmiin. Kierrätysrejektin kemiallinen kierrätys mahdollistaa esimerkiksi monikerrosmuovien kierrättämisen, mikä vähentää polttoon päätyvän muovijätteen määrää. Tällöin kierrätettyä muovia saadaan tuotettua enemmän, mikä auttaa nostamaan kierrätysastetta ja saavuttamaan EU:n kiertotaloustavoitteet.

Kemiallisesta kierrätyksestä ei kuitenkaan kannata tehdä ensisijaista kierrätystapaa, sillä mekaaninen kierrätys on tällä hetkellä kestävin tapa kierrättää. Kuitenkin muovien kierrättämisen voidaan ajatella olevan ekologisesti kestävä, mutta erityisesti termolyyttisten menetelmien korkea energiankulutus voi olla uhka ekologisuudelle. Siksi kiertotaloudessa on tärkeää käyttää uusiutuvaa energiaa tuotantoon sekä kierrätysprosesseihin. Suuri energiankulutus kemiallisessa kierrätyksessä on myös taloudellisen kestävyuden uhka, ja sen välttämiseksi menetelmät vaativat korkean syötteen. Tämä on mahdollista saavuttaa kuluttajamuovipakkausten lisäksi eri lähteistä peräisin olevien muovituotteiden kemiallisella kierrätyksellä. Toisaalta korkean syötteen saavuttaminen vaatii myös keräysasteen nostamista, joka voidaan saavuttaa kuluttajia kannustamalla esimerkiksi kierrätyksestä palkitsevien sovellusten kautta. Palkitsemisen lisäksi keräyspisteiden lisäämisellä ja kuluttajien informoinnilla voidaan helpottaa kierrättämisen aloittamista.

Merkittävin keino vaikuttaa niin keräys- ja kierrätysasteeseen kuin kierrätysmuovin laatuun ja kestävyteen on suunnittelu. Kierrätyksen huomioivalla suunnittelulla voidaan helpottaa kierrättämistä niin kuluttajien kuin kierrätyslaitostenkin näkökulmasta. Hyvin kierrätettävän muovin käyttö mahdollistaa tavoitellun kierrätysasteen ja ilman väriaineiden käyttöä kierrätysmuovin väri pysyy muuttumattomana vaihtelevan sijaan. Lisäksi biomuovien käytöllä voidaan pienentää muovipakkausten ekologista jalanjälkeä. Jos erityisesti biohajoavien muovien käyttö kasvaa merkittävästi, tulevaisuudessa myös niiden kierrättäminen on mahdollista. Biomuovien lisäksi myös kierrätysmuovia tulisi käyttää pakkauksissa, sillä kiertotaloudessa kierrätysmateriaalia tulisi käyttää nykyistä enemmän.

LÄHTEET

- [1] European Commission, "A European Strategy for Plastics in a Circular Economy". 16. tammikuuta 2018. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>
- [2] J. Kirchherr, D. Reike, ja M. Hekkert, "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 127, ss. 221–232, joulu 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [3] Y. Umeda, A. Nonomura, ja T. Tomiyama, "Study on life-cycle design for the post mass production paradigm", *AI EDAM*, vsk. 14, nro 2, ss. 149–161, huhti 2000, doi: 10.1017/S0890060400142040.
- [4] V. Ranta, L. Aarikka-Stenroos, P. Ritala, ja S. J. Mäkinen, "Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 135, ss. 70–82, elo 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.017.
- [5] "Statistics | Eurostat". https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/SDG_12_41__custom_1315713/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=e4657bd0-03a1-480b-abe3-d122fa0ac4f2 (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [6] T. ja ajankohtaisblogit: T. K. Pirtonen Heidi, "Kiertotalous edistyy Suomessa hitaasti – merkittävimmät askeleet kohti asetettuja tavoitteita ovat vielä ottamatta | Tieto&trendit". <https://www2.stat.fi:443/tietotrendit/artikkelit/2022/kiertotalous-edistyy-suomessa-hitaasti-merkittavimmat-askeleet-kohti-asetettuja-tavoitteita-ovat-viela-ottamatta/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [7] "How much plastic packaging waste do we recycle?" <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20191105-2> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [8] "Polku 2025", *Suomen Uusiomuovi Oy*. <https://uusiomuovi.fi/suomen-uusiomuovi/polku-2025/> (viitattu 11. helmikuuta 2023).
- [9] M. Surakka, "Suomen Uusiomuovi Oy Webinaari", 29. marraskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://uusiomuovi.fi/webinaari-29-11-2022/>
- [10] "Muovien materiaalimerkit", *Suomen Uusiomuovi Oy*. <https://uusiomuovi.fi/pakkaus-kiertaa/muovien-kierratys/muovien-materiaalimerkit/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [11] European Bioplastics, "Bioplastics market data", 2022. <https://www.european-bioplastics.org/market/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [12] "Biomuoviopas.pdf". Viitattu: 6. helmikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.muovipoli.fi/wp-content/uploads/2020/11/Biomuoviopas.pdf>
- [13] N. Shingler, "Ruokapakkausten hyvät ja huonot puolet — entä miten suhtautua biomuoviin?", *Kemikaalicocktail.fi*, 9. joulukuuta 2021. <https://kemikaalicocktail.fi/2021/12/ruokapakkausten-hyvät-ja-huonot-puolet-entamiten-suhtautua-biomuoviin/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).

- [14] A. C. Mendes ja G. A. Pedersen, "Perspectives on sustainable food packaging:– is bio-based plastics a solution?", *Trends Food Sci. Technol.*, vsk. 112, ss. 839–846, kesä 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.03.049.
- [15] H. Eskelinen, T. Haavisto, H. Salmenperä, ja H. Dahlbo, "Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet".
- [16] "Muovin-mekaaninen-kierrätys.pptx.pdf". Viitattu: 14. helmikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://jatehuoltoyhdistys.fi/wp-content/uploads/2019/10/Muovin-mekaaninen-kierr%C3%A4tys.pptx.pdf>
- [17] "Kierrätysmuoviasetus (EU) 1616/2022", *Ruokavirasto*. https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/elintarvikeala/pakkaukset-ja-kontaktimateriaalit/kontaktimateriaaleja-koskevalainsaadanto/kierratysmuoviasetus_EY_1616_2022/ (viitattu 22. maaliskuuta 2023).
- [18] M. Solis ja S. Silveira, "Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment", *Waste Manag.*, vsk. 105, ss. 128–138, maaliskuu 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.01.038.
- [19] F. Zhang *ym.*, "Current technologies for plastic waste treatment: A review", *J. Clean. Prod.*, vsk. 282, s. 124523, helmikuu 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124523.
- [20] F. M. Lamberti, L. A. Román-Ramírez, ja J. Wood, "Recycling of Bioplastics: Routes and Benefits", *J. Polym. Environ.*, vsk. 28, nro 10, ss. 2551–2571, loka 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01795-8.
- [21] Zinaida Manžuch, Rūta Akelytė, Marco Camboni, ja David Carlander, "Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy", The European Chemicals Agency, Final Report, elokuu 2021. Viitattu: 30. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://echa.europa.eu/documents/10162/1459379/chem_recycling_final_report_en.pdf/887c4182-8327-e197-0bc4-17a5d608de6e
- [22] M. S. Qureshi *ym.*, "Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vsk. 152, s. 104804, marraskuu 2020, doi: 10.1016/j.jaap.2020.104804.
- [23] A. K. Panda, R. K. Singh, ja D. K. Mishra, "Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vsk. 14, nro 1, ss. 233–248, tammikuu 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.005.
- [24] "Yritysten kansainvälinen rahoitus – Arctic Smartness.fi". <https://arcticsmartness.fi/yritysten-kansainvalinen-rahoitus/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [25] "Teknologia | WasteWise Group Oy". <https://www.wastewise.fi/teknologia/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [26] L. & Tikanoja, "Kiertotalouden termit tutuksi – miten kierrätysaste eroaa hyötykäyttöasteesta?" <https://lassikko.lt.fi/kiertotalouden-termit-tutuksi> (viitattu 7. maaliskuuta 2023).

- [27] Suomen Uusiomuovi Oy, "Muovipakkausten kierrätysaste kasvoi viime vuonna maltillisesti", 5. heinäkuuta 2022.
<https://uusiomuovi.fi/2022/07/05/muovipakkausten-kierratysaste-kasvoi-viime-vuonna-maltillisesti/> (viitattu 6. helmikuuta 2023).
- [28] "Pantillinen järjestelmä". <https://www.palpa.fi/juomapakkausten-kierratys/pantillinen-jarjestelma/#palautusasteet> (viitattu 23. maaliskuuta 2023).
- [29] "PVC-muovipakkaukset saa lajitella muovipakkausten keräykseen kesästä alkaen", *Suomen Uusiomuovi Oy*, 1. kesäkuuta 2022.
<https://uusiomuovi.fi/2022/06/01/pvc-muovipakkaukset-saa-lajitella-muovipakkausten-keraykseen/> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [30] L. & Tikanoja, "Muovin kierrätys - Kysymyksiä ja vastauksia".
<https://tietopankki.lt.fi/muovimuovi-kysymyksiä-ja-vastauksia> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [31] M. Kuusisto, "Muovin kierrätys on järkevää – Mihin muoviroskan voi viedä?"
<https://www.molok.com/fi/blogi/muovin-kierrattaminen-on-jarkevaa-mihin-muoviroskan-voi-vieda> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [32] "Rinki-ekopisteet | Suomen Pakkauskierrätys RINKI Oy", *Rinkiin*.
<https://rinkiin.fi/kotitalouksille/rinki-ekopisteet/> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [33] H. Lewis, *Design + Environment: a Global Guide to Designing Greener Goods*, First edition. London: Taylor and Francis, 2017.
- [34] E. Jalava, R. Leppänen, N. Korhonen, E. Tolonen, ja L. Byckling, "Kiertotalouden vaikutukset työhön ja osaamiseen", Sitra, maaliskuu 2021. [Verkossa]. Saatavissa:
<https://www.sitra.fi/app/uploads/2021/03/sitra-kiertotalouden-vaikutukset-tyohon-ja-osaamiseen-v3.pdf>
- [35] "Panta med mobilen | Sverige", *Bower*. <https://www.getbower.com/fi> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [36] "Suurin osa kodeissa lajitellusta muovijätteestä päätyi poltettavaksi – MOT selvitti, kuinka hyvin muovin kierrätys onnistuu", *Yle Uutiset*, 5. huhtikuuta 2021.
<https://yle.fi/a/3-11865230> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [37] "Fortum suunnittelee uuden sukupolven mekaanista muovinkierrätyslaitosta ja tutkii uusia, edistyneitä teknologioita", *fortum.fi*.
<https://www.fortum.fi/media/2021/11/fortum-suunnittelee-uuden-sukupolven-mekaanista-muovinkierratyslaitosta-ja-tutkii-uusia-edistyneita-teknologioita> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [38] V. Goodship, *Introduction to Plastics Recycling*. Shrewsbury, United States: iSmithers Rapra Publishing, 2007. Viitattu: 1. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa:
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=476899>
- [39] W. Sikorska, M. Musioł, B. Zawidlak-Węgrzyńska, ja J. Rydz, "End-of-Life Options for (Bio)degradable Polymers in the Circular Economy", *Adv. Polym. Technol.*, vsk. 2021, ss. 1–18, huhti 2021, doi: 10.1155/2021/6695140.
- [40] C. T. de M. Soares, M. Ek, E. Östmark, M. Gällstedt, ja S. Karlsson, "Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios",

- Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 176, s. 105905, tammi 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105905.
- [41] H. Punkkinen, N. Teerioja, E. Merta, K. Moliis, U.-M. Mroueh, ja M. Ollikainen, "Pyrolyysin potentiaali jätemuovin käsittelymenetelmänä".
- [42] Kosior, Edward *ym.*, "Plastic packaging recycling using intelligent separation technologies for materials (PRISM)", Annual Technical Conference - ANTEC, ss. 500–506. Viitattu: 22. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://andor.tuni.fi/discovery/fulldisplay/cdi_scopus_primary_619903112/358FIN_TAMPO:VU1
- [43] A. Turner, "Black plastics: Linear and circular economies, hazardous additives and marine pollution", *Environ. Int.*, vsk. 117, ss. 308–318, elo 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.04.036.
- [44] E. Maris, A. Aoussat, E. Naffrechoux, ja D. Froelich, "Polymer tracer detection systems with UV fluorescence spectrometry to improve product recyclability", *Miner. Eng.*, vsk. 29, ss. 77–88, maaliskuu 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.016.
- [45] "Suomessa kehitettiin ratkaisu, joka mahdollistaa myös mustan muovin kierrättämisen – kotimaassa se ei kiinnosta", *Yle Uutiset*, 31. maaliskuuta 2019. <https://yle.fi/a/3-10707570> (viitattu 14. helmikuuta 2023).
- [46] "mfr | TEPA-termipankki (erikoisalojen sanasto- ja sanakirja-kokoelma)". <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/mfr> (viitattu 30. maaliskuuta 2023).
- [47] P. Oblak, J. Gonzalez-Gutierrez, B. Zupančič, A. Aulova, ja I. Emri, "Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene", *Polym. Degrad. Stab.*, vsk. 114, ss. 133–145, huhti 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.012.
- [48] L. Reh, "Process engineering in circular economy", *Particuology*, vsk. 11, nro 2, ss. 119–133, huhti 2013, doi: 10.1016/j.partic.2012.11.001.
- [49] F. Awaja ja D. Pavel, "Recycling of PET", *Eur. Polym. J.*, vsk. 41, nro 7, ss. 1453–1477, heinäkuu 2005, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.
- [50] V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, ja M. D. Rosa, "Biodegradable polymers for food packaging: a review", *Trends Food Sci. Technol.*, vsk. 19, nro 12, ss. 634–643, joulukuu 2008, doi: 10.1016/j.tifs.2008.07.003.
- [51] Alejandro Villanueva ja Peter Eder, "End-of-waste criteria for waste plastic for conversion". European commission, 2014.
- [52] I. Kangashaka, "Ways To Decrease The Effect of Thermal Degradation Of WEEE Plastics During Mechanical Recycling", Tampere University, 2022.
- [53] C. Remili, M. Kaci, A. Benhamida, S. Bruzard, ja Y. Grohens, "The effects of re-processing cycles on the structure and properties of polystyrene/Cloisite15A nanocomposites", *Polym. Degrad. Stab.*, vsk. 96, nro 8, ss. 1489–1496, elokuu 2011, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.005.
- [54] A. Agüero *ym.*, "Study of the Influence of the Reprocessing Cycles on the Final Properties of Polylactide Pieces Obtained by Injection Molding", *Polymers*, vsk. 11, nro 12, Art. nro 12, joulukuu 2019, doi: 10.3390/polym11121908.

- [55] H. Jin, J. Gonzalez-Gutierrez, P. Oblak, B. Zupančič, ja I. Emri, "The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene", *Polym. Degrad. Stab.*, vsk. 97, nro 11, ss. 2262–2272, marras 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039.
- [56] Z. O. G. Schyns ja M. P. Shaver, "Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review", *Macromol. Rapid Commun.*, vsk. 42, nro 3, s. 2000415, 2021, doi: 10.1002/marc.202000415.
- [57] J. Aurrekoetxea, M. A. Sarrionandia, I. Urrutibeascoa, ja M. Ll. MasPOCH, "Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene", *J. Mater. Sci.*, vsk. 36, nro 11, ss. 2607–2613, kesä 2001, doi: 10.1023/A:1017983907260.
- [58] L. K. Nait-Ali, X. Colin, ja A. Bergeret, "Kinetic analysis and modelling of PET macromolecular changes during its mechanical recycling by extrusion", *Polym. Degrad. Stab.*, vsk. 96, nro 2, ss. 236–246, helmi 2011, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.11.004.
- [59] M. Sadat-Shojai ja G.-R. Bakhshandeh, "Recycling of PVC wastes", *Polym. Degrad. Stab.*, vsk. 96, nro 4, ss. 404–415, huhti 2011, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.001.
- [60] N. Sombatsompop ja S. Thongsang, "Rheology, morphology, and mechanical and thermal properties of recycled PVC pipes", *J. Appl. Polym. Sci.*, vsk. 82, nro 10, ss. 2478–2486, 2001, doi: 10.1002/app.2098.
- [61] D. Braun, "Recycling of PVC", *Prog. Polym. Sci.*, vsk. 27, nro 10, ss. 2171–2195, joulu 2002, doi: 10.1016/S0079-6700(02)00036-9.
- [62] F. P. La Mantia, "The role of additives in the recycling of polymers", *Macromol. Symp.*, vsk. 135, nro 1, ss. 157–165, 1998, doi: 10.1002/masy.19981350118.
- [63] R. Thomas, M. Dexter, ja R. E. King III, "Antioxidants, Polymers", teoksessa *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002. doi: 10.1002/0471238961.0114200904052420.a01.pub2.
- [64] M. J. Abad *ym.*, "Effects of a mixture of stabilizers on the structure and mechanical properties of polyethylene during reprocessing", *J. Appl. Polym. Sci.*, vsk. 92, nro 6, ss. 3910–3916, 2004, doi: 10.1002/app.20420.
- [65] V. Frenz, D. Scherzer, M. Villalobos, A. A. Awojulu, ja M. Edison, "Multifunctional Polymers as Chain Extenders and Compatibilizers for Polycondensates and Biopolymers."
- [66] F. R. Beltrán, C. Infante, M. U. de la Orden, ja J. Martínez Urreaga, "Mechanical recycling of poly(lactic acid): Evaluation of a chain extender and a peroxide as additives for upgrading the recycled plastic.", *J. Clean. Prod.*, vsk. 219, ss. 46–56, touko 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.206.
- [67] H. Gecol, J. F. Scamehorn, S. D. Christian, ja F. E. Riddell, "Use of surfactants to remove solvent-based inks from plastic films", *Colloid Polym. Sci.*, vsk. 281, nro 12, ss. 1172–1177, marras 2003, doi: 10.1007/s00396-003-0891-4.

- [68] Ellen MacArthur Foundation, "Circulate products and materials". <https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials> (viitattu 31. maaliskuuta 2023).
- [69] "Tehokasta puhdistusainetta tabletista | SINI verkkokauppa", *Sinituote.fi*. <https://sinituote.fi/tuotteet/sini-siivousvalineet/puhdistusaineet/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [70] Portney, K. E., "The Concepts of Sustainability", teoksessa *Sustainability*, 8. p. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 2015.
- [71] "Vaihtoehtoja kasvutaloudelle– seminaarin satoa", *Suomen luonnonsuojeluliitto*, 5. huhtikuuta 2018. <https://www.sll.fi/2018/04/05/vaihtoehtoja-kasvutaloudelle-seminaarin-satoa/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [72] "Ylikulutus", *WWF Suomi*, 7. toukokuuta 2019. <https://wwf.fi/uhat/ylikulutus/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [73] Ympäristöministeriö, "Mitä on kestävä kehitys?", *Ympäristöministeriö*. <https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys> (viitattu 30. maaliskuuta 2023).
- [74] R. Meys, F. Frick, S. Westhues, A. Sternberg, J. Klankermayer, ja A. Bardow, "Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 162, s. 105010, marras 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105010.
- [75] K. Lundelin, "Katso muovin matka – Näin muovijätteestä syntyy uusiomuovia", *Seura.fi*, 25. helmikuuta 2020. <https://seura.fi/asiat/ajankohtaista/miten-muovi-muuttuu-uusiomuoviksi-fortumin-muovinjaloistamalla/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [76] Simon Hann, Rosy Scholes, Tessa Lee, Sarah Ettliger, ja Henning Jørgensen, "Bio-based and Biodegradable Plastics in Denmark - Market, Applications, Waste Management and Implications in the Open Environment", Ministry of Environment and Food of Denmark, 2125, 2020. Viitattu: 4. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2020/02/978-87-7038-165-9.pdf>
- [77] M. Bellgran ja E. K. Säfsten, *Production Development: Design and Operation of Product ion Systems*. London, UNITED KINGDOM: Springer London, Limited, 2009.
- [78] "Käytetty muovi uusioraaka-aineeksi", *Sitra*, 18. toukokuuta 2017. <https://www.sitra.fi/caset/kaytetty-muovi-uusioraaka-aineeksi/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).