



## **KOTITALOUSMUOVIN KIERRÄTYSPROSESSIT JA NIIDEN ONGELMAT**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintutkielma

2022

Ville Pärssinen

Tarkastajat: TkT Tiina Rissanen

FT Mirka Viitala

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Kemiantekniikka

Ville Pärssinen

### **Kotitalousmuovin kierrätysprosessit ja niiden ongelmat**

Kemiantekniikan kandidaatintyö

33 sivua, 3 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastajat: TkT Tiina Rissanen ja FT Mirka Viitala

Avainsanat: muovijäte, kotitalousmuovi, kierrätys, esikäsittely

Muovin tuotanto ja muovijätteen määrä ovat nopeassa kasvussa, mutta muovin kierrätys ei ole valitettavasti kasvanut samaan tahtiin luoden haasteita muovijätteen käsittelylle. Varsinkin kertakäyttöisten muovipakkausten kierrätykseen on näin ollen löydettävä kustannustehokkaita ratkaisuja, jotta muovi saataisiin kiertoon useamman kerran ennen sen hyödyntämistä matalamman arvon energiantuotannossa.

Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia ongelmia ja haasteita kotitalousmuovin eri kierrätysprosesseihin ja niiden eri vaiheisiin sisältyy. Työssä käydään läpi kotitalouksien jätemuovin kierrätyksen esikäsittelyvaiheet sekä esitellään muovin mekaaninen ja kemiallinen kierrätys.

Työn kirjallisuuskatsauksen tulosten perusteella korostui, että etenkin kotitalousmuovin kierrätysprosessin alkupäätä on kehitettävä kierrätysprosentin ja kiertotalouden kasvattamiseksi. Heterogeenisestä muovijakeesta on saatava muodostettua puhtaita ja homogeenisiä muovivirtoja, jotka saataisiin tehokkaasti kierrätettyä joko mekaanisesti tai kemiallisesti. Tällä hetkellä suurimmat prosessitekniset haasteet liittyvät kotitalousmuovin heterogeenisyyteen ja heikkolaatuisuuteen, jotka vaikuttavat uusiomuovin laatuun ja käyttökohteisiin.

Toinen työssä havaittu merkittävä haaste liittyy kemiallisen kierrätyksen kehittämiseen. Koska nykyisin vallalla olevalla mekaanisella kierrätyksellä ei voida valmistaa uusiomuovia elintarviketeollisuuden tuoteturvallisuuden vuoksi mekaanisen kierrätyksen rinnalle tarvittaisiin myös kemiallisia kierrätysmenetelmiä. Kemiallisella kierrätyksellä kotitalousmuovit voitaisiin hajottaa pienemmiksi rakenneosiksi, jotka toimisivat potentiaalisena raaka-aineena esimerkiksi elintarvikepakkauksia valmistettaessa. Myös kemiallisen kierrätyksen käyttöönotto vaatii muovien tehokkaampaa esikäsittelyä, mikä mahdollistaisi myös tuotetun kierrätysmuovin elintarviketurvallisuuden.

## Sisällysluettelo

### Tiivistelmä

1	Johdanto.....	4
2	Pakkausmuovien tyypit ja niiden kierrätys.....	7
2.1	Polyetyleenitereftalaatti (PET).....	9
2.2	Polyeteeni (PE).....	9
2.3	Polyvinylikloridi (PVC).....	10
2.4	Polypropeeni (PP).....	11
2.5	Polystyreeni (PS).....	12
3	Kotitalousmuovin kierrätysprosessin vaiheet.....	12
3.1	Muovipakkausten käsittely kuluttajan toimesta.....	13
3.2	Kotitalousmuovien keräys.....	14
3.3	Muovien tunnistus ja lajittelu.....	14
3.4	Muovien pesu ja silppuaminen.....	16
3.5	Eri muovilaatujen erotusprosessit.....	18
4	Mekaaninen kierrätys.....	20
5	Kemiallinen kierrätys.....	22
6	Muovien energiasisällön hyödyntäminen polttamalla.....	24
7	Kotitalousjätteen kierrätyksen ongelmia.....	26
8	Johtopäätökset.....	27
	Lähteet.....	29

# 1 Johdanto

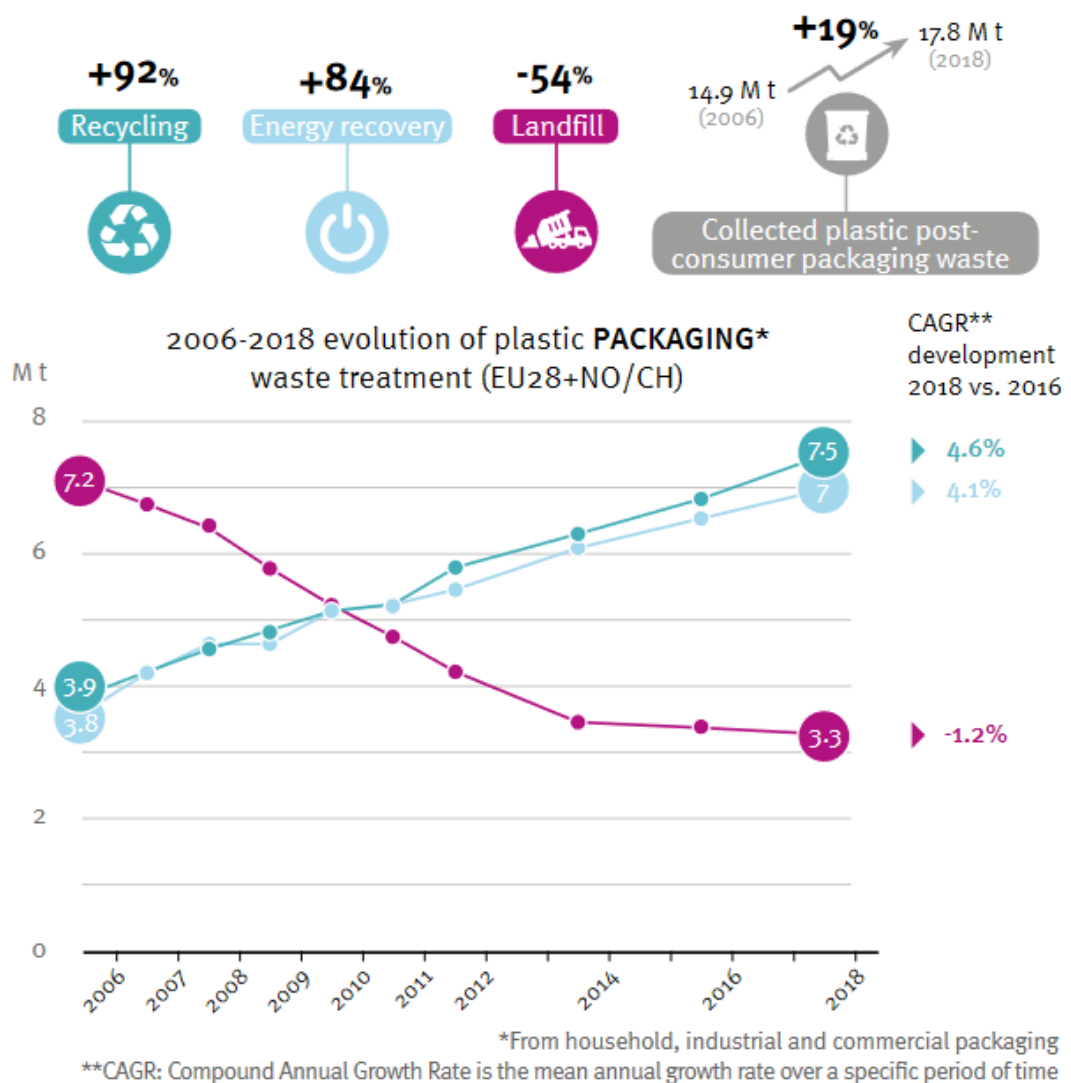
Muovin käyttö on lisääntynyt viime vuosikymmenten aikana kasvattaen samalla muovijätteen määrää. Muovin tuotanto tulee lisääntymään entisestään väestön ja vaurauden kasvussa (Ferreira ym. 2016, 2), mikä lisää myös käytetyn muovin määrää luoden muovin käsittelylle haasteita. Muovijätteen lisääntyminen tulee kierrätyksen kannalta tarjoamaan yrityksille uusia mahdollisuuksia ja luomaan uusia kiertotaloutta edistäviä innovaatioita (Di Maio & Rem 2015, 1095; Hahladakis ym. 2018, 179). Muovijätteen hallintaan ja ympäristöongelmien välttämiseen tarvitaankin tulevaisuudessa uusia toimintatapoja ja innovaatioita.

Vuonna 2018 Euroopassa kerättiin 17,8 miljoonaa tonnia pakkausmuovia, josta 42 % kierrätettiin ja 39,5 % hyödynnettiin energiantuotannossa. Kaatopaikoille sijoitettiin edelleen 18,5 % pakkausmuovista. (PlasticsEurope 2019, 33.) Muualla maailmassa (etenkään kehittyvissä maissa) kierrätysaste ei ole yhtä korkealla tasolla Euroopan kanssa, mikä näkyy kaatopaikkojen ja vesistöjen kuormituksena. Euroopan kierrätyksessäkin on parantamisen varaa sen ollessa huomioitava ongelma kiertotaloudessa. Tämä kandidaatintyö käsittelee kotitalousmuovien kierrätysprosesseja ja niiden haasteita sekä pyrkii esittämään ratkaisuja esille nouseviin ongelmiin.

Kotitalouksien kierrätysmuovin hyödyntämiseen on kolme eri mahdollisuutta: mekaaninen kierrätys, kemiallinen kierrätys sekä energiantuotanto. Tällä hetkellä muovin kierrätys pohjautuu pääosin mekaaniseen kierrätykseen (Roschier ym. 2020, 17). Mekaanisilla menetelmillä tuotetuilla uusiomuoveilla on kuitenkin rajoituksensa ja niillä tuotettua muovia ei esimerkiksi voida käyttää kosketuksissa elintarvikkeisiin (Niiranen 2021). Kemiallista kierrätystä on alettu tutkimaan enenevässä määrin viime aikoina ja sen oletetaan luovan uusia mahdollisuuksia kotitalousmuovien kierrätykseen tulevaisuudessa. Kemiallisen kierrätyksen suurimpia vahvuuksia ovat sen tarjoamat mahdollisuudet heikkolaatuisempien muovien kierrätykselle (Roschier ym. 2020, 17), mikä voisi mahdollistaa neitseellisen muovin kaltaisen tuotteen valmistamisen elintarviketeollisuuteen.

Jos muovijätettä ei kyetä kierrättämään tai hyödyntämään energiantuotannossa, on viimeisenä keinona sen sijoittaminen kaatopaikalle, jota tulisi kaikin keinoin kuitenkin välttää (Ragaert ym. 2017, 25). PlasticsEuropen (2019, 28) mukaan Euroopassa 3,3 Mt (18,5 %)

pakkausmuoveista koostuvaa kotitalousjätettä päätyi edelleen kaatopaikoille vuonna 2018. Kaatopaikoille päätyneen muovijätteen määrä on kuitenkin vähentynyt edellisen vuosikymmenen aikana (kuva 1), mikä kertoo Euroopan muovinkäsittelyn olevan oikeassa kehityssuhteessa, kun tarkoituksena on välttää muovipakkausten sijoittamista kaatopaikoille. Samaan aikaan muovipakkausten kierrätyksen ja energiantuotannon osuudet ovat kasvaneet (kuva 1). Muualla maailmassa puolet tuotetusta muovista (150 Mt) päätyy kaatopaikoille (Ragaert ym. 2017, 28). Kaatopaikalle päätyvän osuuden pienentämiseksi muovien kierrätystä on kehitettävä tulevaisuudessa.



Kuva 1 Euroopan muovipakkausten käsittelyn kehitys vuosina 2006–2018. Kierrätys- ja energiantuotantoluvut ovat kasvaneet kaatopaikkasijoituksen vähentyessä. (PlasticsEurope 2019, 32)

Suomessa Fortum vastaa kotitalouksien muovipakkausten kierrätyksestä ja vuonna 2019 kotitalousmuovista päätyi uusiokäyttöön 37 %, pääosin mekaanisen kierrätyksen kautta. Loput kierrätykseen lajitellusta kotitalousmuovista päätyi energiantuotantoon. Fortumin mukaan uusiokäytön kapasiteettia on mahdollista kasvattaa jopa 60–65 prosenttiin pelkästään mekaanisilla kierrätysmenetelmillä. (Miettinen 2021.) Kemiallisen kierrätyksen avulla muovijätteen kierrätysprosenttia voidaan kasvattaa entisestään ja siten vähentää polttoon päätyvän muovin määrää tulevaisuudessa.

Tässä työssä käydään läpi erilaiset pakkausteollisuudessa käytettävät muovilaadut, joista kotitalouksien muovijäte pääosin koostuu. Lisäksi esitellään erilaiset muovin kierrätysprosessin vaiheet sekä kotitalousmuovin eri kierrätys- ja hyödyntämistavat. Kierrätystapoja ovat mekaaninen- ja kemiallinen kierrätys, joiden lisäksi käsitellään muovien energiahyötykäyttöä. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, minkälaisia ongelmia ja haasteita kotitalousmuovin eri kierrätysprosesseihin ja niiden eri vaiheisiin sisältyy.



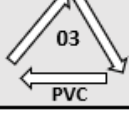
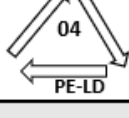

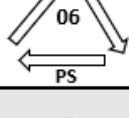
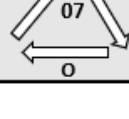
## 2 Pakkausmuovien tyypit ja niiden kierrätys

Kotitalouksien muovijäte koostuu pääosin erilaisista tuote- ja elintarvikepakkauksista. Muovin tuotannossa viisi suurimman volyymin muovia ovat polyeteeni (PE), polypropeeni (PP), polyvinyylikloridi (PVC), polystyreeni (PS) sekä polyetyleenitereftalaatti (PET) (Hubo & Ragaert 2014, 1; Selke & Culter 2016, 11). Yhteensä nämä polymeerit kattavat 75 % Euroopan muovinkysynnästä, pakkausteollisuuden ollessa suurin käyttöalue 39,4 % osuudella (Ferreira ym. 2016, 1; Hubo & Ragaert 2014, 1). PE, PP ja PET ovat käytetyimmät muovit pakkausteollisuudessa (Ferreira ym. 2016, 2; Velásquez ym. 2021, 323).

Kaikki yleisimmin käytetyt polymeerit ovat biohajoamattomia kestumuoveja (eng. *thermoplastic*), joiden käyttö tuottaa paljon luonnossa hajoamatonta jätettä. Niitä voidaan kuitenkin kierrättää rakenteensa ansiosta useita kertoja, koska ne eivät hajoa kovassa lämpötilassa. Kestomuovit kestävät toistuvaa uudelleen käsittelyä toisin kuin kertamuovit (eng. *thermoset plastics*), jotka voidaan muotoilla vain kerran. (Selke & Culter 2016, 12.)

Muoviteollisuutta hallitsevat PE, PP, PS ja PET (Velásquez ym. 2021, 312). Näistä PE voidaan jakaa vielä korkeatiheysiseen polyeteeniin (HDPE) ja matalatiheysiseen polyeteeniin (LDPE). Myös PVC-muovia käytetään pakkauksissa (Selke & Culter 2016, 120). Näille kuudelle muovityypille löytyy omat kansainväliset kierrätysnumeronsa 1–6, joita esiintyy muovipakkauksissa. Kierrätysnumerot ja niiden merkitykset on esitetty taulukossa 1 (Suomen Uusiomuovi Oy 2022a), jossa kuvaillaan lyhyesti eri polymeerien ominaisuuksia, käyttökohteita ja kierrätettävyyttä.

Taulukko 1 Muovipakkausten materiaalimerkinnät, pakkauksissa käytettävien muovien ominaisuudet sekä yleisimmät käyttökohteet (Suomen Uusiomuovi Oy 2022a).

ESIMERKKEJÄ KÄYTTÖKOHTEISTA JA LAJITTELUSTA			
MATERIAALIMERKINTÄ	NIMI	YLEISET OMINAISUudet	ESIMERKKEJÄ KÄYTTÖKOHTEISTA JA LAJITTELUSTA
	Polyeteeni-tereftalaatti	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä	Virvoitusjuoma- ym. pullot. Pantilliset pullot kauppojen automaatteihin. Muut muovipakkauskeräykseen.
	Korkeatiheksinen polyeteeni	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta	Mehupullot, virvoitusjuomakorit. Muovipakkauskeräykseen.
	Polyvinyylikloridi	Erittäin monimuotoinen ja -piirteinen	Harvoin pakkausmateriaalia. EI muovipakkauskeräykseen.
	Matalatiheksinen polyeteeni	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta	Muovikassit, pussit, kalvot. Muovipakkauskeräykseen.
	Polypropeeni	Jäykkä, sitkeä, hyvin monikäyttöinen	Narut, rasiat, kalvot, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen.
	Polystyreeni	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)	Rasiat, purkit, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen.
	Muut	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät	Rasiat, kannet, pussit. Muovipakkauskeräykseen.

PVC on ainut kuudesta muovityypistä, jota ei saa lajitella kotitalouksien muovinkeräykseen (Niiranen 2021; Suomen Uusiomuovi Oy 2022a). PVC sisältää klooria, joka korkeissa prosessilämpötiloissa kehittyy muille polymeereille haitallisiksi vetykloridikaasuiksi vaikeuttaen kierrätystä (Hopewell ym. 2009, 2119). Hajoaminen johtuu dehydroklooraatiosta (Khan ym. 2022, 30). Muut pakkausmuovit voi kierrättää laittamalla ne muovipakkauskeräykseen (Suomen Uusiomuovi Oy 2022a).



## 2.1 Polyetyleenitereftalaatti (PET)

PET-muovi on yksi kolmesta enemmän käytetystä muovista pakkausteollisuudessa. Ennen kaikkea sitä käytetään muovipulloissa, joissa se hallitsee markkinaa. 65 % kaikesta tuotetusta PET-muovista käytetään synteettisten kuitujen valmistukseen ja loput hyödynnetään pakkausteollisuudessa. (Velásquez ym. 2021, 314–315.) PET-muovin käyttökohteita ovat esimerkiksi ruokapakkaukset ja pullot, kuten juomapullot, erilaisten kastikkeiden pullot sekä öljypullot. (ChemicalSafetyFacts.org 2022.)

PET on kevyt, puolikiteinen kestumuovi, joka voi olla puolijäykkää/jäykkää, mekaanisesti iskunkestävää ja käsiteltäessä venyvää polymeeriä. Sitä tavataan sekä läpinäkyvänä että läpinäkymättömänä. Lisäksi PET-muovilla on korkea lämmönkestävyys ja kemiallinen kestävyys, joten se on hyvin stabiili polymeeri. (Velásquez ym. 2021, 315.) PET-muovin korkea sulamispiste aiheuttaaakin sekalaisen muovijätteen kierrätyksessä muiden, heikommin lämpöä kestävien polymeerien hajoamista ja uusiomuovin ominaisuuksien heikkenemistä, mikä aiheuttaa haasteita kierrätysprosesseille.

## 2.2 Polyeteeni (PE)

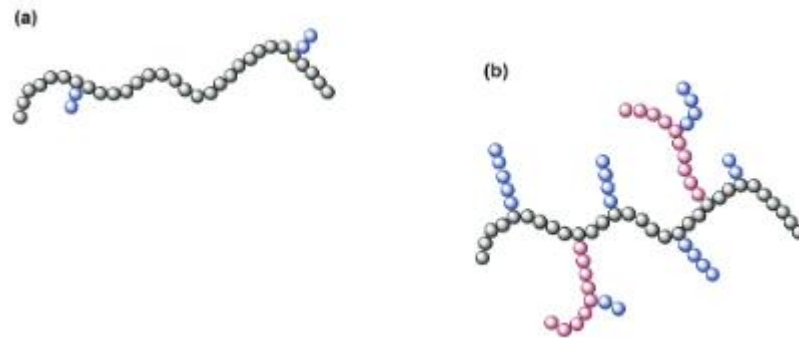
Polyeteeni on maailman käytetyin polymeeri ja yksi käytetyimpiä myös elintarvikepakkauksien materiaalina. Tärkeimmät polyeteenit pakkausteollisuudessa ovat HDPE ja LDPE, joiden rakenteet (esitetty kuvassa 2) ja siten myös tiheydet (esitetty taulukossa 2) sekä ominaisuudet poikkeavat toisistaan. (Velásquez ym. 2021, 315.)

Taulukko 2 Käytetyimpien polyeteenien eli korkeatiheyksisen polyeteenin (HDPE) ja matalatiheyksisen polyeteenin (LDPE) tiheydet (United States Plastic Corporation 2019).

Muovi	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )
HDPE	0,941–0,965
LDPE	0,910–0,925

HDPE on kiteinen polymeeri, joka koostuu suorista hiili-vety-ketjuista ja muutamista lyhyistä sivuhaaroista (kuva 2). Se on läpinäkymätöntä, kovaa, vedenkestävää muovia, jolla on hyvät mekaaniset ominaisuudet (jäykkyys, hyvät veto-ominaisuudet, alhainen iskun- ja

repeämiskestävyys). HDPE on vetolujuudeltaan ja lämmönkestävyydeltään parempaa kuin LDPE, joka taasen on sitkeämpää ja helpommin prosessoitavaa alhaisemman tiheyden vuoksi. (Velásquez ym. 2021, 315.) HDPE:tä käytetään pakkausteollisuudessa erilaisissa pulloissa ja säiliöissä sekä ostoskasseissa (ChemicalSafetyFacts 2022).



Kuva 2 Pakkausteollisuudessa yleisimmin käytettyjen polyeteenien rakenteet: a) Korkeatiheksinen polyeteeni HDPE b) Matalatiheksinen polyeteeni LDPE (Eselem Bungu & Pasch 2018, 1116, kuvaa muokattu).

LDPE:n on rakenteeltaan haaroittuneempi kuin HDPE (kuva 2). Se koostuu 1–3 pidemmästä haarasta sekä 10–30 lyhyemmästä sivuhaarasta 1000 hiiliatomiä kohden. (Velásquez ym. 2021, 315.) LDPE:n vetolujuus ja jäykkyys ovat alhaiset, mutta sillä on keskimääräinen iskunkestävyys ja repäisyjuuus. LDPE-muovilla on hyvät tiivistysominaisuudet, kosteus-sulku, läpinäkyvyys ja teollisen käsittelyn edellyttämä lämpöstabiilisuus. Polymeeriä käytetäänkin muovikalvoissa, jotka vaativat kuumasaumausta, sekä esimerkiksi kuumien take-away kupprien kansina ja erilaisissa pusseissa (leipä, hedelmä, vihannes). (ChemicalSafetyFacts 2022; Velásquez ym. 2021, 315.)

### 2.3 Polyvinyylidikloridi (PVC)

PVC on läpinäkyvä ja kemiallisesti stabiili polymeeri. Sen ominaisuuksiin kuuluu hyvä mekaaninen suorituskyky, joustavuus sekä vedenkestävyys. Joustavia PVC-kalvoja käytetään elintarvikepakkauksissa kutistekääreinä mm. juustojen, lihojen ja vihannesten pakkauksissa (Velásquez ym. 2021, 315; Selke & Curtis 2016, 120).

Alkuaine kloori on PVC:n valmistuksen tärkein ainesosa. Se tekee PVC:stä biologisesti ja kemiallisesti kestävästä muovin, jota voidaan käyttää mm. lääkkeiden pakkaamiseen (Selke & Curtis 2016, 119). Pakkausmateriaalina PVC:n tärkeitä käyttökohteita ovatkin juuri läpipainopakkaukset (lääke- ja purukumilevy). PVC:tä ei kuitenkaan tule kierrättää muiden muovien kanssa samaan kierrätysastiaan dehydrokloraatioissa johtuvan PVC:n hajoamisen (Khan ym. 2022, 30) ja kloorin muodostumisen vuoksi. Kloori heikentää muiden polymeerien ominaisuuksia muuttamalla korkeissa lämpötiloissa syövyttäväksi vetykloridikaasuksi. Koska kuluttajat saattavat lajitella PVC-pakkauksia kierrätysmuovina sen kierrätysnumeron perusteella, PVC:tä saattaa päätyä jonkin verran muovin kierrätysprosessiin. PVC tulisi kuitenkin erottaa kierrätysprosessissa muista muovilaaduista kierrätysmuovin laadun heikkene- misen ja energiantuotannon klooripäästöjen, kuten suolahapon ja kloorattujen dioksiinien vuoksi (Huber ym. 2014, 280; Selke & Curtis 2016, 120).

#### 2.4 Polypropeeni (PP)

Propeenimonomeerista valmistettava PP on kemialliselta rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin eteenimonomeereista valmistettava PE (Shameem ym. 2017, 3303). PP on laajasti käytetty puolikiteinen polymeeri sen mekaanisten ominaisuuksien, kemiallisen kestävyuden, kosteudensietokyvyn, helpon prosessoitavuuden ja alhaisten tuotantokustannusten vuoksi (Chow 2019, 420; Khalaj ym. 2016, 41; Vallejo-Montesinos ym. 2016, 83). Se on yksi kolmesta tärkeimmästä synteettisestä polymeeristä ja maailman toiseksi eniten valmistettu polymeeri PE:n jälkeen (Talarico ym. 2019, 2).

PP on jäykkä ja kestävä muovi, joka voi olla luonnostaan läpinäkyvää, läpinäkymätöntä tai värillistä. Polymeerillä on korkea sulamispiste, minkä ansiosta se kestää esimerkiksi mikroaaltouunin tai astianpesukoneen lämmön. Elintarvikepakkauksissa käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset purkit (jogurtti), pakkaukset (lääke) ja rasiat. (ChemicalSafetyFacts 2022; Velásquez ym. 2021, 315–316.)

## 2.5 Polystyreeni (PS)

Polystyreenin alhaiset tuotantokustannukset, matala tiheys ja kosteuden imukyky, hyvät kestävyys- ja lujuusominaisuudet, käsittelyn ja muovauksen helppous sekä läpinäkyvyys ovat tehneet siitä houkuttelevan raaka-aineen elintarvikepakkauksien materiaaliksi (Pilevar ym. 2019, 249).

Polystyreeni on väritöntä ja kovaa muovia, joka ei juurikaan jousta. Siitä voidaan valmistaa tuotteita muuttamalla se vaahdoksi tai kaatamalla polystyreeniä suoraan muotteihin (kertakäyttöastiat). PS:stä voidaan valmistaa erilaisia pakkauksia ja kansia, esimerkiksi kertakäyttöistä pikaruokaa varten. (ChemicalSafetyFacts 2022.) Polystyreeniä käytetään erittäin laajasti erilaisissa elintarvikepakkauksissa (Pilevar ym. 2019, 249).

## 3 Kotitalousmuovin kierrätysprosessin vaiheet

Kotitalouksien muovijätettä ei voida laittaa sellaisenaan kierrätysprosesseihin, vaan se on ensin esikäsiteltävä heterogeenisyyden ja erilaisten epäpuhtauksien vuoksi, koska kotitalousjäte on tyypillisesti sekoitus erilaisista muoveista, jotka ovat kontaminoituneet liasta tai muista epäpuhtauksista (paperi, puu, metalli, lasi). Tällaisen koostumukseltaan vaihtelevan jätevirran käsittely on hankalampaa kuin puhtaampien jätevirtojen käsittely. (Hubo & Raagaert 2014, 1.) Muovivirran heterogeenisyys ja epäpuhtaudet tuottaisivat kierrätysmuovin valmistuksessa merkittäviä haasteita, joita olisivat mm. muovien sekoittumattomuus ja erilaisten aineiden (klooriyhdisteet, rasvat, epäorgaaninen jäte) haitalliset vaikutukset muovin laatuun. Niinpä useammasta eri polymeeristä koostuva kotitalousmuovi vaatii monipuolisempaa esikäsittelyä kuin yhtä polymeeriä sisältävät homogeeniset jätevirrat, jotka ovat verrattain helposti kierrätettävissä. (Velásquez ym. 2021, 313.) Esimerkkinä homogeenisista, helpommin käsiteltävistä jätevirroista voidaan pitää panttisysteemillä toimivaa PET-pullojen kierrätystä.

Tässä kappaleessa esitetään erilaiset kotitalousjätteen esikäsittelyyn liittyvät vaiheet, joihin kuuluu muovijätteen käsittely kotitalouksissa, keräys, tunnistus ja lajittelu, pesu ja silppuaaminen sekä erottelu (Hopewell ym. 2009, 2119).

### 3.1 Muovipakkausten käsittely kuluttajan toimesta

Ennen elintarvikepakkausten lajittelua muovin kierrätysastiaan kuluttajan olisi hyvä tietää, mitä muovipakkauksille tulee tehdä kierrätysprosessin tehostamiseksi. Kuluttajan suorittamien esikäsittelyiden voidaan ajatella olevan kierrätysprosessin ensimmäinen vaihe.

Useat ihmiset pesevät muovipakkauksensa ennen kierrätysastiaan laittamista, sillä lika haittaa muovien kierrätysprosessia. Lian vuoksi esimerkiksi muovien lajittelussa käytetty tunnistusjärjestelmä voi antaa vääriä tuloksia muovien laaduista. Muoviastioiden liiallisesta pesusta onkin keskusteltu muovin kierrätykseen liittyen ympäristöystävällisyyden vuoksi. Fortumin (2022) mukaan muovipakkaukset kannattaa huuhdella kevyesti vedellä. Voidaankin pohtia, laskeeko muovipakkausten pesu ylipäättänsä muovinkierrätyksen ympäristöystävällisyyttä, koska siihen käytetään puhdasta vettä.

Nykykäsityksen mukaan elintarvikepakkaukset tulisi pestä puhtaiksi ruoantähteistä ja muista lajittelua haitallisista aineista aina ennen kierrätysastiaan laittamista. Tätä tukee myös havainto muovipakkauksista vapautuvista ihmisille vaarallisista mikrobeista (Niiranen 2021). Orgaanisten jätteiden poisto kuluttajan toimesta onkin kaikkein helpointa, koska ne eivät ole ehtineet pinttyä pakkausten pinnoille.

Keskeinen kysymys kuuluukin, kuinka puhtaaksi muovipakkaukset pitäisi saada ennen kierrätysastiaan laittamista. Suomen Uusiomuovi Oy:n (2022b) mukaan tuote on tarpeeksi puhdas kierrätykseen, kun sitä kehtaisi säilyttää pidemminkin aikaa kotona. Jos muovin puhtaaksi saaminen vaatii huomattavia määriä vettä ja pesuainetta, suositellaan sen laittamista muovinkeräyksen sijaan sekajätteeseen (Fortum 2022). Myös rasvaiset pakkaukset suositellaan lajiteltavaksi sekajätteeseen, sillä rasva aiheuttaa muiden muovien likaantumista kierrätysprosessissa (Niiranen, 2021).

Kuluttaja voi helpottaa kotitalousmuovien lajitteluprosessia myös erottelemalla eri muovilaidut toisistaan esimerkiksi irrottamalla korkin pullosta tai päällyskalvon leikkelepaketista. Erilleen olevia homogeenisiä muoveja on prosesseissa helpompi käsitellä kuin yhdessä olevia heterogeenisiä muovipakkauksia, joiden tunnistus ja käsittely on hankalampaa kahden

tai useamman muovilaadun vuoksi. Esimerkiksi pullon ja korkin saapuessa lajitteluun yhdessä, molemmat lajitellaan suuremman kappaleen eli pullon muovilaadun mukaan korkin päätyessä väärään muoviryhmään. Sama pätee sisäkkäin kierrätettyihin pakkauksiin, jotka lajitellaan uloimman kappaleenmuovilaadun mukaan. (Suomen Uusiomuovi Oy 2022b.)

### 3.2 Kotitalousmuovien keräys

Pakkausmuovien kerääminen Suomessa on hyvällä tasolla ja suomalaisten muovin kierrätys onkin viime vuosina kasvanut (Roschier ym. 2021, 76). Suomen Uusiomuovin mukaan kotitalousmuovia kierrätettiin vuonna 2020 lähes 29 000 tonnia, mikä oli 40 % enemmän kuin vuonna 2019 (Niiranen 2021).

Keräyspisteissä kaikki pakkausmuovit (pois lukien PVC) kerätään samaan astiaan, jolloin jätevirta koostuu useasta eri muovilaadusta. Tällaisen keräyssysteemin etuja ovat taloudellisuus, yksinkertaisuus ja edullisuus, koska keräysastioita ja -autoja ei tarvita useita. Käytössä oleva systeemi luo samalla haasteen heterogeenisen muovin kierrätykselle uusiksi tuotteiksi.

Kuluttajan voidaan ajatella olevan kierrätysprosessin kriittinen palanen, koska muovi poistuu kierrosta, jos kuluttaja sijoittaa sen sekajätteeseen (Lundelin 2020). Näin ollen muovia ei saavu jatkokäsiteltäväksi. Esimerkiksi Yhdysvalloissa muovin osuus sekajätteestä oli 12,2 % vuonna 2018 (Statista 2022). Sekajätteestä muoveja ei lajitella takaisin yhteiskunnan kiertoon, vaan ne päätyvät polttoon muiden jätteiden tavoin. Toimivan kiertotalouden saavuttamiseksi pakkausmuovit tulisi kierrättää muovinkeräysastioihin sekajätteeseen sijoittamisen sijaan.

### 3.3 Muovien tunnistus ja lajittelu

Muovin tehokas tunnistus ja lajittelu ovat kierrätysprosessin tärkeimpiä ja ratkaisevimpia vaiheita (Shameem ym. 2017, 3299; Singh ym. 2017, 412; Velásquez ym. 2021, 319). Puhdasta ja laadukkaan tuotteen valmistamiseksi eri polymeerit on saatava erilleen toisistaan mahdollisten haittavaikutusten, kuten muovien termisen hajoamisen ja yhteensopimattomuuden vuoksi. Kahdesta eri sulamispisteen omaavasta polymeeristä valmistetun

muovijakeen ominaisuudet ovat heikommat kuin yhdestä polymeeristä valmistetun materiaalin (Singh ym. 2017, 412). Eri muovien yhteensopimattomuus puolestaan näkyy muovien luontaisena sekoittumattomuutena. Tällaisten kierrätysmuovien käsittely tuotteiksi on haastavaa ja kannattamatonta lopputuotteen heikon laadun vuoksi. Kierrätysmuovista halutaan valmistaa neitseellisen muovin tasoista tuotetta (etenkin elintarvikekäyttöön), joten eri muovilaadut on kyettävä lajittelemaan ja myöhemmin erottelemaan erilleen uusiokäyttöä varten.

Muovien tunnistukseen yleisesti käytetty menetelmä on FTIR-spektroskopia (eng. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), joka tunnistaa muovit niiden infrapunaspektrien avulla. Tämä menetelmä on yksinkertainen ja tarkka, sillä jokaisella polymeerillä on oma ainutlaatuinen spektrinsä (niin sanottu sormenjälki). FTIR-spektroskopiaan liittyy kuitenkin muutamia haasteita. Esimerkiksi tunnistettaessa monikomponenttisia tai mustia pakkauksia tai pakkausten ollessa etiketin tai kalvon peittämiä, FTIR voi antaa vääriä tuloksia. (Grigorescu ym. 2019, 9.) Vääristyneet tulokset johtuvat tunnistuksen häiriintymisestä, koska pigmentillä ja etiketeillä voi olla täysin erilaiset spektrit kuin pakkauksen muovilla. Lisäksi sellaisten pakkausten tapauksessa, jossa kahta eri muovilaatua olevia kappaleita ei ole eroteltu toisistaan (pullo ja korkki), pakkaus lajitellaan keskimäärin suuremman kappaleen mukaan pienemmän kappaleen heikentäessä kierrätettävyyttä (Suomen Uusiomuovi Oy 2022b).

Muovilaatujen tunnistamiseen ja erotteluun kehitetyissä laitteistoissa muovit kulkevat hihnan läpi ja muovilaatuja tunnistetaan FTIR-spektroskopian avulla. FTIR-spektrometrejä on hihnalla useita, joista jokainen on koodattu tunnistamaan jotakin tiettyä muovilaatua. Tunnistetut muovin poistetaan hihnalta esimerkiksi paineilmalla. (Lundelin 2020.) Fortumilla on käytössä tällainen laitteisto ja sillä kierrätetään tällä hetkellä PP, PE ja PET-muoveja. Muovit, joita ei tunnisteta FTIR-spektroskopialla ja siten lajitella erikseen, siirtyvät energiantuotantoon.

Koska muoviastian kierrätettävä PS jää tällä hetkellä Fortumilla vaille kierrätystä, sen sisältämä energia hyödynnetään polttolaitoksilla. PS:n loppukäyttöön tarvitaan näin ollen parempia ratkaisuja, jotta sen raaka-ainepotentiaali saataisiin hyödynnettyä kierrätyksessä. PS:n kerääminen on muuten pelkkä haitta muovin kierrätysprosessille niin kauan, kun se täytyy erotella muista kierrätettävistä muovilaaduista.

FTIR:n lisäksi toinen mahdollinen pakkausmuovien tunnistamiseen soveltuva menetelmä on yhdistetty LIBS-Raman systeemi, joka on osoittautunut potentiaaliseksi laitteistoksi

muovien lajittelussa (Shameem ym. 2017, 3299). LIBS (eng. *laser-induced breakdown spectroscopy*) on tutkimuksen alla oleva uusi teolliseen mittakaavaan mahdollisesti soveltuva teknologia, joka perustuu kykyyn analysoida polymeerimatriiseissa olevaa hiiltä ja vetyä. Tekniikalla voidaan tunnistaa ja erottaa ainakin haitallinen PVC muusta muovijakeesta (Huber ym. 2014, 280). Yhdistetyllä LIBS-Raman systeemillä on potentiaalia erotella myös yleisimmät pakkausmuovit PET, PE, PP ja PS (Singh ym. 2017, 412). Raman antaa tarkempia tuloksia läpinäkyville muoveille, kun taas LIBS saattaa olla käyttökelpoisempi värillisten ja likaisten muovien tunnistuksessa. LIBS kykenee tunnistamaan värillisiä muoveja niiden sisältämien lisäaineiden avulla. (Shameem ym. 2017, 3299, 3303–3304.) LIBS ja Raman tukevat siis hyvin toisiaan muovien tunnistuksessa ja lajittelussa, mutta kyseisen menetelmän soveltuvuutta teolliseen mittakaavaan tulisi kuitenkin tutkia vielä lisää.

Kolmannen muovien tunnistamiseen soveltuvan menetelmän, XRF-spektroskopian (eng. *X-ray fluorescence spectroscopy*) avulla PVC voitaisiin lajitella erilleen perustuen sen sisältämään klooriin (Liu ym. 2019, 327).

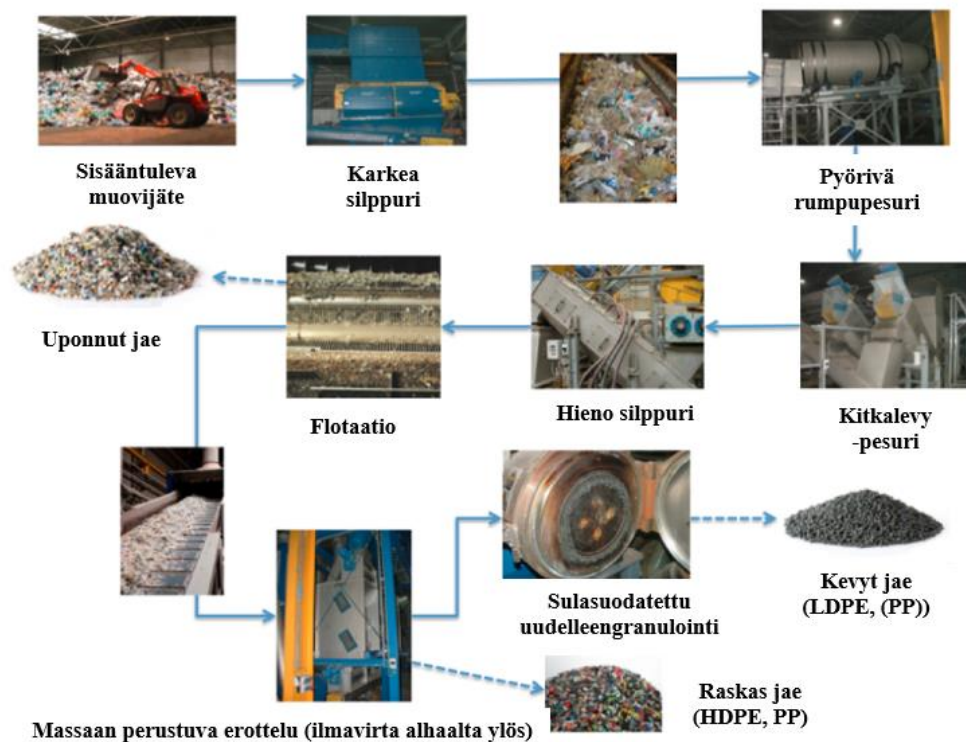
Kotitalousmuovia kierrätettäessä esikäsittelyiden merkityksen voidaan olettaa kasvavan lisääntyvän muovijättemäärän nopean tunnistamisen mahdollistamiseksi. Kotitalousmuovijäte sisältää vaikeasti tunnistettavia monikomponenttisia, kontaminoituneita ja etikettien peittämiä pakkauksia, jotka on pystyttävä esikäsittämään kierrätystä varten tehokkaasti. Ilman onnistunutta kuluttajan suorittamaa esikäsittelyä spektroskopiin mittauksiin perustuvat tunnistusmenetelmät voivat näin ollen antaa vääriä tuloksia ja lajitella muovit väärin muovilajien virtoihin. Kierrätysprosessin alkupäähän tulisikin kiinnittää enemmän huomiota, jotta muovien kierrätystä saataisiin tehostettua. Al-Salem ym. (2009, 2627) mukaan kierrätysjärjestelmän tehokkuudella (muovin keräys) ole mitään merkitystä, jos muovien tunnistus ja lajittelu eivät toimi. Tämä näkyy siten, että jos muoveja ei saada halutulla tavalla lajiteltua, päätyy se tällöin energiantuotantoon.

### 3.4 Muovien pesu ja silppuaminen

Pesun tarkoituksena on poistaa muovijätteen joukosta orgaaninen jäte (ruoantähteet) ja epäorgaaniset jakeet (paperi, lasi, metalli, kivet). Muovin pesusta puhuttaessa tarkoitetaan usein orgaanisten epäpuhtauksien poistoa. (Ragaert ym. 2017, 28–29.) Pesua ennen ja sen kanssa



limittäin suoritetaan muovin karkea silppuaminen pienemmiksi jakeiksi. Silppuaminen tehdään muovin käsittelyn helpottamiseksi jatkokäsittelyssä (pelletöinti ja muovin valmistus), ja lisäksi silputtu muovijae on helpompi pestä sekä jalostaa uusiksi tuotteiksi. Pesua ja silppuamista suoritetaan prosessissa vuorotellen (kuva 3). On huomioitavaa, että muovijätteen puhdistusta edesauttavia toimintoja tapahtuu varsinaisen pesuvaiheen lisäksi pitkin kierrätysprosessia; esimerkiksi kuluttajan suorittamana muovipakkausten huuhteluna (Eskelinen ym. 2016, 21).



Kuva 3 Muovin silppuamisen ja pesun suorittaminen vaiheittain. Pesusta muovi siirtyy suoraan erotteluprosesseihin (kuvassa flotaatio). (Ragaert ym. 2017, 31.)

Muovin silppuaminen sekä pesu suoritetaan useamman kerran puhtaimman mahdollisen muovivirran saavuttamiseksi. Pesun ensimmäisessä vaiheessa (pyörivä rumpupesuri) muovijakeesta poistetaan epäorgaaniset epäpuhtaudet (lasit, metallit ja kivet) gravitaatiovoiman avulla. Seuraavissa vaiheissa (kitkalevy pesurit) pesun tarkoituksena on poistaa orgaaninen jäte muovin pinnalta. Muutaman pesun ja silppuamisen jälkeen muovi ajetaan suoraan

ensimmäiseen erotusprosessiin. (Ragaert ym. 2017, 30.) Yleisimmät erotusprosessit esitellään seuraavassa kappaleessa.

### 3.5 Eri muovilaatujen erotusprosessit

Erottelyn tarkoituksena on poistaa murskatusta ja pestystä muovijakeesta väärää muovilaa-  
tua olevat muovit, jotta muovin tuotantoon saataisiin mahdollisimman homogeenistä raaka-  
ainetta. Tämä tehdään muovin valmistuksessa ilmentyvien haittavaikutusten minimoimiseksi, joita ovat muun muassa muovien terminen hajoaminen ja yhteensopimattomuus. Erotusprosessesja on useita erilaisia, jotka perustuvat yleensä muovien tiheyseroihin. Erotusmenetelmät voidaan jakaa kahteen osaan, jotka ovat märkä- ja kuivaerottelu (Dodbiba & Fujita 2004, 165; Velásquez ym. 2021, 320).

Yksi yleisimmistä märkäerottelumenetelmistä on vesijohtovedellä tehtävä flotaatio (sinkfloat-erottelu), joka perustuu eri polymeerien tiheyseroihin (taulukko 3) (Ragaert ym. 2017, 30; Velásquez ym. 2021, 320). Tällä menetelmällä voidaan erotella polymeerit, joilla on verrattain suuri tiheusero. Lisäksi menetelmä on tehokas pahvin ja lasin erottamiseen muovijakeesta. (Velásquez ym. 2021, 320.) Viidestä yleisimmästä muovista PP ja PE jäävät floataatiossa veden pinnalle kellumaan, kun taas PET, PS ja PVC laskeutuvat menetelmässä altaan pohjalle vettä suuremman tiheydensä vuoksi (Pongstabodee ym. 2008, 477; Ragaert ym. 2017, 30).

Al-Salem ym. (2009, 2627) mukaan flotaatio ei ole tavallisesti kovinkaan tehokas menetelmä polymeerien erottamiseen, sillä saman tiheyden omaavia muoveja ei saada veden avulla eroteltua toisistaan. Näiden erottamista voidaan kuitenkin parantaa esimerkiksi korvaamalla vesijohtovettä etanoliliuksella tai kalsiumkloridin vesiliuksella. Pongstabodee ym. (2008, 476–478) saivat eroteltua etanoliliuksen avulla PP:n ja PE:n toisistaan (taulukko 3). Sen sijaan kalsiumkloridin ( $\text{CaCl}_2$ ) vesiliuksella he saivat eroteltua PET:n ja PVC:n PS:stä, mutta eivät kuitenkaan toisistaan. PET:n ja PVC:n tiheydet menevätkin osittain päällekkäin (Taulukko 3). (Pongstabodee ym. 476–478.)

Taulukko 3 Pongstabodeen ym. etanoli- ja  $\text{CaCl}_2$ -liuosten hyödyntämiseen perustuvissa flotaatiotesteissä käytettyjen muovien ja liuosten tiheydet (Pongstabodee ym. 2008, 477–478).

Aine	Tiheys ( $\text{g/cm}^3$ )
HDPE	0,94–0,96
PP	0,90–0,91
PET	1,38–1,39
PVC	1,20–1,42
PS	1,05–1,07
Etanoli	0,93–0,96
$\text{CaCl}_2$ -liuos	0,90–1,20

Nykytiedoilla näiden liuosten käyttö teollisessa mittakaavassa vesijohtoveden sijaan on kuitenkin epätodennäköistä prosessin monimutkaisuuden ja korkeampien kemikaalikustannusten vuoksi. Useamman prosessivaiheen johdosta muovien käsittelyaika saattaisi myös kasvaa. Muovin kierrätyksen on oltava nopeaa ja kustannustehokasta, jotta kaikki lajitellut muovijätteet saataisiin käsiteltyä tehokkaasti myös muovin kierrätyksen kasvaessa.

Kuivaerottelusta esimerkkinä toimii tribosähköinen erotus, joka voi erottaa kaksi polymeeriä hankaamalla niitä toisiaan vasten. Tribosähköinen erotin erottelee muovilaadut pintavarauksen siirtoilmion perusteella. Hankauksessa toinen partikkeli varautuu positiivisesti ja toinen negatiivisesti tai molemmat pysyvät neutraaleina (saman muovilaadun ollessa kyseessä). Polymeerit saadaan kosketuksiin toistensa kanssa pyörivän rummun avulla. (Al-Salem ym. 2009, 2627; Xiao ym. 2003, 1.) Tämän tekniikan suurin heikkous laajassa teollisessa mittakaavassa ovat partikkeleiden epätasaiset kontaktit keskenään (hankaus toisiaan vasten) ja herkkyys ympäristön olosuhteille. Yksi tapa ratkaista epätasaisuuden ongelma on esikäsitellä materiaali elektronisuihkusäteilyllä, jolloin muovipartikkeleilla on jo ennestään varaus ja erotus on tehokkaampaa. (Grigorescu ym. 2019, 6.) Tribosähköistä erottelua hyödyntääkseen on varmistettava partikkelien sopiva koko laitteelle saapuessaan. Partikkelit eivät saisi olla kooltaan 4–5 mm suurempia, mutta eivät liian pieniäkään, koska liian pienet partikkelit haittaavat elektrodien toimintaa kerääntyen niiden pinnalle. (Xiao ym. 2003, 1.)

## 4 Mekaaninen kierrätys

Mekaanista kierrätystä voidaan hyödyntää vain homogeenisiin muovivirtoihin (Al-Salem ym. 2009, 2628), koska heterogeenisen muovivirran hyödyntäminen heijastuu uusiomuovin ominaisuuksiin eri muovilaatujen mahdollisten yhteensopimattuuksien tai hajoamisten vuoksi. Heterogeenisestä kotitalousmuovista on siis saatava muodostettua homogeenisiä virtoja mekaanisen kierrätyksen hyödyntämiseen. Kotitalousmuovien mekaaniseen kierrätykseen kuuluukin esikäsitteilyinä edellä esitettyjä vaiheita: keräys, tunnistus ja lajittelu, pesu ja silppuaminen, erottelu ja viimeisenä pelletöinti (Ragaert ym. 2017, 28–29; Velásquez ym. 2021, 313). Mekaanisen kierrätyksen kannalta muovien esikäsitteilyt (etenkin lajittelu ja erottelu) ovat tärkeitä laadukkaan muovin valmistamiseksi.

Mitä heterogeenisempää ja likaisempaa muovijäte on, sitä hankalampaa se on kierrättää mekaanisesti (Al-Salem ym. 2009, 2628). Sekalaisen kotitalousmuovin mekaaninen kierrätys johtaa lopulta aina polymeeriseosten syntymiseen (Ragaert ym. 2017, 34). Tämän vuoksi kotitalousmuovit lajitellaan muovilaatujen mukaan omiin homogeenisiin virtoihinsa kierrätysprosessin lajitteluvaiheessa.

Esikäsitteilyn lisäksi haasteen sekamuovijätteen mekaaniselle kierrätykselle luovat polymeerien erilaiset sulamislämpötilat. Heterogeenistä jätettä käsiteltäessä prosessilämpötilaksi valitaan yleensä suurin yksittäisen polymeerin sulamislämpö, mikä johtaa alhaisempien sulamispisteiden omaavien polymeerien hajoamiseen. Lopullisen tuotteen ominaisuudet kärsivät tästä. (Ragaert ym. 2017, 34.) Ongelma on merkittävä erityisesti PET ja PVC muoveja sisältävissä seoksissa. PET-muovilla oleva suuri sulamispiste (260–280 °C) kiihdyttää PVC-muovin (sulamispiste 160–210 °C) dehydrokloorausta eli hajoamista, mikä vapauttaa muille polymeereille haitallisia vetykloridikaasuja.

Muovien hajoamisen lisäksi ongelmana useamman polymeerisen seoksessa on niiden sekoittumattomuus. PlasticsEuropen (2015) tilastojen mukaan tyypillisimmät polymeerit muovijätteessä ovat polyolefiinit (PP ja PE), PET ja PVC. Näiden polymeerien yhdistelmän sekoittaminen tuottaa aina sekoittumattomia seoksia. (Ragaert ym. 2017, 35.) On selvää, että tämä on ongelma kierrätyksen ja tuotteen laadun kannalta, jolloin esikäsitteilyn merkitys

muovilaatujen tunnistukselle ja lajittelulle sekä erottelulle on olennainen. Erottelussa on tärkeää saada tietyn muovilaadun virrasta poistettua muut muovilaadut.

Mekaanisessa kierrätysprosessissa muovin laatu heikkenee (Al-Salem ym. 2009, 2628), minkä vuoksi kierrätysmuovista valmistetut pelletit voidaan lisätä neitseellisen muovin joukkoon muovien valmistuksessa uusiomuovin laadun säilyttämiseksi. Mekaanisesti kierrätetystä muovista voidaan valmistaa joko osittain tai täysin kierrätettyä uusiomuovia riippuen käyttötarkoituksesta. Nykyään löytyy monia erilaisia kulutustuotteita, jotka on valmistettu 100 % kierrätetystä materiaalista.

Muovit, jotka pystytään kierrättämään tehokkaasti mekaanisella kierrätyksellä, ovat jo nykyisen kierrätysjärjestelmän piirissä. Tällaisia muoveja ovat esimerkiksi teollisuuden muovijätteet kuten kirkasmuovista kootut muovipaalut sekä pantilliset muovipullot. Näiden kierrätys mekaanisesti on mahdollista homogeenisen ja suhteellisen puhtaan muovin vuoksi. Lisäksi pakkausmuoveista PP, HDPE, LDPE ja PET kierrätetään Fortumin laitoksella nykyisillä mekaanisilla menetelmillä (Lundelin 2020).

Edellä mainittujen haasteiden vuoksi mekaaninen kierrätys ei tarjoa riittävästi ratkaisuja kotitalouksien muovipakkausten kasvavaan kierrätykseen. Sen sijaan kotitalousmuovijätteen kierrätysastetta voidaan tehostaa kehittämällä kemiallisen kierrätyksen menetelmiä siten, että myös sekalaisia muovijätteitä voidaan hyödyntää laajemmin. Mekaanisen kierrätyksen laajempi käyttö vaatisi sitä, että kotitalousmuovit saataisiin nykyistä tehokkaammin pestyä ja eri muovilaadut eroteltua omiksi virroikseen ennen pelletöintiä. Tässä on kuitenkin prosessitekniisiä ja taloudellisia haasteita, joten ratkaisuja kannattaa hakea ennemmin kemiallisesta kierrätyksestä.

Kapasiteettia ei ole siis kasvatettavaksi kovinkaan paljoa mekaanisen kierrätyksen suhteen ja muoveja ei pystytä loputtomiin tällä menetelmällä kierrättämään. Mekaanisesti kierrätetyn muovin käyttökohteet rajoittuvat pakkausteollisuuden ulkopuolelle lainsäädännön vuoksi (Niiranen 2021; Eskelinen ym. 2016, 46), mikä katkaisee muovin täydellisen kiertokulun. Pakkaukset ovat suurin yksittäinen muovien käyttöalue (PlasticsEurope 2019, 20) ja ne joudutaan tuottamaan lakisääteisesti raakaöljyistä elintarvikekosketusten vuoksi. Mekaanisen kierrätyksen rinnalle tarvitaan näin ollen kemiallisia kierrätysmenetelmiä kierrätysasteen nostamiseksi, minkä lisäksi kemiallinen kierrätys mahdollistaisi muovin uusiokäytön elintarvikepakkauksissa.

## 5 Kemiallinen kierrätys

Muovin kierrätysprosenttia ja -kapasiteettia halutaan kasvattaa, mikä voidaan mahdollistaa kehittämällä erilaisia kemiallisia kierrätysmenetelmiä mekaanisen kierrätyksen rinnalle. Mekaaniset kierrätysmenetelmät sopivat pääsääntöisesti vain homogeenisille ja puhtaille muovivirroille, kun taas kemiallisilla menetelmillä kierrätystä voitaisiin laajentaa heikompi laatuisten ja vaikeammin hyödynnettävien muovivirtojen käyttöön. (Roschier ym. 2020, 17.) Tällaisia virtoja ovat esimerkiksi erilaiset kontaminoituneet tai useaa polymeeriä sisältävät muovipakkaukset.

Kemiallinen kierrätys perustuu kemiallisten reaktioiden avulla tapahtuvaan polymeerien rakenteen pilkkomiseen pienemmiksi monomeereiksi. Tavoitteena on muuntaa muovijäte yksinkertaisemmiksi kemikaaleiksi, joita voidaan käyttää raaka-aineena uusien materiaalien valmistamisessa (Velásquez ym. 2021, 313). Näitä materiaaleja voidaan hyödyntää myös elintarvikepakkausissa, mikä tarjoaa kemiallisesti kierrätetyille muovilaaduille laajemmat käyttömahdollisuudet kuin mekaanisesti kierrätetyille muoveille. Kemiallisen kierrätyksen eri tekniikoita ovat esimerkiksi pyrolyysi, kaasutus ja depolymeraatio (Sawant ym. 2013, 1390; Roschier ym. 2020, 21).

Termokemiallisten prosessien, pyrolyysin ja kaasutuksen avulla jätemuovit voidaan muuttaa peruskemikaaleiksi kuten monomeereiksi, aromaattisiksi hiilivedyiksi tai muiksi halutuiksi kemikaaleiksi (Qureshi ym. 2020, 3). Pyrolyysissä muovin rakenne hajotetaan altistamalla se korkeille lämpötiloille hapettomissa olosuhteissa katalyytin avulla (Rahimi & García 2017, 2; Roschier ym. 2021, 24). Prosessissa saadaan tuotettua tyypillisesti tervaöljystä koostuvaa pyrolyysiöljyä, jota voidaan käyttää jatkossa erilaisiin käyttötarkoituksiin kuten muovien tuotantoon (Laermann 2021). Prosessista ei vapaudu ympäristöön kasvihuonepäästöjä hapettomien prosessiolosuhteiden vuoksi (Roschier ym. 2020, 24). Pyrolyysin suurimmat haasteet ovat suuri teollisen mittakaavan toiminta ja sen monimutkaisuus. Tekniikalla nähdään kuitenkin olevan mahdollisuus nousta yhdeksi tärkeäksi osaksi muovijätteen käsittelyä ja kierrätystä. (Rubel ym. 2019.)

Kaasutuksella voidaan puolestaan käsitellä lajittelematonta ja kontaminoitunutta muovijätettä, koska kaasutuksessa muovijäte hajotetaan osittain tai täysin ja muutetaan kaasuksi

leijupeti- tai kuplapetireaktorissa (Muovien kierrätys 2022; Roschier ym. 2020, 25). Prosessista saadaan ulos synteetikaasua, jota voidaan käyttää uusien polymeerien valmistuksessa (Roschier ym. 2020, 25). Prosessissa syntyvät mahdolliset eri kaasut erotellaan sykloneiden avulla (Muovien kierrätys 2022), minkä vuoksi kaasutuksella voidaan käsitellä myös lajittelematonta muovijätettä.

Termokemiallisilla prosesseilla eli pyrolyysillä ja kaasutuksella voidaan teoriassa tuottaa polymeerejä minkälaisesta muovivirrasta tahansa. On kuitenkin huomioitava, että elintarvikkeissa käytettävien muovien laatustandardien ja lainsäädännön vuoksi kotitalousmuovin esikäsitteily kemiallisia kierrätysprosesseja varten on yleensä välttämätöntä. (Laermann 2021.)

Kolmas kemiallisen kierrätyksen muoto depolymeraatio on polymeraation käänteisreaktio, jossa muovien rakenne hajotetaan takaisin pienemmiksi rakenneosasiksi eli monomeereiksi, joista saadaan valmistettua uusia polymeerejä (Laermann 2021). Depolymeraatiota varten tarvitaan erilaisia entsyymejä ja mikrobeja (Roschier 2020, 26). Esimerkiksi PET:n depolymerointi tapahtuu transesteröimällä polymeerin hiiliketju nukleofiileillä, jolloin polymeeriketju katkeaa monomeereiksi. Nukleofiileinä voivat toimia esimerkiksi etyleeniglykoli, metanoli, vesi tai hydroksidi. (Rahimi & García 2017, 4.) Depolymeraatiolla voidaan hajottaa pakkausmuovien yleisistä muovilaaduista ainakin PE, PET ja PS (Roschier ym. 2020, 26).

Kemiallisen kierrätyksen suurimpia haasteita on sen taloudellinen kannattamattomuus. Tekniikat ovat verrattain kalliita ja samaan aikaan petrokemian raaka-aineet ovat ainakin toistaiseksi olleet huomattavasti halvempia kuin kemiallisella kierrätyksellä generoidut vastaavat yhdisteet (Hopewell ym. 2009, 2118). Taloudellisen kannattavuuden ohella prosessien suuret energiatarpeet aiheuttavat haasteita kemialliselle kierrätykselle. Koska muovien hajottaminen pienemmiksi rakenneosasiksi vaatii ulkopuolista energiaa, kemiallinen kierrätys kuluttaa mekaanista kierrätysprosessia enemmän energiaa. Tämä energia on aina lisä neitseellisen muovin tuotannossa käytettyyn energiamäärään, mikä herättää kysymyksiä kierrätyksen kestävyteen liittyen. (Roschier ym. 2020, 30.)

Kemiallisen kierrätyksen kasvattaminen teolliseen mittakaavaan ja yleiseen käyttöön vaatii tasapainoa taloudellisuuden, lainsäädännön ja ympäristövaikutusten välillä (Roschier ym. 2020, 18). Kemiallisen kierrätyksen mahdollisuudet ovat riippuvaisia riittävästä laadukkaasta muovijätteen saatavuudesta sekä kierrätystekniikoiden kehittämisestä, jotta voidaan tuottaa

suuria määriä kierrätystuotteita kustannustehokkaasti (Laermann 2021). Vaikka kemiallisella kierrätyksellä tuotettujen muovien laatustandardit eivät ole yhtä vaativia kuin mekaanisella kierrätyksellä, muovien lajittelu ja puhdistus ovat tärkeitä prosessivaiheita myös useille kemiallisille kierrätysmenetelmille (Rubel ym. 2019). Lisäksi lainsäädännön on oltava kemialliselle kierrätykselle suotuisa esimerkiksi lisäämällä kannustimia ja rahoitusta sitä harjoittaville yrityksille (Laermann 2021).

Tällä hetkellä monet kemialliset kierrätysprosessit ovat tutkimuksen alla. Niitä halutaan kehittää ja saada teolliseen käyttöön tehokkaamman muovinkäsittelyn ja raaka-ainekierron ylläpitämiseksi. On laskettu, että jopa 95 % muovipakkausten arvosta menetetään, jos niiden käyttö rajoittuu vain yhteen käyttökertaan (Roschier ym. 2020, 17). Monet suuret kansainväliset yritykset ovatkin sitoutuneet käyttämään kierrätysmuovia palveluissaan mahdollisuuksien mukaan, mikä on tuonut merkittäviä rahasummia kiertotalouden kehittämiseen ja sitä kautta kemialliseen kierrätykseen. Kyse on tärkeästä edistysaskeleesta, sillä aikaisemmin yrityksen ja kuluttajat ovat ajatelleet muovin olevan raaka-aineen sijaan jätettä, josta on päästävä eroon. (Closed Loop Partners 2019, 10, 22.)

Kemiallinen kierrätys voi olla tulevaisuudessa kiertotalouden kannalta erittäin tärkeä kotitalousmuovin kierrätysmuoto, jossa käytetystä muovimateriaalista saataisiin valmistettua neitseellisen muovin kaltaista uusiomuovia (Laermann 2021). Vaikka mekaanisesti kierrätetty muovimateriaali olisi täysin puhdasta, ei mekaanisesti kierrätettyä uusiomuovia voida pitää ihmisen terveydelle turvallisenä. Muovin mekaaninen kierrätys tarvitsisi siis rinnalleen kemiallisia kierrätysmenetelmiä, jotta kierrätysmuoveja voitaisiin hyödyntää myös elintarvikepakkausissa.

## 6 Muovien energiasisällön hyödyntäminen polttamalla

Edellä mainittujen haasteiden vuoksi mekaaninen ja kemiallinen kierrätys voivat olla sekalaisen muovijätteen osalta mahdotonta. Tällöin jätteiden sisältämä energia voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Muovit sisältävät Kumarin ym. (2011, 898) mukaan keskimäärin lähes yhtä paljon energiaa kuin puhdas lämmitysöljy. Koska kaatopaikkasijoitusta tulisi



viimeiseen asti välttää, muovien avulla tuotettu energia on järkevin ratkaisu, jos kierrätys ei ole mahdollista.

Maailmalla päätyy suuria määriä muovijätettä kaatopaikoille ja meriin. Kyseisellä muovimäärällä saataisiin tuotettua energiaa luonnon roskaamisen ja saastuttamisen sijaan. Ragaert ym. (2017, 28) mukaan Euroopan kaatopaikoille vuonna 2014 sijoitettu 8 Mt muovijättemäärä vastaa energialtaan lähes 100 miljoona öljytynnyrillistä. Toki muoveja poltettaessa vapautuu haitallisia kasvihuonekaasuja ilmakehään energiantuotannonkin kautta (Velásquez ym. 2021, 313), mutta muovijätteestä saadaan kuitenkin tällä tavoin otettua mahdollinen hyöty irti. Energiantuotantolaitoksilla kaasujen päästövaikutuksia pyritään minimoimaan tehokkailla puhdistusjärjestelmillä. Kaatopaikkasijoituksen tarkoitus sen sijaan on vain loppusijoittaa jäte, joka voi kulkeutua pahimmassa tapauksessa edelleen esimerkiksi vesistöihin.

Optimitapauksessa eri muovilaaduista vain biohajoavat muovit päätyvät lähtökohtaisesti energiantuotantoon, jos ne on kierrätetty muovinkeräykseen. Biohajoavat muovit päätyvät energiakäyttöön, koska biohajoavat pakkaukset saattaisivat alkaa hajoamaan ajan saatossa, mistä johtuen niiden vaikutus uusiomuovin ominaisuuksiin olisi negatiivinen. Uusiomuovin tarkoitus on olla hajoamatonta ja uudelleen kierrätettävää, joten biohajoavia muoveja ei haluta mukaan normaalien muovien kierrätykseen. Kierrätyslaitoksella biohajoavat muovipakkaukset pyritään tunnistamaan ja lajittelemaan energiantuotantoon (Suomen Uusiomuovi 2022b.)

Muovin keräysmahdollisuudet ovat parantuneet viime aikoina, mikä on lisännyt kerätyn muovijätteen määrää. Samaan aikaan muovijätteestä kierrätetyn raaka-aineen kysyntä ei ole kasvanut samassa tahdissa, minkä johdosta varsinkin heikkolaatuista muovijätettä päätyy polttoon. (Miettinen 2021.) Energiantuotannon tarkoitus onkin saada jollakin tapaa hyöty (lämpöarvo) irti niistä muoveista, joita ei lajitteluprosesseissa pystytä tunnistamaan kierrätettäviin muovijakeisiin.

## 7 Kotitalousjätteen kierrätyksen ongelmia

Tällä hetkellä muovipakkauksista valmistettua kierrätysmuovia ei voida käyttää elintarvikekäyttöön jätevirran likaisuuden vuoksi (Niiranen 2021). Elintarviketeollisuudessa pakkauksissa käytettävän muovin laatua määrää tuoteturvallisuuslainsäädäntö, jota tällainen heterogeeninen elintarvikkeiden kanssa kosketuksissa ollut muovijäte ei täytä. Elintarvikkeiden valmistaja ei voi vakuuttaa millään tavalla pakkauksen olevan ihmiselle vaaraton, jos se on valmistettu heterogeenisestä kierrätysmuovista. Kierrätyksessä lajittelun on oltava mahdollisimman korkealaatuista, jotta kierrätetyn muovin uudelleenkäyttö elintarvikepakkauksissa olisi ylipäättään mahdollista (Shameem ym. 2017, 3300). Kemiaallinen kierrätys onkin ainoa turvallinen tapa kierrättää pakkausmuoveja takaisin elintarvikekäyttöön, koska prosessissa muovi hajoaa lähtöaineiksi tuhoten sen sisältämät vaaralliset mikrobit (Niiranen 2021).

Kierrätysmuovin tuotannon suhteen on suuri ongelma, että kierrätysmuovin käyttökohteita tarvittaisiin lisää kierrätyksen kannattavuuden parantamiseksi. Lainsäädännön puitteissa kierrätysmuovia ei voida käyttää uudestaan elintarviketeollisuudessa, joten elintarvikepakkauksen valmistus vaatii fossiilisia raaka-aineita katkaisten muovin täydellisen kiertokulun käytön ja kierrätyksen välillä. Muoviteollisuus tulee näin ollen luultavasti olemaan jossain määrin riippuvainen raakaöljyn käytöstä jatkossakin, mutta tarvetta fossiilisille raaka-aineille voidaan vähentää käyttämällä kierrätysmuovia ja uusiutuvia raaka-aineita siellä missä pystytään. Koska pakkausteollisuus kattaa alle puolet Euroopan muovikysynnästä (PlasticsEurope 2019, 20), muovien valmistukseen tarvittavien fossiilisten raaka-aineiden käyttöä saataisiin vähennettyä merkittävästi tehostamalla kierrätysmuovien käyttöä muissa kuin pakkausmateriaaleissa. Yksi uusi innovaatio mekaanisesti valmistetun uusiomuovin hyödyntämiseen voisi olla elintarvikepakkauksen runko, jonka elintarvikekosketuksessa oleva pinta päällystettäisiin neitseellisellä muovilla tuoteturvallisuuden takaamiseksi (Niiranen 2021).

## 8 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, minkälaisia ongelmia ja haasteita muovien eri kierrätysmenetelmiin ja niiden prosesseihin liittyy. Muovijätteen määrä maapallolla kasvaa jatkuvasti, mikä vaatii myös muovien kierrätyksen tehostamista jätteistä aiheutuvien ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Muovijätteen sijoittaminen kaatopaikoille ei ole hyväksyttävää niistä aiheutuvien ympäristövaikutusten sekä raaka-aineiden vähenemisen vuoksi. Tämä tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena etsien tietoa eri tietokannoista, ja muovien kierrätystä tutkittiin keskittyen sekä käytettyihin kierrätysmenetelmiin että muovin kierrätyksen mahdollisiin kehityskohteisiin.

Kotitalousmuovin kierrätysprosessissa suurimmat haasteet ovat muovien esikäsittelyssä. Heterogeenisen jätteen kierrätys vaatii monimuotoista esikäsittelyä laadukkaan ja turvallisen lopputuotteen valmistamiseksi. Esikäsittelyssä kuluttajan toiminnalla sekä prosessissa tapahtuvan lajittelun tehokkuudella on suurimmat vaikutukset siihen, miten muovivirta saadaan lopulta hyödynnettyä. Muovien tunnistamiseen ja lajitteluun liittyy monia ongelmia, joita pitää yrittää ratkaista kierrätyksen tehostamiseksi.

Tutkimuksen tuloksista huomattiin, että kuluttajien toimintaa ennen muovien kierrätystä voitaisiin kehittää ja selkeyttää kierrätysprosessin tehostamiseksi. Muovin kierrätysprosessin toimijoiden tulisi ilmoittaa kuluttajille, miten pakkaukset tulisi käsitellä ennen kierrätystä. Lisäksi tarvittaisiin selkeät ohjeet siitä, minkälaisia muovipakkauksia voi kierrättää. Tieto olisi hyvä saada esimerkiksi suoraan pakkauksiin. Tiedonvälitystavasta riippumatta tärkeintä olisi saada kierrätysohjeet laajalti jaettua ja siten mahdollisesti kasvatettua muovien kierrätystä sekä paranneltua kotitalouksien muovivirtojen laatua.

Kotitalouksissa kierrätettävistä muoveista PS jää tällä hetkellä Suomessa Fortumin kierrätysprosessissa hyödyntämättä ja se päättyy energiantuotantoon muiden tunnistamattomien muovipakkausten tavoin. PS:n hyödyntämiseen olisi hyvä saada ratkaisuja, koska sen keräys nykyisellä tavalla on muuten tarpeetonta. Nykytilanteessa PS voitaisiin yhtä hyvin kierrättää sekajätteeseen, jonka kautta sen sisältämä energia saataisiin poltossa hyötykäyttöön.

Mekaanisen kierrätyksen rinnalle olisi hyvä saada myös kemiallisia kierrätysmenetelmiä, vaikka nämä eivät olisikaan vielä taloudellisesti kannattavia. Kemialliset

kierrätysmenetelmät mahdollistaisivat haastavammin hyödynnettävissä olevien heterogeenisten muovijätevirtojen kierrätyksen sekä mekaanisia kierrätysmuoveja laajemman käytön. Kierrätysmenetelmien kehittämisen kannalta olisi tärkeää saada kokemuksia teollisen mittakaavan jatkuvatoimisesta prosessista ongelmien havainnoimiseksi.

Tutkimuksen tärkein tulos on havainto siitä, kuinka suuri merkitys kierrätysprosessin alkuvaiheen toiminnoilla on sen loppupään mahdollisuuksiin. Oikeanlainen kierrätys sekä toimiva lajittelu ja puhdistus heijastuvat niin mekaanisen kierrätyksen kuin potentiaalisen kemiallisen kierrätyksen lopputuotteisiin ja niiden potentiaaliin käyttökohteisiin. Heterogeenisistä kotitalouksien muovivirroista olisi saatava tehokkaasti hyvälaatuisia ja homogeenisiä muovivirtoja mekaaniseen ja kemialliseen kierrätykseen. Ratkaisuja ja innovaatioita tarvitaan nopeasti, sillä muovijätteen määrä maapallolla kasvaa jatkuvasti.

Lisäksi käytetyt muovimateriaalit tulisi nähdä raaka-aineena jätteen sijaan. Tutkimus- ja kehitystyötä tulisi kohdistaa ensisijaisesti muovien kemiallisiin kierrätysmenetelmiin sekä lajittelun tehostamiseen. On myös huomioitavaa, ettei kierrätysjärjestelmän tehokkuudella ole mitään merkitystä, jos sitä edeltävä muovien tunnistus ja lajittelu eivät toimi. Jotta muovien kierrätystä voitaisiin tehostaa, olisi tärkeää saada lisää tutkimustietoa mm. LIBS-Raman-systeemin toimivuudesta muovien lajittelussa sekä kemiallisten kierrätysmenetelmien soveltuvuudesta teolliseen mittakaavaan.

## Lähteet

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. 2009. *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. Waste Management 29/2009, 2625–2643.
- ChemicalSafetyFacts.org 2022. *Types of plastic food packaging and safety: A close-up look*. Viitattu 28.1.2022. Saatavissa <https://www.chemicalsafetyfacts.org/types-plastic-food-packaging-safety-close-look/>
- Chow, W. S. 2019. *Polypropylene Blends: Properties Control by Design*. Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites, 419–480.
- Closed Loop Partners 2019. *Accelerating circular supply chains for plastics: A landscape of transformational technologies that stop plastic waste, keep materials in play and grow markets*. Viitattu 3.4.2022. Saatavissa [https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2021/01/CLP\\_Circular\\_Supply\\_Chains\\_for\\_Plastics\\_Updated.pdf](https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2021/01/CLP_Circular_Supply_Chains_for_Plastics_Updated.pdf)
- Di Maio, F., Rem, P. C. 2015. *A robust indicator for promoting circular economy through recycling*. Journal of Environmental Protection 6/2015, 1095–1104.
- Dodbiba, G., Fujita, T. 2004. *Progress in separating plastic materials for recycling*. Physical Separation in Science and Engineering 13/2004, 165–182.
- Eselem Bungu, P. S., Pasch, H. 2018. *Branching and molar mass analysis of low density polyethylene using the multiple preparative fractionation concept*. Polymer Chemistry 9/2018, 1116–1131.
- Eskelinen, H., Haavisto, T., Salmenperä, H., Dahlbo, H. 2016. *Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet*. CLIC Innovation Raportti nro D4.1–3.
- Ferreira A. R. V., Alves V. D., Coelho I. M. 2016. *Polysaccharide-based membranes in food packaging applications*. Membranes 6(2): 22. <https://doi.org/10.3390/membranes6020022>
- Fortum. 2022. Kysymyksiä ja vastauksia muovin kierrätyksestä. Viitattu 4.4.2022. Saatavissa <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/kierratys/muovit/circo/kysymyksia-ja-vastauksia-muovin-kierratyksesta>

- Grigorescu, R. M., Grigore, M. E., Iancu, L., Ghioca, P. Ion, R. 2019. *Waste electrical and electronic equipment: A review on the identification methods for polymeric materials*. Recycling 4(3): 32. <https://doi.org/10.3390/recycling4030032>
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P. 2018. *An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling*. Journal of Hazardous Materials 344/2018, 179–199.
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. 2009. *Plastics recycling: Challenges and opportunities*. Philosophical Transactions of the Royal Society 364/2009, 2115–2126.
- Huber, N., Eschlböck-Fuchs, S., Scherndl, H., Freimund, A., Heitz, J., Pedarnig, J. D. 2014. *In-line measurements of chlorine containing polymers in an industrial waste sorting plant by laser-induced breakdown spectroscopy*. Applied Surface Science 302/2014, 280–285.
- Hubo, S., Ragaert, K., Leite, L., Martins, C. 2014. *Evaluation of post-industrial and post-consumer polyolefin-based polymer waste streams for injection moulding*. 6<sup>th</sup> polymer and moulds innovation conference.
- Khalaj, M., Ahmadi, H., Lesankhosh, R., Khalaj, G. 2016. *Study of physical and mechanical properties of polypropylene nanocomposites for food packaging application: Nano-clay modified with iron nonaparticles*. Trends in Food Science & Technology 51/2016, 41–48.
- Khan, S. M., Gull, N., Khan, R. U., Butt, M. T. Z. 2022. *Polyvinylchloride (PVC): Structure and Properties Relationship*. Polyvinylchloride-based Blends: Preparation, characterization and applications, 19–47.
- Kumar, S., Panda, A. K., Singh, R. K. 2011. *A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel*. Resources, Conservation and Recycling 55/2011, 893–910.
- Laermann, M. 2021. *Chemical recycling of plastic: Waste no more?* Euractiv 16.9.2021.
- Vitattu 2.4.2022. Saatavissa <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/opinion/chemical-recycling-of-plastic-waste-no-more/>
- Liu, K., Tian, D., Li, C., Li, Y., Yang, G., Ding, Y. 2019. *A review of laser-induced breakdown spectroscopy for plastic analysis*. Trends in Analytical Chemistry 110/2019, 327–334.

- Lundelin, K. 2020. *Tällainen on muovin matka uusi muoviksi – Kaikki Suomen kotitalouksien muovijäte käsitellään yhdessä tehtaassa Riihimäellä*. Seura 25.2.2020. Viitattu 9.3.2022. Saatavissa <https://seura.fi/asiat/ajankohtaista/miten-muovi-muuttuu-uusi-muoviksi-fortumin-muovinjaloistamolla/>
- Miettinen, L. 2021. *Suurin osa kodeissa lajitellusta muovijätteestä päätyi poltettavaksi – MOT selvitti, kuinka hyvin muovin kierrätys onnistuu*. YLE 5.4.2021. Viitattu 9.3.2022. Saatavissa <https://yle.fi/uutiset/3-11865230>
- Muovien kierrätys 2022. *Kemiallinen kierrätys*. Viitattu 16.4.2022. Saatavissa <https://muovienkierratys.wordpress.com/kemiallinen-kierratys/>
- Niiranen, P. 2021. *Muovin kierrätys nousi ennätystasolle – tutkijat varoittavat käyttämästä kierrätysmuovia elintarvikepakkauksissa, Fortumin mukaan huoli on turha*. YLE 30.6.2021. Viitattu 9.3.2022. Saatavissa <https://yle.fi/uutiset/3-11996652>
- Pilevar, Z., Bahrami, A., Beikzadeh, S., Hosseini, H., Jafari, S. M. 2019. *Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into foods: Characterization and safety evaluation*. Trends in Food Science & Technology 91/2019, 248–261.
- PlasticsEurope 2019. *Plastics – the facts 2019: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Viitattu 12.3.2019.
- Pongstabodee, S., Kunachitpimol, N., Damronglerd, S. 2008. *Combination of three-stage sink-float method and selective flotation technique for separation of mixed post-consumer plastic waste*. Waste Management 28/2008, 475–483
- Qureshi, M. S., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., Minkkinen, H., Pohjakallio, M., Laine-Ylijoki, J. 2020. *Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 152/2020.
- Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. 2017. *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Waste Management 69/2017, 24–58.
- Rahimi, A., García, J. M. 2017. *Chemical recycling of waste plastics for new materials production*. Nature Reviews Chemistry 1/2017: 46.
- Roschier, S., Mikkola, J., Värre, U., Saario, M. 2019. *Muovijätteen kemialliset hyödyntämiskäytännöt ja -markkinat kierrätystaloudessa*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2019:64.

- Rubel, H., Follette, C., Meyer zum Felde, A., Appathurai, S., Díaz, M. B., Jung, U. 2019. *A circular solution to plastic waste*. Boston Consulting Group. Viitattu 3.4.2022. Saatavissa <https://www.bcg.com/publications/2019/plastic-waste-circular-solution>
- Sawant, S. Y., Somani, R. S., Panda, A. B., Bajaj, H. C. 2013. *Utilization of plastic wastes for synthesis of carbon microspheres and their use as a template for nanocrystalline copper(II) oxide hollow spheres*. ACS Sustainable Chemistry and Engineering 1/2013, 1390–1397.
- Selke, S. E. M., Culter, J. D. 2016. *Plastics packaging: Properties, processing, applications, and regulations*. 3. uudistettu painos. Munich: Carl Hanser Verlag.
- Shameem, K. M. M., Choudhari, K. S., Bankapur, A., Kulkarni, S. D., Unnikrishnan, V. K., George, S. D., Kartha, V. B., Santhosh, C. 2017. *A hybrid LIBS–Raman system combined with chemometrics: an efficient tool for plastic identification and sorting*. Analytical and Bioanalytical Chemistry 409/2017, 3299–3308.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., Fraternali, F. 2017. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. Composites Part B 115/2017, 409–422.
- Statista 2022. *Distribution of municipal solid waste (MSW) stream generated in the United States in 2018, by material*. Viitattu 27.3.2022. Saatavissa <https://www.statista.com/statistics/503940/percentage-of-us-municipal-solid-waste-generated-by-material/>
- Suomen Uusiomuovi Oy 2022a. *Muovien materiaalimerkit*. Viitattu 31.1.2022. Saatavissa [https://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus\\_kiertaa/muovien\\_kierratys/muovien\\_materiaalimerkit/](https://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus_kiertaa/muovien_kierratys/muovien_materiaalimerkit/)
- Suomen Uusiomuovi Oy 2022b. *Usein kysytyä kotitalouksien muovipakkausten keräyksestä ja kierrätyksestä*. Viitattu 11.3.2021. Saatavissa [https://www.uusiomuovi.fi/fin/kuluttajalle/usein\\_kysyttya\\_kierratyksesta/](https://www.uusiomuovi.fi/fin/kuluttajalle/usein_kysyttya_kierratyksesta/)
- Talarico, G., De Rosa, C., Auriemma, F. 2019. *Tacticity, regio and stereoregularity*. Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites, 1–35.



United States Plastic Corporation 2019. *What's the difference between LDPE, LLDPE, MDPE, HDPE, XLPE and UHMW sheeting?* Viitattu 27.3.2021. Saatavissa <https://www.usplastic.com/knowledgebase/article.aspx?contentkey=508>

Vallejo-Montesinos, J., Muñoz, U. M., Gonzalez-Calderon, J. A. 2016. *Mechanical properties, crystallization and degradation of polypropylene due to nucleating agents, fillers and additives*. Polypropylene: Properties, uses, and benefits, 83–139.

Velásquez, E., Correa, M. G., Garrido, L., Guarda, A., Galotto, M. J., Dicastillo, C. L. 2021. *Food packaging plastics: Identification and recycling*. Recent Developments in Plastic Recycling, 311–343.

Xiao, C., Allen, L., Biddle, M. B., Fisher, M. M. 2003. *Electrostatic separation and recovery of mixed plastics*. Materials Science.