

Mira Kukkasniemi

MUOVIEEN KEMIALLISEN KIERRÄTYKSEN PILOTTILAITOKSET

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Mira Kukkasniemi: Muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitokset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, materiaalitekniikka
Huhtikuu 2023

Muovien kiertotaloutta halutaan tehostaa, mihin keinoina on muovimateriaalien uudelleen hyödyntäminen sekä jätteen määrän vähentäminen, jotka voidaan saavuttaa kierrättämällä. Nykyään muovijätteen kierrätykseen käytetään pääosin vain mekaanista kierrätystä, mutta sillä ei kuitenkaan pystytä kierrättämään kaikkea muovijätettä, kuten kertamuoveja tai monikerrospakkauksia. Tähän haetaan ratkaisua kemiallisesta kierrätyksestä, jota pyritään aktiivisesti kehittämään. Työn tavoitteena on tutkia, millä tasolla muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitostoiminta on. Tavoitteena on myös selvittää, mitä kemiallisen kierrätyksen menetelmiä pilottilaitoksissa hyödynnetään ja mitä yleisiä haasteita kyseisiin menetelmiin liittyy. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Työn alussa esitetään lyhyesti muovien tuotantomääriä Euroopassa ja maailmalla sekä muovien kierrätysastetta Euroopassa. Lisäksi esitellään muovien kierrätysmenetelmiä, joista mekaanisesta kierrätyksestä kerrotaan lyhyesti ja kemiallisesta kierrätyksestä kattavammin. Tämän jälkeen työssä esitetään pilottilaitoksien käyttötarkoitus uuden teknologian kehittämisessä. Lisäksi tarkastellaan esimerkkejä olemassa olevista muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksista. Lopuksi tarkastellaan pilottilaitoksissa hyödynnettyjen menetelmien yleisiä haasteita.

Tutkimuksen perusteella havaitaan pyrolyysin olevan pilottilaitoksissa eniten hyödynnetty kemiallisen kierrätyksen menetelmä. Erilaiset versiot pyrolyysistä ovat kuitenkin myös potentiaalisia vaihtoehtoja. Etenkin katalyyttinen krakkaus, jossa katalyytin avulla prosessilämpötilaa saadaan laskettua. Lisäksi tutkimus osoittaa, että kemolyysimenetelmiä sovelletaan erityisesti polyeteenitereftalaatille (PET). Tutkimuksessa selviää, että muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitostoiminta on aktiivisella tasolla, sillä useampi toimija on pilotointivaiheessa oman teknologiansa kehityksen kanssa. Lisäksi moni näistä toimijoista on jo ilmoittanut suunnitelmistaan skaalata teknologiaansa eteenpäin suurempaan laitokseen. Kemiallisen kierrätyksen menetelmissä yleisenä haasteena havaitaan olevan energiantensiivisyys, sillä niiden prosessilämpötilat ovat korkeita. Tämän vuoksi kemiallisen kierrätyksen menetelmistä tulisi tehdä kattavia elinkaariarvioita, jotta saadaan kokonaisvaltainen ymmärrys menetelmien elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista.

Avainsanat: muovit, polymeerit, kemiallinen kierrätys, pilottilaitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MUOVIEEN KIIERRÄTYS	2
2.1 Muovien kierrätysaste ja -tavoitteet	2
2.2 Muovien kierrätysmenetelmät	3
3. KEMIALLISEN KIIERRÄTYKSEN MENETELMÄT	7
3.1 Pyrolyysimenetelmät	8
3.2 Katalyyttinen krakkaus ja vetykrakkaus	9
3.3 Kaasutusmenetelmät	10
3.4 Höyryreformointi pyrolyysin yhteydessä	11
3.5 Kemolyysimenetelmät	11
4. PILOTTILAITOKSET	13
4.1 Pilottilaitoksien tarkoitus ja tavoitteet	13
4.2 Menetelmien valmiustasot ja pilottilaitokset	14
4.3 Pilottilaitoksissa käytettyjen menetelmien haasteet	21
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	25
LÄHTEET	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BTX	Bentseeni, tolueeni ja ksyleeni -seos
CMAP	engl. Continuous Microwave Assisted Pyrolysis, jatkuva mikroaalto-avusteinen pyrolyysi
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
CH ₄	Metaani
H ₂	Vetykaasu
H ₂ S	Rikkivety
HCl	Vetykloridi
LCA	Elinkaariarviointi
NH ₃	Ammoniakki
NO _x	Typpimonoksidi ja typpidioksidi
PA	Polyamidi
PA6	Polyamidi 6
PC	Polykarbonaatti
PE	Polyeteeni
PE-HD	Suurtiheyspolyeteeni
PE-LD	Pientiheyspolyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
PTFE	Polytetrafluorieteeni
PU	Polyuretaani
PVC	Polyvinyylikloridi
rPET	Kierrätetty PET
TPA	Tereftaalihappo

1. JOHDANTO

Muovien kierrätyksestä on tullut ajankohtainen aihe ympäristötietoisuuden kasvaessa ja nykyään sitä pyritäänkin tehostamaan kiertotalouden edistämiseksi. Erilaisia muoveja hyödynnetään laajasti ja esimerkiksi vuonna 2021 muoveja tuotettiin Euroopassa 57,2 miljoonaa tonnia, josta noin 87,6 % oli fossiilipohjaisia [1]. Samana vuonna muovijätteen kierrätysaste puolestaan oli noin 32,5 % [2]. Muovien kierrätyksellä voidaan säästää luonnonvaroja sekä suojella ympäristöä. Lisäksi kierrätyksen avulla voidaan vähentää muovien valmistukseen tarvittavien fossiilipohjaisten raaka-aineiden määrää. [3] Kierrätyksen tehostamiseksi mekaaninen kierrätys ei yksinään riitä, sillä menetelmässä on omat haasteensa ja siksi myös kemiallista kierrätystä tarvitaan. Kemiallista kierrätystä ei kuitenkaan hyödynnetä vielä laajasti teollisessa mittakaavassa ja eri kemiallisen kierrätyksen menetelmiin liittyy erinäisiä haasteita. Kiinnostus kemiallista kierrätystä kohtaan on kuitenkin jo nousussa. Eri toimijat ympäri maailmaa pilotoivat omia kemiallisen kierrätyksen teknologioitaan aikomuksenaan skaalata teknologiansa kaupalliseen toimintaan. Pilottilaitoksia tarvitaan uuden teknologian kehityksessä siirryttäessä laboratoriosta kohti isomman mittakaavan toimintaa. Niiden avulla voidaan esimerkiksi tunnistaa teknisiä haasteita ja arvioida toiminnan kannattavuutta. Lisäksi voidaan optimoida prosessia, käytettävää syötettä ja saatuja lopputuotteita.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on selvittää, millä tasolla muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitostoiminta on. Lisäksi tavoitteena on selvittää, mitä menetelmiä niissä hyödynnetään. Tarkoitus on esittää esimerkkejä erilaisista muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksista. Työn tavoitteena on myös kuvata, millaisia yleisiä haasteita liittyy menetelmiin, joita esimerkkipilottilaitoksissa on hyödynnetty.

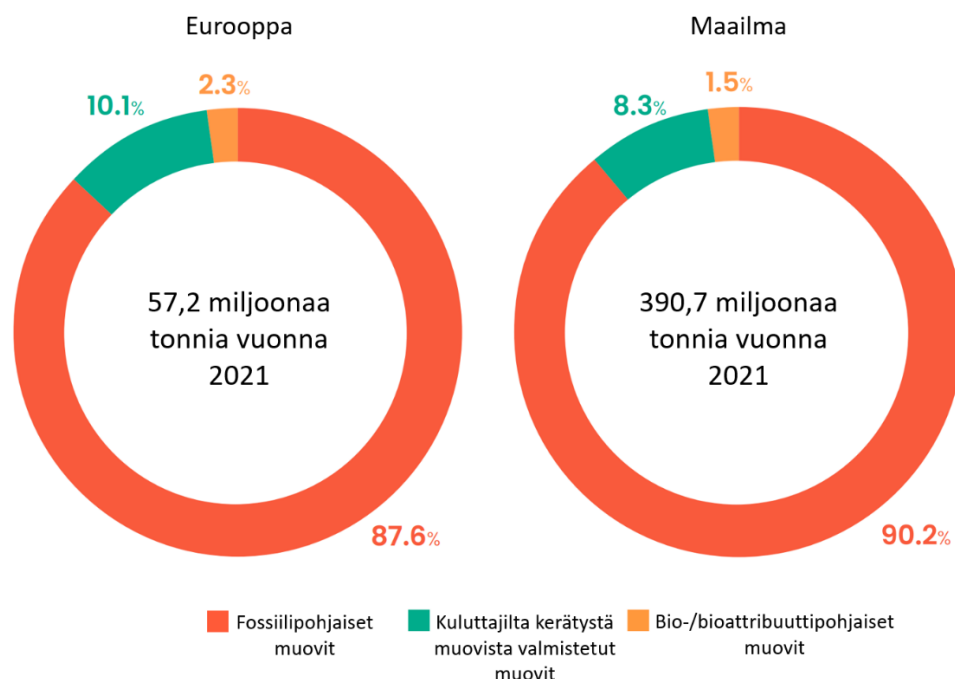
Työssä käsitellään ensiksi lyhyesti muovien tuotantomääriä, kierrätysasteita ja Euroopan unionin asettamia tavoitteita muovipakkausjätteen kierrätysasteen nostamiseksi. Sen jälkeen tarkastellaan yleisellä tasolla mekaanista kierrätystä ja kattavammin kemiallista kierrätystä. Tämän jälkeen työssä siirrytään pilottilaitoksien tarkasteluun ja aluksi esitetään, mitä pilottilaitokset ovat ja mihin niitä tarvitaan. Sen jälkeen käsitellään esimerkkejä erilaisista olemassa olevista kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksista. Tämän jälkeen tarkastellaan pilottilaitoksissa käytettyjen menetelmien yleisiä haasteita ja lopuksi esitetään johtopäätökset.

2. MUOVIEIN KIERRÄTYS

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti muovien tuotantomääriä maailmalla ja Euroopassa sekä kierrätysastetta Euroopassa. Tässä työssä Euroopan osalta esitellyt tiedot ovat kerätty EU-maista, Norjasta, Sveitsistä ja Iso-Britanniasta. Lisäksi luvussa kerrotaan Euroopan unionin tavoitteista nostaa muovipakkausjätteen kierrätysastetta. Luvussa kerrotaan myös, miten muovien kierrätystä voidaan jaotella sekä esitellään lyhyesti pääperiaatteet mekaanisesta ja kemiallisesta kierrätyksestä.

2.1 Muovien kierrätysaste ja -tavoitteet

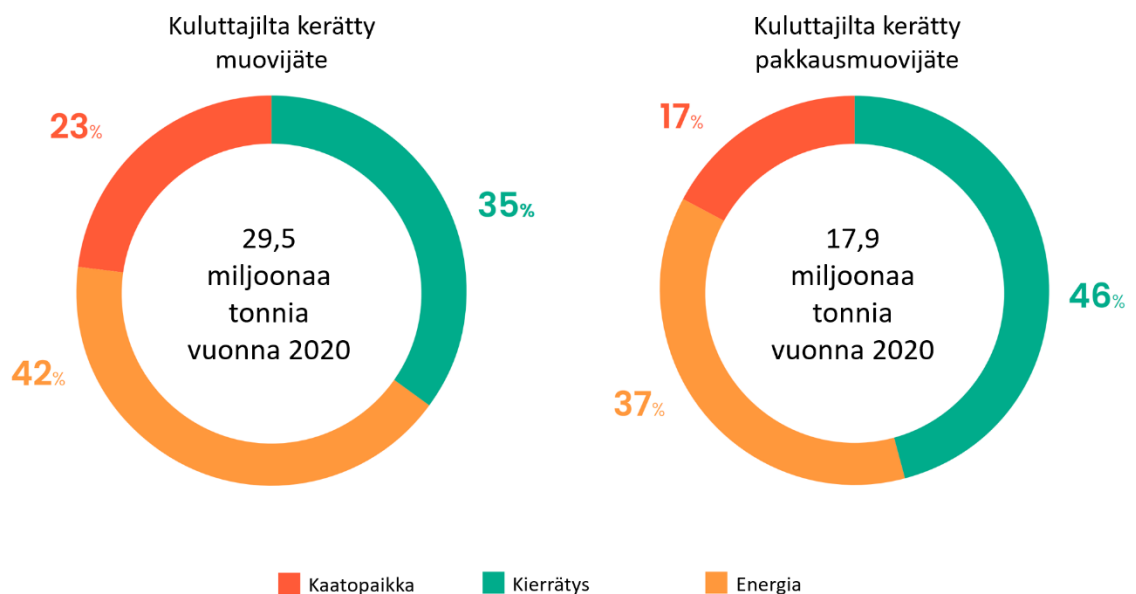
Vuonna 2021 Euroopassa tuotettiin muovia arviolta noin 57,2 miljoonaa tonnia. Euroopan muovin tuotannosta arvioitiin olevan fossiilipohjaisia muoveja 87,6 %, kuluttajilta kerätystä kierrätysmuovista valmistettuja muoveja 10,1 % ja biopohjaisia sekä bioattribuuttipohjaisia muoveja noin 2,3 %. [1] Bioattribuuttipohjaisissa muoveissa osa fossiilisista raaka-aineista on korvattu uusiutuvilla raaka-aineilla tai bioraaka-aineilla [4]. Kuvassa 1 esitetään vuonna 2021 tuotetun muovin jakauma Euroopassa ja maailmalla.



Kuva 1. Vuonna 2021 tuotetun muovin jakauma Euroopassa ja maailmalla, muokattu lähteestä [1].

Maailmalla muovia tuotettiin vuonna 2021 yhteensä arviolta noin 390,7 miljoonaa tonnia. Tästä arvioitiin olevan fossiilipohjaisia muoveja 90,2 %, kuluttajilta kerätystä kierrätysmuovista valmistettuja muoveja 8,3 % ja biopohjaisia sekä bioattribuuttipohjaisia muoveja 1,5 %. [1]

Euroopan unionin huhtikuussa vuonna 2018 hyväksymässä jätehuollon kiertotalouspaketissa on asetettu tavoitteeksi, että vuoteen 2025 mennessä muovipakkausjätteen kierrätysaste olisi 50 % ja vuoteen 2030 mennessä 55 % [5]. Vuonna 2020 kuluttajilta kerättiin Euroopassa muovijätettä arviolta 29,5 miljoonaa tonnia. Pakkausmuovijätettä puolestaan kerättiin noin 17,9 miljoonaa tonnia. (Kuva 2) [1]

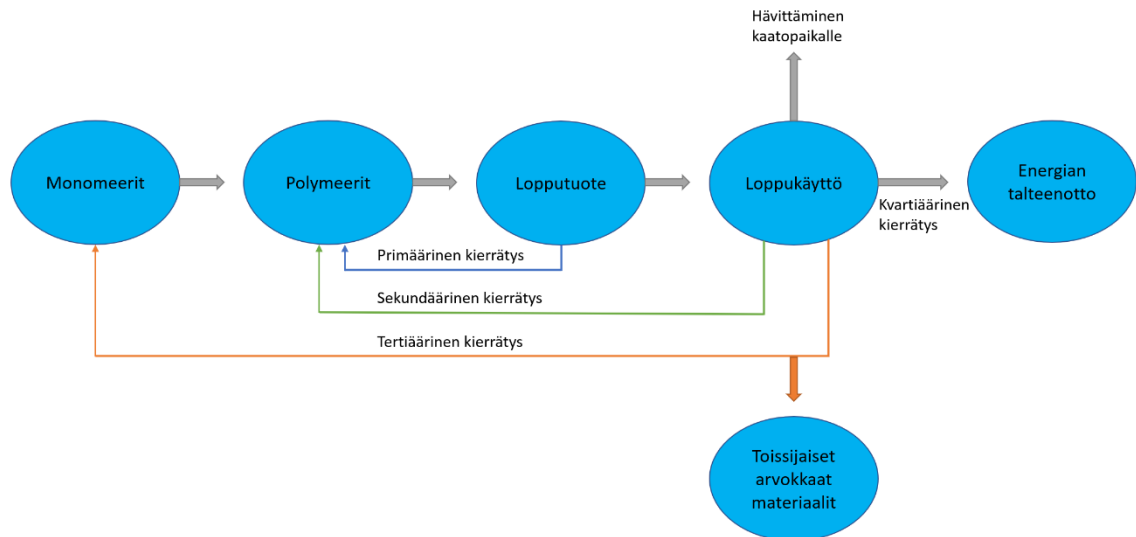


Kuva 2. Vuonna 2020 Euroopassa kuluttajilta kerätty muovijäte ja pakkausmuovijäte, muokattu lähteestä [1].

Vuonna 2020 Euroopassa kuluttajilta kerätystä muovijätteestä kierrätykseen päätyi 35 %, energiakäyttöön 42 % ja kaatopaikalle 23 %. Kun tarkastelu rajattiin pelkästään kuluttajilta kerättyihin pakkausmuoveihin, kierrätykseen päätyi 46 %, energiakäyttöön 37 % ja kaatopaikalle 17 %. [1]

2.2 Muovien kierrätysmenetelmät

Muovien kierrätykseen on olemassa eri menetelmiä, joita voidaan jaotella neljään eri kategoriaan. Jaottelu voidaan tehdä primäärisiin, sekundäärisiin, tertiäärisiin ja kvartiäärisiin menetelmiin. [6, s. 57–60] Kuvassa 3 esitetään muovien kierrätysmenetelmät sekä lopputuotteet, joita eri menetelmistä saadaan.



Kuva 3. Muovien kierrätysmenetelmät, muokattu lähteestä [6, s. 57].

Primäärisellä kierrätyksellä tarkoitetaan tuotantolaitoksen sisällä tapahtuvaa kierrätystä. Siinä tuotannosta syntyvä prosessijäte kierrätetään sellaisenaan takaisin raaka-aineeksi. Esimerkiksi ruiskuvalumenetelmässä syntyvä käynnistysjäte sekä rejektiosat voidaan rouhia ja käyttää suoraan uudelleen raaka-aineena. [7, s. 45] Sekundäärisellä kierrätyksellä tarkoitetaan mekaanista kierrätystä, jossa muovijätteestä tehdään muokkaamalla uutta raaka-ainetta, jota voidaan käyttää muiden polymeerituotteiden valmistukseen [6, s. 58; 7, s. 45]. Tertiäärinen kierrätys on puolestaan kemiallista kierrätystä. Siinä muovijäte muutetaan joko takaisin monomeereiksi tai oligomeereiksi hajottamalla polymeeriketjuja pienempiin osiin, tai polymeerit hajotetaan takaisin hiilivedyiksi. Hiilivedyt voidaan hyödyntää monomeerien tai muiden hiilivetypohjaisten tuotteiden, kuten vahojen ja parafiinien, valmistukseen. [7, s. 112] Kvartiäärinen menetelmä tarkoittaa, että muovijäte hyödynnetään energiaksi [6, s. 60]. Tätä ei kuitenkaan lasketa jätelain määrittämäksi kierrättämiseksi [8, s. 7]. Kuvassa 4 esitetään yleisellä tasolla muovituotteiden jalostusketju.



Kuva 4. Muovituotteiden jalostusketju, muokattu lähteestä [9].

Muovin kierrätys voidaan jaotella suljetun kierron sekä avoimen kierron kierrätykseksi sen mukaan, mitä tuotteita sekundäärisestä raaka-aineesta tehdään. Suljetussa kierrossa kierrätetystä muovista valmistetaan samoja tuotteita kuin mistä ne on otettu talteen. Uuden tuotteen valmistuksessa voidaan käyttää joko pelkästään kierrätettyä muovia tai sitä voidaan sekoittaa vastaavan neitseellisen raaka-aineen kanssa. Suljettua kiertoa hyödynnetään esimerkiksi PET-pakkauksien valmistuksessa. Avoimessa kierrossa kierrätetty materiaali hyödynnetään jonkin eri tuotteen valmistukseen kuin mistä se on otettu talteen. Tämä ei kuitenkaan välttämättä tarkoita, että avoimen kierron kautta saadun tuotteen arvo olisi alhaisempi kuin tuotteen, josta kierrätysmateriaali on kerätty. Tästä toimivat esimerkkinä PET-pulloista valmistetut tekstiilikuidut. Näiden lisäksi jaotella voidaan tehdä termien ”upcycling” ja ”downcycling” mukaan, joista ensimmäinen tarkoittaa, että kierrätetyn materiaalin laatu tai arvo on alkuperäistä korkeampi, ja jälkimmäinen tarkoittaa, että laatu tai arvo on alkuperäistä heikompi. [3]

Mekaanista kierrätystä varten muovijätteet lajitellaan, puhdistetaan, kuivataan sekä niiden kokoa pienennetään [6, s. 58]. Lajittelua voidaan tehdä muodon, koon, tiheyden, värin tai kemiallisen koostumuksen mukaan. Puhdistuksessa poistetaan epäpuhtaudet, jotka ovat usein orgaanista ainesta. Muovijätettä pienennetään rouhimalla jäte hiutaleiksi. Hiutaleet voidaan vaihtoehtoisesti myös uudelleen käsitellä granulaateiksi. Jos muovijätteen prosessointia ei tehdä samassa paikassa kuin lajittelua, jäte voidaan paalata kuljetusta varten. [3]

Mekaanisessa kierrätyksessä peruspolymeerien kemiallinen rakenne pysyy samanlaisena. Mekaanisen kierrätyksen haasteina ovat muun muassa muovijätteen heterogeenisyys sekä muovin ominaisuuksien heikentyminen jokaisessa kierrätysyhtäessä. [6, s. 58] Polymeerien ominaisuudet muuttuvat uudelleenkäsittelyn aikana lämmön, mekaanisen rasituksen sekä hapettumisen vuoksi [10]. Merkittävin syy ominaisuuksien heikentymiselle on lämpömekaaninen hajoaminen uudelleenprosessoinnin aikana. Lämpömekaaninen hajoaminen aiheutuu lämmön ja mekaanisen leikkausvoiman yhdistelmästä. Synteettisissä polymeereissä yleisimmät mekanismit lämpömekaanisessa hajoamisessa ovat polymeeriketjujen katkeaminen ja haarautuminen. Polymeerityypillä on vaikutusta siihen, kummasta mekanismista tulee hallitseva. Polymeeriketjun katkeaminen pienentää polymeerin molekyyliämassaa, mikä heikentää sen ominaisuuksia. Polymeeriketjun haarautumisen seurauksena tapahtuu ristosilloittumista, mikä puolestaan nostaa molekyyliämassaa. Lämpömekaanista hajoamista tapahtuu mekaanisen kierrätyksen lisäksi myös primäärisessä kierrätyksessä. Kuluttajilta kerätty muovijäte voi myös altistua erilaisille ympäristötekijöille, kuten lämmölle, hapelle, valolle ja kosteudelle, jotka aiheut-

tavat hajoamista. Tämä kuitenkin vaatii pitkäaikaisen altistumisen näille hajottaville tekijöille. [3] Lisäksi haasteena on, että mekaaninen kierrätys soveltuu vain kestumuoveille, koska ainoastaan niitä voidaan uudelleen sulattaa ja prosessoida lopputuotteiksi [6, s. 58].

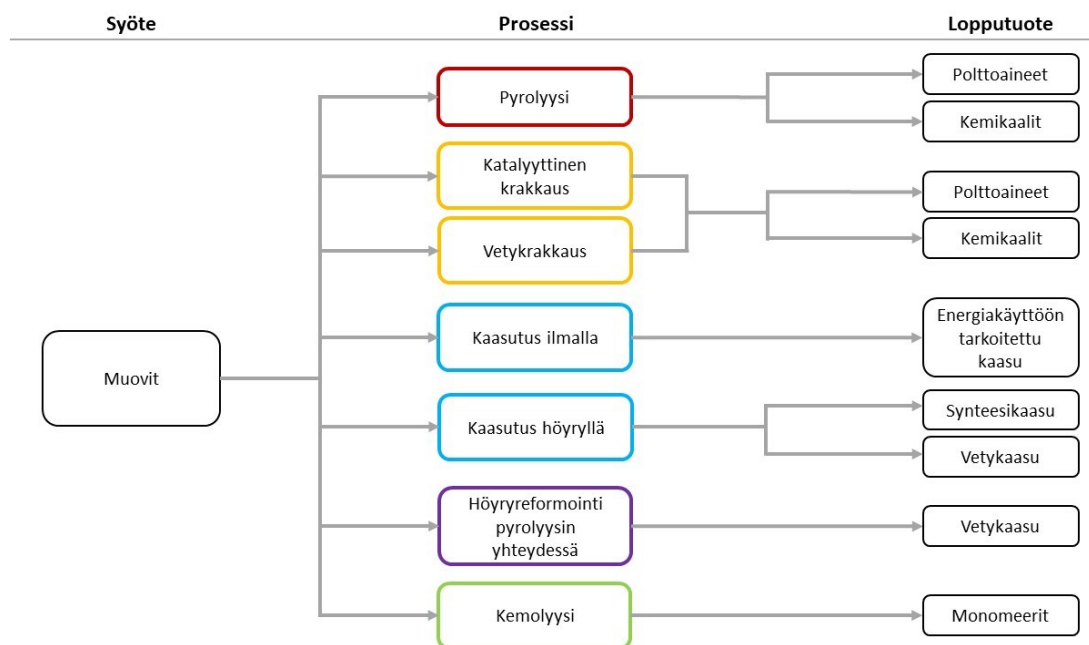
Kemiallisen kierrätyksen nimitys tulee siitä, että polymeerien kemiallinen rakenne muuttuu, kun muovijäte muunnetaan pienemmiksi molekyyleiksi. Lopputuotteina saadaan monomeerejä, oligomeerejä tai muita hiilivety-yhdisteiden seoksia. Pääasiallisesti lopputuotteet ovat nesteinä tai kaasuina. [6, s. 59] Saatavaan lopputuotteeseen vaikuttaa syötteenä käytetty muovilaatu. Polyestereistä ja polyamideista (PA) saadaan monomeerejä. Polyolefiineistä saadaan joko hiilivetykomponentteja tai oligomeerejä ja muita toissijaisia arvomateriaaleja. [11] Näitä voidaan hyödyntää uusien polymeerien, jalostettujen kemikaalien tai polttoaineiden valmistukseen [12].

Kemiallinen kierrätys sisältää monia eri menetelmiä, joilla on omia rajoituksiaan sen suhteen, mille muovilaaduille ne soveltuvat. Muovijäte tulee lajitella ja esikäsitellä myös ennen kemiallista kierrätystä. Lajittelussa esimerkiksi poistetaan raskasmetalleja, täyteaineita ja halogeeniyhdisteitä sisältävät jakeet. [7, s. 112] Esimerkiksi pyrolyysi, joka on yksi kemiallisen kierrätyksen menetelmistä, alkaa muovijätteen puhdistuksella, kuivauksella sekä muovijätteen koon pienentämisellä [3].

Kierrätysmenetelmän prosessilämpötilalla on erityisesti merkitystä, kun käsitellään sekamuovijätettä. Polymeereillä on eri sulamislämpötiloja ja ne tarvitsevat hieman eri olosuhteita, jotta ne voivat hajota monomeereiksi. [13] Suositeltu prosessilämpötila määräytyy sen komponentin mukaan, jolla on korkein sulamislämpötila. Tämän seurauksena matalamman sulamislämpötilan omaavat komponentit voivat ylikuumentua ja sen vuoksi hajota. [3] Korkeammilla lämpötiloilla kuitenkin saavutetaan kattavampi polymeerien hajoaminen sekä parempi puhtausaste käsitellylle materiaalille. Toisaalta korkeat lämpötilat vaativat kuitenkin myös enemmän energiaa ja aiheuttavat enemmän kustannuksia. Alhaisempi prosessilämpötila on herkempi muovijätteen epäpuhtauksille ja vaatii tarkemman lajittelun ennen kemiallista kierrätystä. Tarkempi lajittelu voi kuitenkin aiheuttaa lisäkustannuksia. [13]

3. KEMIALLISEN KIERRÄTYKSEN MENETELMÄT

Tässä luvussa esitetään muovien kemiallisen kierrätyksen menetelmiä. Muovien kemiallinen kierrätys voidaan jakaa kemiallisiin ja termokemiallisiin prosesseihin. Termokemiallisiin prosesseihin kuuluvat pyrolyysimenetelmät, katalyyttinen krakkaus, vetykrakkaus, kaasutusmenetelmät sekä höyryreformointi pyrolyysin yhteydessä. Kemiallisiin prosesseihin puolestaan kuuluvat kemialliset depolymerointireaktiot eli kemolyysimenetelmät. [11] Kuvassa 5 esitetään muovien kemiallisen kierrätyksen menetelmät ja niistä saatavat lopputuotteet yleisellä tasolla.



Kuva 5. Muovien kemiallisen kierrätyksen menetelmät ja niiden lopputuotteet, muokattu lähteistä [9,12].

Termokemialliset menetelmät soveltuvat heterogeenisen muovijätteen eli useampaa muovilaatua sisältävän muovijätteen kierrättämiseen. Kemolyysimenetelmät puolestaan soveltuvat homogeeniselle eli yhtä muovilaatua sisältävälle muovijätteelle. [13] Kemiallisella kierrätyksellä polymeereistä saadaan kemikaalien, monomeerien ja polttoaineiden raaka-aineita [11].

3.1 Pyrolyysimenetelmät

Terminen krakkaus eli perinteinen pyrolyysi on yksi kemiallisen kierrätyksen menetelmistä. Prosessissa pitkäketjuiset polymeerimolekyylit hajotetaan lyhytketjuisiksi komponenteiksi hapettomissa olosuhteissa ja korotetussa lämpötilassa. [14] Perinteinen pyrolyysi on tekniikaltaan yksinkertainen [13] ja sen prosessilämpötila on 300–900 °C [15]. Pyrolyysin aikana tapahtuvat reaktiot ovat kuitenkin monimutkaisia ja lisäksi prosessi vaatii paljon energiaa korkeiden lämpötilojen vuoksi. Prosessista voi tulla haastava, jos muoveihin on sekoittunut epäpuhtauksia. [13] Pyrolyysin päätuotteena saadaan nestemäistä öljyä ja sivutuotteina kaasuja, hiiltä, vahaa ja vetykloridia (HCl) [16]. Kaasuseoksessa voi olla esimerkiksi vetykaasua (H₂), metaania (CH₄), hiilimonoksidia (CO) tai hiilidioksidia (CO₂) [12]. Syntyvä vaha koostuu muuttumattomista ja toisistaan poikkeavista tyydyttyneistä sekä tyydyttymättömistä hiilivedyistä [16]. Prosessin lopputuotteita voidaan optimoida vaihtelemalla prosessiparametrejä, kuten lämpötilaa, painetta, käsittelyaikaa, kuumennusnopeutta sekä katalyyttien käyttöä [13]. Lisäksi lopputuotteiden ominaisuuksiin sekä saataviin osuuksiin vaikuttaa syötteenä käytettävä muovilaatu [16]. Perinteisellä pyrolyysillä voidaan käsitellä sellaista muovijätettä, jota ei pystytä mekaanisesti kierrättämään. Tällaisia muovijätteitä ovat esimerkiksi monikerroksiset muovipakkaukset. [3,13]

Plasmapyrolyysissä muovijäte hajotetaan monomeereiksi erittäin korkeissa lämpötiloissa [13]. Prosessissa muovijätteen kuumennus tapahtuu plasmapolttimilla [17] ja prosessilämpötilat ovat 1730–9730 °C [13]. Prosessiaika on hyvin lyhyt ja se kestää 0,01–0,5 sekuntia riippuen prosessilämpötilasta sekä muovijätetyypistä. Plasmapyrolyysin lopputuotteena saadaan synteesikaasua. [13] Se koostuu CO:sta ja H₂:sta. [3,9]. Synteesikaasua käytetään pääasiassa kemianteollisuudessa yhtenä raaka-aineena erilaisten tuotteiden tuotantoon [9]. Perinteiseen pyrolyysiin verrattuna menetelmällä saavutetaan esimerkiksi kattavammin polymeerien hajoaminen. Menetelmällä vältetään myrkylliset yhdisteet synteesikaasussa, koska prosessilämpötila on niin korkea, että yhdisteet hajoavat. Muissa kemiallisen kierrätyksen menetelmissä yleinen ongelma on vapaan kloorin muodostuminen vetykloridista, mutta plasmapyrolyysissä korkea lämpötila rajoittaa sen syntymistä. Plasmapyrolyysi on lupaava menetelmä kaasumaisten polttoaineiden tai kemikaalien tuotantotarkoituksiin ja lisäksi menetelmällä voidaan käsitellä seka-muovijätettä. [13]

Mikroaaltoavusteisessa pyrolyysissä muovijätteeseen sekoitetaan mikroaaltoja hyvin absorboivia aineita esimerkiksi hiiltä. Tämän avulla saadaan parannettua energian absorboitumista muovijätteeseen sekä nopeutettua energian muuntumista lämmöksi.

[18,19] Mikroaalloista syntyvä lämpö siirtyy muovijätteeseen johtumalla [13]. Prosessilämpötila vaikuttaa saatavaan lopputuotteeseen siten, että lämpötilan ollessa 500–600 °C saadaan lopputuote nestemäisenä ja puolestaan kaasumaisena, kun lämpötila on yli 700 °C [19]. Perinteiseen pyrolyysiin verrattuna kyseisellä menetelmällä saadaan aikaan tasaisempi lämmön jakautuminen, suuremmat lämmitysnopeudet ja prosessia voidaan hallita paremmin. Lisäksi tuotantonopeus on suurempi. [13] Mikroaaltoavusteisen pyrolyysin haasteena on kuitenkin sen riippuvaisuus materiaalin dielektrisestä ominaisuudesta. Muoveilla on huono dielektrisyysvakio eli suhteellinen permittiivisyys. Lämmitystekokkuus voi siis vaihdella materiaalkohtaisesti, mikä on suuri ongelma teollisessa mittakaavassa. [13,18]

3.2 Katalyyttinen krakkaus ja vetykrakkaus

Katalyyttinen krakkaus on pyrolyysimenetelmä, johon on lisätty katalyyttiä, jonka avulla prosessilämpötilaa saadaan laskettua 300–350 °C:seen [13]. Yleisimmin käytetyt katalyyttityypit ovat zeoliitit, FCC ja piidioksidi-alumiinioksidikatalyytit [18]. Katalyytin avulla saadaan siis säästettyä energiaa ja kustannuksia, koska prosessilämpötila saadaan paljon alhaisemmaksi [13,18]. Perinteiseen pyrolyysiin verrattuna suurimmalle osalle muoveista voidaan oikean katalyyttivalinnan avulla saada nostettua lopputuotteissa esiintyvän öljyn osuutta [13]. Katalyyttejä on kahta eri tyyppiä, homogeenisia ja heterogeenisia katalyyttejä. Homogeeninen katalyytti on samassa faasissa tuoteseoksen kanssa eli nesteenä ja heterogeenin eri faasissa eli tässä tapauksessa kiinteänä. Näistä heterogeenisen katalyytin käyttö on yleisempää, koska kiinteä katalyytti pystytään helposti erottamaan nestemäisestä tuoteseoksesta. [18,20] Tämän vuoksi heterogeenisen katalyytin käyttö on taloudellisesti kannattavampaa, koska useimmat katalyytit ovat suhteellisen kalliita ja niitä tulee pystyä käyttämään uudelleen [18].

Vetykrakkauksessa käytetään katalyytin lisäksi vetyä, jonka myötä saatujen lopputuotteiden laatu paranee. Prosessi tapahtuu korotetussa paineessa, vetyatmosfäärissä ja prosessilämpötila on 375–500 °C. [13,21] Kiinteä muovijäte sisältää epäorgaanista ainetta, jonka vuoksi se käsitellään ennen varsinaista vetykrakkausta matalan lämpötilan pyrolyysillä, jossa se saatetaan nestemäiseen muotoon [3,13]. Nesteyttämisen jälkeen saatu seos suodatetaan, jotta siitä saadaan poistettua kiinteä materiaali [3]. Sen jälkeen seokseen lisätään katalyytti, jonka avulla saadaan lisättyä öljyn tuottoa sekä laatua. Vetykrakkauksessa suurimpana ongelmana on vedyn korkea hinta. [3,13]

3.3 Kaasutusmenetelmät

Perinteisessä kaasutusmenetelmässä muovijätteestä tuotetaan kaasuttavan aineen avulla hiilivetyjä sekä synteetikaasua. Menetelmässä pyritään maksimoimaan synteetikaasun tuottaminen. [13] Muovijätteen kaasutuksella voidaan tuottaa energiaa, energiankantajia, kuten vetyä, sekä kemikaaleja synteetikaasusta [13,22]. Prosessilämpötila on 700–1500 °C [12]. Menetelmässä kaasuttavana aineena käytetään pääasiassa ilmaa, höyryä tai plasmaa. Kaasuttava aine vaikuttaa prosessilämpötilaan, saatavan synteetikaasun koostumukseen sekä siihen, mihin saatua synteetikaasua voidaan hyödyntää. [13] Menetelmän haasteena on, että lopputuotteena saatua synteetikaasua ei pystytä vielä hyödyntämään monessa käyttötarkoituksessa [13,23].

Perinteisessä kaasutuksessa muodostuu ei-toivottuina sivutuotteina tervaa ja hiiltä [22]. Näiden määrään vaikuttaa muovijätteen ominaisuudet. Esimerkiksi polystyreeni (PS), polyvinyylikloridi (PVC) ja polyeteenitereftalaatti (PET) muuttuvat nopeissa pyrolyysiolosuhteissa lähes kokonaan haihtuviksi aineiksi, jolloin hiiltä muodostuu vain vähän. Tervaa puolestaan muodostuu enemmän tällaisista muovilaaduista, jotka sisältävät paljon haihtuvia aineita. [13]

Synteetikaasu laimentuu ilmakehän tyypellä, kun kaasutettavana aineena käytetään ilmaa. Tällöin synteetikaasun typpipitoisuus nousee korkeaksi, jonka vuoksi sen lämpöarvo on alhainen. [11] Kun kaasuttavana aineena käytetään ilmaa, prosessi tuottaa suuremman määrän typpiyhdisteitä [3] eli typpimonoksideja ja typpidioksideja, joista käytetään yhteisnimitystä NO_x-päästöt [24]. Nämä päästöt ovat haitallisia ympäristölle, joten niiden syntymistä tulee seurata huolellisesti [3]. Synteetikaasun lämpöarvoa saadaan nostettua, kun käytetään kaasutusaineena hapella rikastettua ilmaa. Käytettäessä puhtaasta happea kaasutusaineena saadaan synteetikaasua, joka ei laimene lähes lainkaan ilmakehän tyypellä. Tällöin synteetikaasun lämpöarvo on korkeampi. Puhtaan hapen käyttäminen on kuitenkin kallista ja vaatisi laajamittaisen yksikön, jossa tulisi saada muovijätettä yli 100 000 tonnia vuodessa, jotta sen käyttö olisi kannattavaa. Typpetöntä synteetikaasua saadaan, kun käytetään kaasutusaineena höyryä. Tällöin synteetikaasulle saadaan hyvä lämpöarvo ja korkea vetypitoisuus. Tällaista synteetikaasua voidaan hyödyntää esimerkiksi uusien muovituotteiden valmistukseen. [13]

Plasmakaasutuksessa syntyvä kaasu on puhtaampaa ja sisältää vähemmän tervaa kuin perinteisellä kaasutuksella muodostuva kaasu [22]. Plasmakaasutuksessa kuumennetaan kaasua plasmapolttimilla erittäin korkeisiin lämpötiloihin, jonka seurauksena kaasu ionisoituu muodostaen plasmaa. Kuumennettava kaasu on tyypillisesti ilmaa ja sen lämpötila voidaan nostaa jopa noin 3900 °C:een. Käsittelemätön muovijäte reagoi syntyvän

plasman kanssa reaktorissa. Prosessi tapahtuu normaalissa ilmanpaineessa ja prosessilämpötila on tyypillisesti 1500–5000 °C, mutta lämpötila voi nousta korkeammaksikin. Prosessiaika on lyhyt ja se kestää joitain minuutteja. Muovijätteen orgaanisesta aineesta muodostuu synteetikaasua ja epäorgaaninen aine muuttuu inertiksi koksiksi. Plasmakaasutus vaatii paljon energiaa, jonka vuoksi menetelmän toimintakustannukset ovat korkeat. [13]

3.4 Höyryreformointi pyrolyysin yhteydessä

Yhtenä vaihtoehtoisena kemiallisen kierrätyksen menetelmänä on höyryreformointi pyrolyysin yhteydessä. Se on kaksivaiheinen prosessi, jossa hyödynnetään ensiksi pyrolyysimenetelmää ja sen jälkeen katalyyttistä reformointia muovien haihtuville aineille. Prosessista saadaan synteesi- ja vetykaasua. [22]

Prosessi tapahtuu kahdessa linjaan yhdistetyssä reaktorissa [13,23]. Prosessissa katalyytti ei pääse deaktivoitumaan muovijätteen epäpuhtauksien vuoksi, koska epäpuhtaudet jäävät pyrolyysireaktoriin [12,22]. Menetelmän etuna kaasutukseen verrattuna on alhaisempi prosessilämpötila, joka laskee tuotantokustannuksia [22,25]. Lisäksi menetelmässä kaasuun ei pääse muodostumaan tervaa reformointikatalyytin ansiosta, kun puolestaan perinteisessä kaasutuksessa tervasta ei päästä täysin eroon [12,22].

3.5 Kemolyysimenetelmät

Kemolyysimenetelmissä homogeeninen muovi muutetaan takaisin monomeereiksi kemiallisen käsittelyn avulla [11,15]. Monomeerejä voidaan hyödyntää uusien polymeerien valmistuksessa. Prosessilämpötila on yleensä 80–300 °C. [11] Prosessissa toimintaparametrit monomeerien kierrätykselle ovat vahvasti riippuvaisia muovilaadusta. Tämän vuoksi on haasteellista kierrättää tehokkaasti monomeerejä muoviseoksista, jotka koostuvat eri muovilajeista. [15] Tästä syystä kemolyysiä ei voida hyödyntää laaja-alaisesti [15], sillä esimerkiksi se ei sovellu tällöin hyvin monikerroskalvojen kierrättämiseen. Zhangin et al. [15] mukaan tutkimukset kemolyysistä keskittyvät pääosin tyydyttymättömiin polyestereihin sekä polyuretaaniin (PU) ja PET:iin. Tyydyttyneiden polymeerien, kuten polyeteenin (PE) ja polypropeenin (PP), kierrätyksestä kemolyysillä ei löydy montaa tutkimusta [15]. Muovijätteestä suunnilleen 80 % on PE:ä ja PP:a [15], joten myös tämän vuoksi kemolyysin käytettävyys on kapea-alaista. Kemolyysissä pääasiallisia depolymeerointimenetelmiä ovat glykolyysi, hydrolyysi, metanolyysi ja alkoholyysi [15]. Näiden lisäksi on myös esimerkiksi aminolyysi sekä ammonolyysi [11].

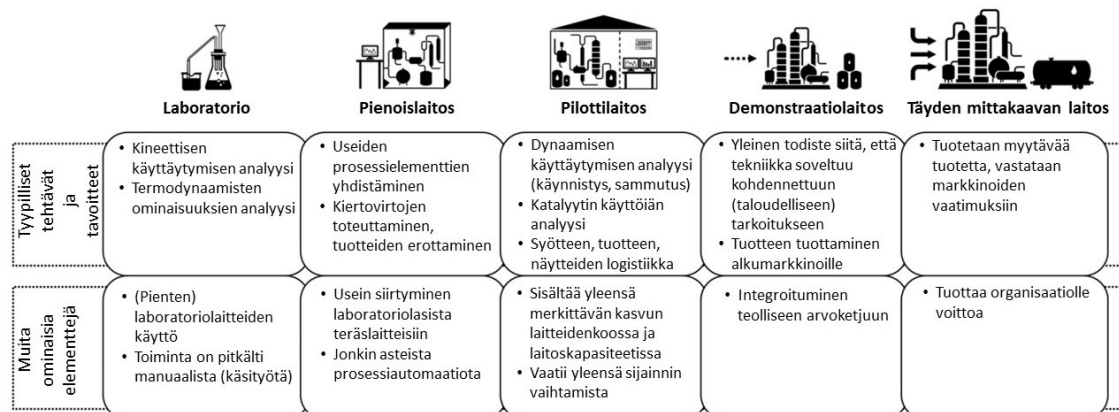
Glykolyysissa depolymerointi tapahtuu glykolin avulla. Glykoli voi olla esimerkiksi etyleeni- tai dietyleeniglykoli. [11,15] Glykolyysi on kaupallisesti käytössä oleva menetelmä PET:n kierrätyksessä [3]. Glykolyysi soveltuu parhaiten polyamidijätteiden kierrätykseen ja sen lisäksi se on laajimmin käytetty kemiallisen kierrätyksen menetelmä PU:n kierrätykseen. Hydrolyysissä depolymerointi tapahtuu emäksisessä, neutraalissa tai happamassa vesiliuoksessa. [15] Menetelmä vaatii korkean paineen ja yli 200 °C prosessilämpötilan. Lisäksi täydellisen depolymerisaation saavuttamiseksi tarvitaan pitkä prosessi-aika. Hydrolyysiä hyödynnetään yleisesti muun muassa PET:lle, PU:lle ja polyamidi 6:lle (PA6). [11] Metanolyysissä käytetään metanolia depolymeroinnissa. Metanolyysiä voidaan käyttää esimerkiksi polykarbonaattien (PC) ja PET:n kierrätykseen. Alkoholyysissä puolestaan depolymerointi tapahtuu alkoholin, kuten etanolin tai butanolin, avulla. Menetelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi PET:n ja PU:n kemialliseen kierrätykseen. [11,15]

4. PILOTTILAITOKSET

Tässä luvussa käsitellään muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksia sekä näissä pilottilaitoksissa käytettyjen menetelmien yleisiä haasteita. Aluksi määritellään tyypilliset vaiheet uuden teknologian kehittämiseksi, mikä auttaa kuvaamaan pilottilaitoksen roolia kyseisessä prosessissa. Lisäksi käsitellään pilottilaitostoiminnan tavoitteet. Luvussa annetaan esimerkkejä erilaisista olemassa olevista kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksista.

4.1 Pilottilaitoksien tarkoitus ja tavoitteet

Tyypilliset vaiheet uuden teknologian kehittämiseksi alkaa ideasta, josta muodostetaan konsepti. Sen jälkeen aletaan testaamaan konseptia laboratoriotasolla ja pyritään osoittamaan se toimivaksi. Laboratoriotasolla jatketaan alustavaa prosessin kehittämistä ja valmistellaan sen skaalausta seuraavaan vaiheeseen. Tämän jälkeen prosessia kehitetään yksityiskohtaisemmin joko laboratoriossa tai pienoislaitoksessa, minkä jälkeen siirrytään tekemään testiajoja pilottilaitoksessa. Sen jälkeen teknologiaa demonstroidaan ja suunnitellaan sen skaalaamista täysimittaiseen tuotantoon. Tämä vaihe voi tapahtua pilottilaitoksessa tai demonstraatiolaitoksessa. Tämän jälkeen teknologia otetaan käyttöön tuotantolaitoksessa. Teknologia on saavuttanut täyden valmiustason, kun se on testattu ja se on otettu käyttöön täyden mittakaavan tuotantolaitoksessa. Kuvassa 6 on prosessi- ja kemianteollisuudessa teknologian kehittämisessä tavanomaisesti esiintyvät eri laitostyytit sekä niiden tyypillisiä tehtäviä, tavoitteita ja muita ominaisuuksia. Tavanomaisesti laitostyytin kapasiteetti kasvaa siirryttäessä kuvassa vasemmalta oikealle. [26]



Kuva 6. Laitostyytit sekä niille ominaiset tehtävät, tavoitteet ja ominaisuudet, muokattu lähteestä [26].

Pilotti- ja demonstraatiolaitosten merkitys uuden teknologian kehityksessä on suuri. Uuden kestävä teknologian kehittämiseen liittyy paljon epävarmuutta ja riskejä siirryttäessä laboratoriosta täysimittaiseen tuotantoon. Riskit voivat olla esimerkiksi teknisiä tai markkinoihin liittyviä. Pilottilaitoksien avulla saadaan selville skaalauksesta koituvia haasteita, jotka voidaan ratkoa ennen seuraavaan laitostyyppiin siirtymistä. Tällöin esimerkiksi teknisten haasteiden ilmenemisen riski laskee täyden mittakaavan laitokseen siirryttäessä. [27]

Pilottilaitoksia tarvitaan ennen kuin siirrytään laboratoriomittakaavasta kaupalliseen laitokseen, koska esimerkiksi kaupallisen tason laitteet eroavat laboratoriotason laitteista. Tämä vuoksi voidaan joutua esimerkiksi muokkaamaan prosessiparametrejä. Pilottilaitoksilla kerätään paljon dataa koko prosessista ja tämän datan avulla voidaan esimerkiksi ennustaa saatavan tuotteen puhtautta sekä määrittää, millaista prosessijätettä syntyy. Lisäksi voidaan tarkentaa arvioita toiminnan tuottavuudesta. [28,29] Pilottimittakaavassa voidaan tutkia esimerkiksi prosessien raaka-aineen eli muovijätteen vaikutusta prosessiparametreihin, kuten lämpötilaan, lopputuotteiden saantoon sekä koostumukseen [30].

4.2 Menetelmien valmiustasot ja pilottilaitokset

Solisin ja Silveiran [13] mukaan heterogeeniselle muovijätteelle jo kaupallisella tasolla olevat menetelmät ovat perinteinen pyrolyysi, katalyyttinen krakkaus sekä perinteinen kaasutus. Näiden lisäksi plasmakaasutusta käytetään kaupallisella tasolla ongelmajätteen hajotuksessa [13]. Solisin ja Silveiran [13] mukaan vetykrakkaus sekä höyryreformointi pyrolyysin yhteydessä ovat pilotointivaiheessa ja plasmapyrolyysi sekä mikroaaltoavusteinen pyrolyysi laboratoriovaiheessa. Perinteistä pyrolyysiä on jo hyödynnetty teollisuudessa [15]. Euroopassa on esimerkiksi ainakin kolme kaupallisessa toiminnassa olevaa pyrolyysilaitosta, joista yhden omistaa Quantafuels ja kaksi muuta kuuluu Plastic Energy:lle [31]. Kemolyysimenetelmistä osa on saavuttanut kaupallisen valmiustason tietyille muovilaaduille. Kaupallista toimintaa löytyy esimerkiksi PET:n metanolyysistä ja glykolyysistä [32] sekä PU:n glykolyysistä [33].

Taulukossa 1 esitetään esimerkkejä erilaisista pilottilaitoksista, joita nykyisin on toiminnassa. Pilottilaitoksia löytyy myös menetelmistä, joista on jo kaupallista toimintaa, kuten pyrolyysistä ja glykolyysistä. Taulukossa kerrotaan pilottilaitoksen omistava yritys, hyödynnettävä menetelmä, käytettävä syöte ja saatava lopputuote. Lisäksi esitetään pilottilaitoksen kapasiteetti eli paljonko laitoksen on mahdollista käsitellä muovijätettä, mikäli toimija on sen ilmoittanut. Tähdellä merkityt kapasiteetit on muutettu lähteen muodosta kg/h muotoon tn/vrk. Syöte ja tuote esitetään taulukossa toimijan ilmoittamalla tavalla.

Taulukko 1. Esimerkkejä pilottilaitoksista.

Toimija	Menetelmä	Syöte	Tuote	Kapasiteetti [tn/vrk]	Lähteet
Itero	Pyrolyysi	Muovijäte	Pyrolyysiöljy	1,5	[34,35,36]
OMV	Pyrolyysi	PE-HD, PE-LD, PP, PS	Synteettinen raakaöljy ja petrokemian raaka-aine	2,4*	[38,39]
Quantafuel	Pyrolyysi	Muovijäte	Vähähiilinen synteettinen öljytuote	-	[41,42,43]
Resynergi	Mikroaaltoavusteinen pyrolyysi	PE-HD, PE-LD, PP, PS	Petrokemian raaka-aine, teollisuusbensoini ja kevyt polttoöljy	-	[45,47,48]
Anellotech	Katalyyttinen krakkaus	Muovijäte, polylukien PVC	Bentseeni, tolueni, ksyleeni, eteeni, propeeni ja butyleeni	0,5	[49,52]
NOVA Chemicals ja Enerkem	Kaasutus	Muovijätteestä peräisin oleva synteetikaasu	Polyeteenin raaka-aine	-	[57,58]
VTT	Kaasutus	Muovijäte	Olefiinejä, muita hiilivetyjä (bentseeni, tolueni ja ksyleeni)	-	[59,60]
BP	Hydrolyysi	PET	Monomeerit	-	[62,66]
Cumapol	Glykolyysi	PET, rPET, polyesteri	rPET	0,48*	[65,66,67,68,70]

*Tähdellä merkityt kapasiteetit on vaihdettu lähteen muodosta kg/h muotoon tn/vrk.

Itero on muovien kemiallisen kierrätyksen teknologiayritys, jolla on patentoitu pyrolyysiä hyödyntävä kemiallisen kierrätyksen teknologia [34]. Iterolla on pilottilaitos Iverissa Iso-Britanniassa, joka on otettu käyttöön vuonna 2020, ja se toimii tutkimus- ja kehityslaitokseksi. Sen avulla testataan prosessissa käytettävän syötteen eli muovijätteen soveltuvuutta ja sitä, kuinka eri muovilajit reagoivat kyseisessä pyrolyysiprosessissa. Lisäksi pilottilaitoksella kerätään lisää tietoa prosessista, kuten siinä käytettävistä parametreista ja sen lopputuotteista. Pilottilaitoksen avulla pystytään keräämään tietoa, kuinka erilaiset kontaminaatiot ja epäpuhtaudet vaikuttavat prosessiin sekä lopputuotteiden laatuun. Pilottilaitosta käytetään siis esimerkiksi lopputuotteiden laadun optimointiin. Prosessin optimoinnilla pyritään maksimoimaan lopputuotteiden saanto ja laatu, mistä on myös yritykselle taloudellista hyötyä. Tavoitteena Iterolla on pyrolyysiöljyjen ominaisuuksien parempi ymmärtäminen, mikä on keskeisessä roolissa tulevien laitoksien kaupallisessa menestyksessä. [35] Pilottilaitoksen kapasiteetti on 1,5 tonnia vuorokaudessa ja se on jokapäiväisessä käytössä [36].

Itero aikoo skaalata prosessinsa isompaan mittakaavaan, mitä varten heillä on suunnitella demonstraatiolaitoksen rakentaminen. Demonstraatiolaitoksen toteutuksessa Itero tekee yhteistyötä Fluor Corporationin kanssa prosessien suunnittelemiseksi ja rakentamiseksi. Laitos rakennetaan Brightlandin Chemelotin kampukselle Alankomaihin. Laitoksella demonstroidaan teknologiaa täyden mittakaavan toiminnassa ja sitä varten tehdään tutkimustyötä erilaisten syötteiden käytöstä ja lopputuotteiden optimoinnista. Lisäksi laitoksen avulla demonstroidaan liiketoimintamallia. [36] Demonstraatiolaitoksella tullaan käyttämään syötteenä sekamuovijätettä, josta on tarkoitus saada lopputuotteina öljyä, vahoja sekä kaasua. Näitä voidaan hyödyntää esimerkiksi petrokemian tuotteiden valmistuksessa. Laitoksen kapasiteetti on pilottilaitosta suurempi ja siellä pystytään käsittelemään 27 000 tonnia muovijätettä vuodessa. [36,37] Laitoksen on määrä aloittaa toiminta vuonna 2023. Se koostuu yhdestä moduulista ja toimintaa voidaan kasvattaa lisäämällä moduuleita. Hankkeen investointien kustannukset ovat 25 miljoonaa euroa. [37]

Muita esimerkkejä pyrolyysiä hyödyntävistä pilottilaitoksista ovat OMV:n ja Quantafuelin laitokset. OMV on itävaltalainen teollisuusyritys, joka tuottaa ja markkinoi öljyä, kaasua ja kemiallisia tuotteita sekä kehittää ratkaisuja kiertotalouteen. Heillä on patentoitu ReOil-teknologia, jonka avulla muovijäte muutetaan synteettiseksi raaka-aineeksi petrokemianteollisuuteen. Raaka-ainetta hyödynnetään pääosin korkealaatuisten muovien valmistukseen. OMV:llä on pilottilaitos Schwechatissa, joka on ollut toiminnassa vuodesta 2018 lähtien. Pilottilaitos pystyy käsittelemään tunnissa sata kiloa muovijätettä sadaksi litraksi

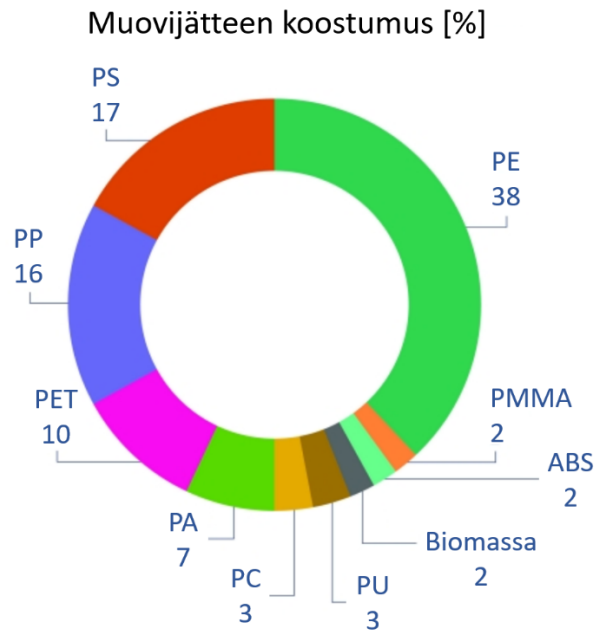
synteettistä raaka-ainetta. [38] ReOil-tekniologialla pystytään käsittelemään suuritiheyspolyeteeniä (PE-HD), pientiheyspolyeteeniä (PE-LD), PP:tä ja PS:ää [39]. Pilottilaitoksen avulla OMV on pystynyt kehittämään pyrolyysiprosessiaan ja laitos on auttanut yritystä teknologian laajentamisen suunnittelussa [38]. Pilottilaitoksen toiminnan alussa yrityksen on esimerkiksi tarvinnut optimoida laitoksen toimintaa, jotta laitos pystyisi toimimaan vuorokauden ympäri. Yrityksen pilottilaitoksessa muovijätteen kuljetus toteutetaan useiden ruuvikuljettimien avulla. Alkuun ruuvikuljettimet aiheuttivat suurimpia ongelmia laitoksen toiminnassa. [40] Prosessin skaalauksessa isompaan mittakaavaan voi olla siis monenlaisia ongelmia, jonka vuoksi skaalausta tehdäänkin asteittain.

OMV on jo skaalaamassa prosessiaan pilottilaitoksesta demonstraatiolaitokseen, jossa toiminnan pitäisi alkaa vuonna 2023. Demonstraatiolaitoksen kapasiteetti on 16 000 tonnia muovijätettä vuodessa. Syötteenä käytetään muovijätettä, joka koostuu pääosin polyolefiineistä. Syöte on pääasiassa mekaaniseen kierrätykseen kelpaamatonta muovijätettä, kuten monikerroskalvoja. Syöte hankitaan demonstraatiolaitokseen Itävallasta yhteistyössä paikallisten jätehuoltoyritysten kanssa. OMV:n suunnitelmaan kuuluu skaalata ReOil-tekniologia kaupalliseen mittakaavaan vuoteen 2026 mennessä. Suunniteltu kapasiteetti kaupalliselle laitokselle on 200 000 tonnia muovijätettä vuodessa. OMV:n pilottilaitos sekä demonstraatiolaitos ovat täysin ISCC PLUS sertifioituja. ISCC PLUS on kestävä kehityksen standardi, joka esimerkiksi tarjoaa jäljitettävyyden toimitusketjussa sekä varmistaa, että yritykset noudattavat ympäristö- ja sosiaalistandardeja. [38]

Quantafuel on norjalainen energiayhtiö [41], jolla on pilottilaitos Kristiansundissa Replast yrityksen mekaanisen kierrätyslaitoksen yhteydessä [42]. Pilottilaitoksen avulla kerätään tietoa, jonka pohjalta samoihin tiloihin aiotaan rakentaa täysimittainen laitos. Laitoksen tarkoituksena on pilotoida ja kehittää etuja, joita savutetaan, kun mekaanisen ja kemiallisen kierrätyksen laitokset ovat samassa yhteydessä. [42] Kemiallisessa kierrätyksessä käytetään syötteenä mekaanisesta kierrätyksestä syntyvää rejektiä eli muovijätettä, joka ei kelpaa mekaaniseen kierrätykseen [43]. Kristiansundin pilottilaitoksesta saatavat lopputuotteet menevät BASF yrityksen käyttöön, joka valmistaa niistä uusia muoviraaka-aineita [42]. Quantafuelilla on jo kaupallisen tason laitos Tanskassa, mikä hyödyntää pyrolyysiä ja laitoksessa pystytään käsittelemään 20 000 tonnia sekamuovijätettä vuodessa. Quantafuelin tekniologiaan sisältyy puhdistusvaihe, jossa poistetaan pyrolyysikaasusta tuhka ja epäpuhtaudet, kuten kloori ja rikki. Tämän jälkeen puhdistusvaiheessa parannetaan hiilivetyjen laatua katalyyttien avulla. Lopuksi kaasu kondensoidaan ja erotellaan halutuiksi öljyjakeiksi tislamalla. Kaikki saadut lopputuotteet menevät myös kaupallisesta laitoksesta BASF:lle. [44]

Resynergi on yhdysvaltalainen yritys, jolla on jatkuvan toiminnan pilottilaitos Santa Rossassa eli laitos on käytössä vuorokauden ympäri [45]. Resynergi on kehittänyt jatkuvan mikroaaltoavusteisen pyrolyysireaktorin (CMAP). Reaktori pystyy käsittelemään vuorokaudessa 1,25 tonnia muovijätettä muuntaen sen nopeasti kaasuksi jatkokäsittelyä varten. Resynergin mukaan CMAP-reaktorin lämmön syöttö muovijätteeseen on perinteiseen pyrolyysiin verrattuna kontrolloidumpaa ja tehokkaampaa, minkä vuoksi muovimolekyylit hajoavat 100 kertaa nopeammin. [46] Resynergin prosessilla pystytään käsittelemään PE-HD:tä, PE-LD:tä, PP:tä ja PS:ää [47]. Prosessiolosuhteita vaihtelemalla lopputuotteina voidaan saada teollisuusbenssiiniä, kevyttä polttoöljyä (keskitisle) tai bentseeni, tolueeni ja ksyleeni -seosta (BTX) [48].

Anellotech on kestävä kehityksen teknologiayritys, joka kehittää teknologioita uusiutuvien kemikaalien valmistukseen ja sekamuovijätteen kierrätykseen. Anellotechilla on kehitysvaiheessa oleva prosessiteknologia Plas-TCat. Sen tavoite on muuntaa sekamuovijäte hyödykekemikaaleiksi esimerkiksi olefiineiksi ja aromaattisiksi hiilivedyiksi, mitä voidaan käyttää muovien raaka-aineena. [49] Olefiinit ovat tyydyttymättömiä hiilivetyjä ja niissä on vähintään yksi kaksoissidos hiilien välillä. Näitä ovat esimerkiksi eteeni, propeni ja buteeni. [50] Aromaattiset hiilivedyt ovat tyydyttymättömiä ja ne sisältävät vähintään yhden bentseenirenkaan [51, s. 10]. Plas-TCat on yksivaiheinen katalyyttisen krakkauksen tekniikka. Anellotech on pilotoinut teknologiaansa TCat-8 pilottilaitoksessa, joka sijaitsee Houstonissa Texasissa. Pilottilaitoksen kapasiteetti on 0,5 tonnia muovijätettä päivässä. Anellotech käyttää Plas-TCat-teknologiassa yhtä lämpökatalyyttistä reaktoria, jolla voidaan muuntaa sekamuovijätettä kemiallisiksi raaka-aineiksi. Saatuja lopputuotteita ovat BTX, eteeni, propeni ja butyleeni. Näitä voidaan hyödyntää uusien muovien valmistuksessa. Pilotoinnissa muovijäte koostuu yleisimmistä muovilaaduista pois lukien PVC. [52] Pilotoinnissa käytetyn muovijätteen koostumus on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Muovijätteen koostumus Anellotechin pilotoinnissa, muokattu lähteestä [52].

Anellotechin [53] mukaan Plas-TCat-tekniologia on tulevaisuudessa skaalattavissa täyden mittakaavan kaupalliseen laitokseen ja heidän odotuksien mukaan kapasiteetti ylittäisi 200 000 tonnia vuodessa. Laitoksen syötteenä kelpaisi suurin osa polyolefiinimuovijätteestä [53]. Anellotechin Plas-TCat-tekniologian kehitysohjelman mukaan tavoitteena on saavuttaa kaupallinen laitos vuonna 2027 [54]. Tekniologia vaatii kuitenkin vielä lisää pilotointia, jonka tarkoituksena on esimerkiksi tutkia, kuinka tasapainotettu katalyytti vaikuttaa prosessin suorituskykyyn [52].

NOVA Chemicals on kanadalainen kemianteollisuuden yritys, jonka tuoteportfolioon kuuluu eteeni, polyeteeni ja kemialliset yhteistuotteet [55]. Enerkem on kanadalainen teknologiayritys, joka tuottaa biopolttoaineita ja uusiutuvia kemikaaleja jätteistä, joita ei pystytä kierrättämään [56]. Yritykset ovat ilmoittaneet rakentavansa pilottilaitoksen Edmontoniin Kanadaan. Pilottilaitoksen käyttöönoton tavoitteenaan olevan valmis vuoden 2023 keväällä. Hankkeessa hyödynnetään Enerkemin kaasutustekniologiaa sekä NOVA Chemicalsin petrokemian- ja muovituotannon osaamista. Pilottilaitoksen tarkoituksena on valmistaa synteetisikaasusta raaka-ainetta polyeteenin valmistukseen. Pilotoinnissa käytettävä synteetisikaasu tuotetaan Enerkemin Alberta Biofuelsin (EAB) tehtaalla. Siellä synteetisikaasu tuotetaan muovijätteestä, jota ei voida kierrättää tai kompostoida. [57,58] Pilottilaitosta hyödynnetään esimerkiksi lämmön ja massansiirto-ominaisuuksien tarkkaan mittaamiseen. Lisäksi sen avulla kerätään tietoa myös muista prosessiin liittyvistä osaluista, joita hyödynnetään kaupallisen mittakaavan suunnitteluun. [58] NOVA Chemi-

calsin ja Enerkem [57] mukaan hankkeen tavoitteena on laajentaa kierrätettävien materiaalien määrää ja nostaa kierrätysastetta. Tämän myötä voidaan vähentää muovien päätymistä ympäristöön sekä samalla vähennetään poltosta sekä kaatopaikalle sijoittamisesta syntyviä päästöjä. [57]

Toinen esimerkki kaasutusta hyödyntävästä prosessista on teknologian tutkimuskeskus VTT:n kehittämä Olefy-teknologia. VTT on perustanut uuden yrityksen, Olefy Technologiesin tämän pohjalta. Tällä hetkellä Olefy-pilotti on toiminnassa VTT Bioruukin pilottikeskuksessa Espoossa ja teknologia on suunniteltu skaalattavan demonstraatiomittakaavaan. Demonstraatiolaitostoiminnan odotetaan olevan toiminnassa vuoteen 2026 mennessä. [59] VTT:n [59] mukaan Olefy-prosessi alentaa merkittävästi kierrätysmuovin tuotantokustannuksia. Olefy-teknologialla lopputuotteiden saanto muovijätteestä on noin 70 % ja saatavat lopputuotteet vastaavat öljypohjaisia neutraalisia olefiineja [59]. Olefy-prosessissa suotuisin syöte on polyolefiinit, mutta teknologia sietää monia muitakin muovilaatuja. Kuitenkin esimerkiksi PET tai muut happea sisältävät muovit eivät ole suotuisia prosessiin, mutta PET ei kuitenkaan pieninä osuuksina tuota ongelmia. Prosessi sietää hyvin esimerkiksi pigmenttejä ja muita muovijätteelle tyypillisiä epäpuhtauksia, minkä vuoksi syötteen esikättelyä, kuten pesua, tarvitaan vähemmän. Olefy-teknologia eroaa perinteisestä kaasutuksesta siten, että tyypillisesti kaasutuksella tuotetaan vetyä ja hiilimonoksidia, kun taas Olefy-prosessista saadaan kevyitä olefiineja. Tähän päästään sillä, että prosessissa kaasutusreaktio pysäytetään lyhyen ajan kuluttua. [60]

BP on kansainvälinen energia-alan yritys [61], joka on kehittänyt BP Infinia-kierrätysteknologian. Se mahdollistaa yleisesti kierrätykseen kelpaamattoman PET:n, kuten mustien ruoka-astioiden sekä värillisten pullojen, muuntamisen takaisin neutraalisiksi vastaavaksi raaka-aineeksi. Teknologia hyödyntää hydrolyysiä, jonka avulla PET:stä voidaan tuottaa monomeerejä. BP:llä on pilottilaitos Nepervillessä Illinoisissa, missä testataan teknologiaa ennen täysimittaiseen kaupalliseen vaiheeseen siirtymistä. Pilottilaitoksen toiminnan on odotettu alkaneen vuoden 2020 lopulla. [62] BP [62] uskoo, että teknologian avulla on mahdollista kehittää tulevaisuudessa useita täyden mittakaavan laitoksia ympäri maailmaa.

Cumapol on yritys, joka tarjoaa erilaisia palveluita polyesteriteollisuudelle [63] ja se on kehittänyt CuRe-teknologian kulutuksen jälkeiselle polyesterille [64]. CuRe-teknologia soveltuu polyesterille, jota ei voida mekaanisesti kierrättää. Teknologia keskittyy erityisesti elintarvike PET-pakkauksiin sekä tekstiileihin ja mattoihin. Tulevaisuudessa teknologiaa on tarkoitus myös soveltaa muihin käytettyihin polyesterisovelluksiin. [65] Teknologia perustuu glykolyysiin ja siinä PET:iä depolymerisoidaan oligomeereiksi [66,67]. Cumapolin [68] mukaan lopputuotteena saadaan korkealaatuisia kierrätettyä PET:iä

(rPET), jolla voidaan korvata fossiilisista lähteistä peräisin oleva PET [69]. Teknologiaa testataan yhteistyössä Niagan, Morssinkhofin, DuForin ja NHL Stendenin kanssa. Pilottilaitos sijaitsee Emmenissä Alankomaissa. [64] Pilottilaitos on aloittanut toimintansa vuonna 2020 ja sen kapasiteetti on 20 kilogrammaa tunnissa. Pilotoinnin avulla selvitetään, mitä vaaditaan teknologian skaalaamiseksi isompaan mittakaavaan tulevaisuudessa. Tavoitteena on saada nostettua kapasiteetti 25 000 tonniin vuodessa. Pilottilaitoksessa testaan esimerkiksi useita jätevirtoja ja -reittejä yhteistyökumppaneiden kanssa. [70]

4.3 Pilottilaitoksissa käytettyjen menetelmien haasteet

Perinteisestä pyrolyysistä saatavan lopputuotteen laatu on suhteellisen heikkoa ja sen jatkojalostus on usein tarpeellista. Heikon laadun vuoksi vain pieni osuus voidaan hyödyntää uusien muovien tuotannossa. [13] Pyrolyysiprosessi vaatii suuren määrän lämpöenergiaa ja lisäksi sen aikana muodostuu koksia, joka vahingoittaa käytettävää laitteistoa [15].

Haasteena pyrolyysimenetelmässä on myös prosessin aikana tapahtuvien reaktioiden monimutkaisuus, joka korostuu erityisesti, kun käsitellään sekamuovijätettä [3,13,31]. Eri polymeereillä on prosessin aikana erilainen hajoamistapa, minkä vuoksi saadaan erilaisia lopputuotteita. Polymeerin ominaisuuksien mukaan hallitsevana hajoamistapana voi olla joko depolymerisaatio tai satunnainen fragmentoituminen. Esimerkiksi PE:llä ja PP:llä on alttius satunnaiseen fragmentoitumiseen, kun puolestaan polytetrafluorieteenistä (PTFE), PA:sta, PS:stä ja polymetyylimetakrylaatista (PMMA) saadaan tuotteita, jotka sisältävät pääasiassa näiden monomeerejä. Satunnaisen fragmentaation myötä esimerkiksi PE:stä ja PP:stä saatu tuote tarvitsee jatkokäsittelyä, jonka jälkeen saadaan lopputuotteena petrokemian raaka-ainetta, kuten teollisuusbenssiiniä tai dieseliä. [3] Tämän lisäksi tietyt epäpuhtaudet voivat vaikuttaa saatavaan lopputuotteeseen, sillä niiden takia lopputuotteen arvo voi laskea merkittävästi [3,13]. Tällaisia epäpuhtauksia voi esimerkiksi olla tietyt hapettimet, joiden takia lopputuotteeseen voi muodostua metanolia tai formaldehydiä [3].

Pyrolyysi on taloudellisesti kannattavaa vain suurissa määrissä. Tämän vuoksi se soveltuu toistaiseksi vain yleisemmille polymeereille ja niiden seoksille, kuten PE:lle, PP:lle ja PS:lle. [3] Yleisimmistä polymeereistä PVC ei kuitenkaan sovellu pyrolyysiin, sillä sen seurauksena lopputuotteisiin muodostuu vetykloridia, joka tulee poistaa. Vetykloridi aiheuttaa merkittäviä rajoitteita laitteistojen materiaaleille, koska se aiheuttaa korroosiota. Lisäksi se on haitallinen ympäristölle. [3,12,15]

Mikroaaltoavusteisen pyrolyysin haasteena on luvussa 3.1 käsitelty menetelmän riippuvuus materiaalin dielektrisestä ominaisuudesta. Tämä johtaa heikkoon kuumennukseen huonosti absorboivissa materiaaleissa eli materiaaleissa, joilla on pieni dielektrisyysvakio. Mikroaaltoenergia ei välttämättä siirry tehokkaasti, koska eri materiaaleilla on erilaiset ominaisuudet. Tämän seurauksena käsiteltävään syötteeseen voi tiettyihin kohtiin muodostua kuumia alueita. [19] Muodostuvat kuumat alueet vaikeuttavat reaktiolämpötilan tarkkaa mittaamista. Reaktiolämpötilan tarkassa mittaamisessa on muutenkin haasteita, sillä tavanomaiset mittauslaitteet, kuten termoparit ja infrapunalämpömittarit, eivät sovellu siihen kovin hyvin. Termopari alkaa sulaa reaktiolämpötilan ylittäessä 1000 °C ja infrapunalämpömittarin ongelma on, että mikroaaltoavusteisessa pyrolyysissä syötteen sisälämpötila on yleensä korkeampi kuin pinnan. [71]

Katalyyttisen krakkauksen haasteena on prosessissa käytettävien katalyyttien suhteellisen kallis hinta [18,72]. Katalyyttien regenerointia eli palauttamista alkuperäisen veroiseksi sekä niiden uudelleenkäyttöä tulisi tutkia lisää, jotta prosessia saadaan sekä taloudellisesti että ympäristöllisesti tehostettua [72]. Katalyyttisessä krakkauksessa sekamuovijäte tulee yleensä esikäsitellä, koska menetelmän merkittävänä haasteena on, että jätteen seassa olevat kloridi- ja typpikomponentit estävät katalyytin toimintaa deaktivoimalla sen. Lisäksi sekamuovijätteen seassa olevat epäorgaaniset aineet tukkivat katalyytin pinnan huokosia haitaten sen toimintaa. [13] Muita mahdollisia sovelluskohteita tuotetulle öljylle, kaasulle sekä hiille tulisi tutkia lisää, jotta tekniikasta saataisiin taloudellisesti entistä kestävämpi. Saaduista tuotteista tarvitaan vielä myös tarkempaa analyysiä, jotta voidaan esimerkiksi ymmärtää tuotettujen kaasujen yksityiskohtainen koostumus sekä niiden vaikutus terveydelle ja ympäristölle. Lisäksi on tarpeen selvittää erityyppisistä muovijätteistä valmistettujen öljyjen yksityiskohtainen kemiallinen karakterisointi, jotta voidaan täysin ymmärtää niiden terveysriskit sekä ympäristöongelmat. [72]

Perinteisessä kaasutusmenetelmässä saatava synteetikaasu sisältää epäpuhtauksia esimerkiksi ammoniakkia (NH_3), rikkivetyä (H_2S), NO_x -päästöjä, alkalimetalleja sekä paljon tervaa [15]. Tervan muodostuminen on yksi suurimpia haasteita, sillä se aiheuttaa merkittäviä toiminnallisia ongelmia, joiden takia prosessin kokonaistehokkuus pienenee sekä tuotetun kaasun käytettävyys heikkenee [22]. Näiden epäpuhtauksien vuoksi synteetikaasu vaatii lisäpuhdistusta, joka puolestaan lisää kustannuksia. Prosessiin liittyy myös syntyvien haitallisten kaasujen vuoksi ympäristöongelmia, joita aiheuttavat esimerkiksi NO_x -päästöt. [15] Kun kaasuttavana aineena käytetään höyryä, yhtenä haittana on, että se vaatii erittäin suuren määrän energiaa voimakkaita endotermisiä reaktioita varten

[23]. Käytettäessä kaasuttavana aineena ilmaa, säästetään kaasun erottelukustannuksissa höyrykaasutukseen verrattuna. Toisaalta ilmakaasutus vaatii suuremmat tuotantomäärät, jolloin investointikustannukset puolestaan nousevat. [21]

Kemolyysimenetelmien haasteena on niiden toistaiseksi rajallinen tutkimus menetelmien soveltamisesta PE:lle ja PP:lle. Jos kemolyysiä pystyttäisiin hyödyntämään myös näihin polymeereihin, niin sen suosio teollisuudessa voisi olla suurempi. [15] Lisäksi eri kemolyysimenetelmillä on omia haasteitaan. Esimerkiksi PET:n neutraalissa vesiliuoksessa tapahtuvassa hydrolyysissä suurena haittana on polymeereissä olevat epäpuhtaudet, kuten väriaineet. Nämä väriaineet eivät erotu helposti hydrolyysin aikana primäärituotteena saatavasta tereftaalihaposta (TPA). Tämän vuoksi neutraalista hydrolyysistä saadun TPA:n puhtaus on alhaisempi kuin happaman tai emäksisen hydrolyysin lopputuotteilla. Näin ollen depolymeroidut tuotteet tulee erotella tarkkaan ja puhdistaa, jotta saataisiin erittäin puhdasta TPA:ta. Tämä puolestaan voi pidentää prosessi-aikaa huomattavasti sekä lisätä kustannuksia. PET:n glykolyysissä puolestaan halutaan esimerkiksi kehittää tehokkaita katalyyttejä, koska ilman katalyyttiä prosessi on erittäin hidas eikä siinä voida saavuttaa täydellistä depolymerisaatiota. [73]

Kannattavuus on yhtenä yleisenä haasteena kemiallisen kierrätyksen menetelmissä. Esimerkiksi Lin et al. [31] mukaan kaasutuslaitoksen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa useampi prosessi- ja markkinatekijä. Kannattavuuteen vaikuttavia prosessitekijöitä ovat esimerkiksi muovijätteen koostumus, prosessista saatavat tuotteet sekä energiatehokkuus. Markkinatekijöistä kannattavuuteen vaikuttaa puolestaan esimerkiksi porttimaksut, tarvittavat pääomakustannukset sekä markkinahinnat. [31] Porttimaksu tarkoittaa jätteenpolttolaitoksen perimää maksua vastaanotettavasta jätteestä jätteentuottajilta [74]. Kannattavuuteen vaikuttaa myös muovijätteen saatavuus. Kemiallisen kierrätyksen laitoksissa tulisi olla vakaa muovijätteen saatavuus, jossa keskitytään määrään, koostumukseen sekä laatuun. [3,31] Esimerkiksi tällaisten haasteiden vuoksi tarvitaan pilottilaitoksia, jotta saadaan demonstroitua ja kerättyä dataa toiminnan skaalaamisesta teollisesti isompaan mittakaavaan.

Kemiallisen kierrätyksen elinkaariarvioiden (LCA) tekeminen on nousussa [75], mutta niille ei ole vielä kattavia LCA-malleja [76]. LCA on menetelmä, jonka avulla arvioidaan ja analysoidaan materiaalien ja prosessien elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia [75,76]. Pyrolyysistä löytyy enemmän LCA-malleja kuin muista kemiallisen kierrätyksen menetelmistä, joka voi johtua pyrolyysitietojen paremmasta saatavuudesta. Muista kemiallisen kierrätyksen menetelmistä, kuten kaasutuksesta, vetykrakkauksesta ja kemolyysistä, tulisi saada lisää laadukasta tietoa, jotta eri kemiallisen kierrätyksen menetel-

mien välillä voitaisiin tehdä luotettavampaa vertailua. [75] Kemiallisen kierrätyksen taloudellisen, ympäristöllisen ja yleisen kestävyuden ymmärtämistä vaikeuttaa kattavien LCA-mallien puuttuminen [76]. Toistaiseksi kuitenkin tiedetään, että mekaanista kierrättämistä tulisi suosia enemmän kuin kemiallista kierrättämistä, koska sen hiilijalanjälki on pienempi [77].

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Muovien kierrätystä halutaan tehostaa ja tavoitteena on nostaa kierrätysastetta sekä saada muovit paremmin takaisin kiertoon käytön jälkeen. Kirjallisuuskatsauksessa ilmeni, että kemiallista kierrätystä pyritään kehittämään aktiivisesti, koska sen avulla voitaisiin edistää kiertotaloutta sekä kestäväää kehitystä. Nykyisin hallitsevana kierrätysmenetelmänä on mekaaninen kierrätys. Mekaaniseen kierrätykseen liittyy haasteita, joita pyritään ratkaisemaan kemiallisen kierrätyksen avulla. Tällaisia haasteita ovat esimerkiksi monikerrospakkauksien haastava kierrätys sekä mekaanisen kierrätyksen soveltuvuus ainoastaan kestumuoveille. Lisäksi mekaanisesta kierrätyksestä saatujen lopputuotteiden ominaisuudet heikentyvät kierrätysyöyklien myötä eli se on downcycling-kierrätystä, jossa materiaalit päätyvät lopulta hävitettäväksi. Tulevaisuudessa halutaan lisätä upcycling-kierrätysmuotoa ja tähän tarvitaan kemiallista kierrätystä. Kemiallisen kierrätyksen tarkoitus ei ole kuitenkaan korvata mekaanista kierrätystä, vaan olla sen rinnalla täydentävässä muovien kierrätysty.

Muovien kemiallisen kierrätyksen termokemialliset menetelmät tapahtuvat korkeissa lämpötiloissa eli ne ovat hyvin energiaintensiivisiä. Kemolyysimenetelmien prosessilämpötilat ovat termokemiallisiin menetelmiin verrattuna huomattavasti alhaisemmat. Kemolyysimenetelmät kuitenkin soveltuvat ainoastaan homogeeniselle muovijätteelle. Energiaintensiivisyys on yhtenä rajoittavana tekijänä kemiallisen kierrätyksen menetelmien teollisessa soveltamisessa, siitä syntyvien kustannuksien ja päästöjen takia. Muovien kierrätyksellä pyritään säästämään luonnonvaroja ja vähentämään muovien aiheuttamaa ympäristökuormaa. Kierrätyksestä saatavan hyödyn tulisi siis olla suurempi, kuin siitä aiheutuvien haittojen. Tämän vuoksi tulevaisuudessa tulisikin tehdä kattavia LCA-malleja eri kemiallisen kierrätyksen menetelmistä, jotta saadaan kokonaisvaltainen ymmärrys menetelmien elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista.

Kemiallisen kierrätyksen menetelmät ovat kannattavia vasta suurille tuotantomäärille, joten on tärkeää saada riittävästi laadultaan menetelmään kelpaavaa muovijätettä. Siksi muovijätteen keräyksen tulee olla tarpeeksi tehokasta. Tämän lisäksi kannattavuuteen vaikuttaa esimerkiksi lopputuotteiden markkinahinnat. Markkinahinnan tulee olla kilpailukykyinen neitseelliseen raaka-aineeseen verrattuna. Markkinahintaan vaikuttaa esimerkiksi kierrätysprosessista syntyvät tuotantokustannukset. Tuotantokustannuksia puolestaan nostaa esimerkiksi energiaintensiivisyys.

Myös kemiallinen kierrätys vaatii muovijätteen esikäsitteilyä ja lajittelua, koska esimerkiksi erilaiset epäpuhtaudet voivat aiheuttaa haasteita prosesseissa. Lisäksi useamman menetelmän haasteena on vielä jatkokäsittelyn tarve lopputuotteille, joka lisää kustannuksia sekä ympäristökuormaa. Pyrolyysin haasteita on tunnistettu kattavammin kuin muiden menetelmien haasteita. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että menetelmässä olisi muihin menetelmiin verrattuna enemmän ongelmia vaan sen sijaan sitä on tutkittu eniten. Todellisuudessa osassa menetelmistä haasteet ovat vielä niin merkittäviä, että ne hidastavat menetelmien siirtymistä laboratoriovaiheesta eteenpäin.

Työssä selvitettiin, millä tasolla muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitostoiminta on. Selvitys tehtiin tarkastelemalla esimerkkejä erilaisista muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksista. Tutkimuksessa selvisi, että muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitoksissa hyödynnetään eniten pyrolyysimenetelmää. Muovien kemiallisen kierrätyksen pilottilaitostoiminta on suhteellisen aktiivista, koska löytyy useita toimijoita, jotka ovat pilotointivaiheessa oman teknologiansa kehityksessä. Lisäksi moni näistä toimijoista on jo ilmoittanut suunnitelmistaan skaalata teknologiaansa eteenpäin joko demonstraatiolaitokseen tai täyden mittakaavan laitokseen.

Kirjallisuudessa kävi ilmi, että osa kemiallisen kierrätyksen menetelmistä on saavuttanut jo täyden valmiustason, osa on pilotointivaiheessa sekä osa vasta laboratoriovaiheessa. Pilottilaitoksia löytyy myös sellaisille menetelmille, joista on jo kaupallista toimintaa, kuten pyrolyysille ja PET:n glykolyysille. Tämä johtuu siitä, että eri toimijoilla on tarve pilotoida omia teknologioitaan, joita he pyrkivät skaalaamaan täyden mittakaavan toimintaan. Työssä kävi ilmi, että kemolyysimenetelmiä tutkitaan erityisesti PET:lle, joka todennäköisesti johtuu siitä, että sitä käytetään paljon esimerkiksi erilaisissa pakkauksissa sekä tekstiileissä. Lisäksi kierrätettyä PET:iä pystytään hyödyntämään laajasti.

Muovien kemiallisen kierrätyksen menetelmien kehittämistä tulee jatkaa, jotta valtaosa näiden menetelmien haasteista voitaisiin ratkaista. Etenkin menetelmien energiaintensivisyyttä tulisi pyrkiä pienentämään. Tähän todennäköisenä ratkaisuna voisi olla katalyyttien hyödyntäminen, minkä vuoksi katalyyttinen krakkaus voisi olla tulevaisuudessa suuremmissa roolissa. Kemiallisen kierrätyksen menetelmien kehittäminen on tärkeää, jotta muovien kierrätyksestä saadaan mahdollisimman tehokasta. Tulevaisuudessa voisi olla kannattavaa pyrkiä Quantafuel yrityksen tapaan sijoittaa kemiallinen kierrätys mekaanisen kierrätyksen yhteyteen. Tällöin kemiallinen kierrätys olisi täydentämässä mekaanista kierrätystä ja siinä hyödynnettäisiin mekaanisen kierrätyksen rejektiä. Tällaisessa konseptissa pyrittäisiin ensisijaisesti hyödyntämään mekaanista kierrätystä, joka on hiilijalanjälkensä puolesta suositeltavampi vaihtoehto ja vasta tarvittaessa käytettäisiin kemiallista kierrätystä.

LÄHTEET

- [1] Plastics – the Facts 2022, Plastics Europe, 2022. Saatavissa (viitattu 31.1.2023): https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS_V7-Tue_19-10-1.pdf
- [2] S. Chawla, B.S. Varghese, C. A, C.G. Hussain, R. Keçili, C.M. Hussain, Environmental impacts of post-consumer plastic wastes: Treatment technologies towards eco-sustainability and circular economy, *Chemosphere*, Vol.308, 2022.
- [3] K. Ragaert, L. Delva, K. Van Geem, Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, *Elmsford, Waste Management*, Vol.69, 2017, pp. 24–58.
- [4] INEOS Olefins & Polymers Europe announces range of Bio-attributed Olefins and Polyolefins, INEOS, 2019. Saatavissa (viitattu 7.3.2023): <https://www.ineos.com/news/shared-news/ineos-olefins--polymers-europe-announces-range-of-bio-attributed-olefins-and-polyolefins/>
- [5] Kiertotalouspaketti: EU:n uudet tavoitteet kierrätykselle, Euroopan parlamentti, 2018. Saatavissa (viitattu 1.2.2023): <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20170120STO59356/kiertotalouspaketti-eu-n-uu-det-tavoitteet-kierratykselle>
- [6] B. Sethi, *Methods of Recycling of Polymers: Addition Polymers*, In R. Raju (Ed.) *Recycling of polymers: methods, characterization and applications*, Weinheim, Germany; Wiley-VCH, 2017.
- [7] V. Goodship, *Introduction to plastics recycling*, 2nd ed, Shawbury, U.K., Smithers Rapra, 2007.
- [8] A. Villanueva, P. Eder, *End-of-waste criteria for waste plastic for conversion: technical proposals: final report*, Publications Office, Luxembourg, 2014, 258 p. Saatavissa: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/13033>
- [9] P. Quicker, M. Seitz, J. Vogel, *Chemical recycling: A critical assessment of potential process approaches*, *Waste Management & Research*, Vol.40, No.10, 2022, pp. 1494–1504.
- [10] P. Oblak, J. Gonzalez-Gutierrez, B. Zupančič, A. Aulova, I. Emri, *Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene*, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.114, 2015, pp. 133–145.
- [11] J. Datta, P. Kopczyńska, *From polymer waste to potential main industrial products: Actual state of recycling and recovering*, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 46, No. 10, 2016, pp. 905–946.
- [12] H.H. Shah, M. Amin, A. Iqbal, I. Nadeem, M. Kalin, A.M. Soomar, et al. *A review on gasification and pyrolysis of waste plastics*, *Frontiers in chemistry*, Vol.10, 2022.
- [13] M. Solis, S. Silveira, *Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment*, *Waste Management*, Vol.105, 2020, pp. 128–138.

- [14] A. Maisels, A. Hiller, F.-G. Simon, Chemical Recycling for Plastic Waste: Status and Perspectives, *ChemBioEng reviews*, Vol.9, No.6, 2022, pp. 541–555.
- [15] F. Zhang, Y. Zhao, D. Wang, M. Yan, J. Zhang, P. Zhang, T. Ding, L. Chen, C. Chen, Current technologies for plastic waste treatment – A review, *Journal of Cleaner Production*, Vol.282, 2021.
- [16] T. Maqsood, J. Dai, Y. Zhang, M. Guang, B. Li, Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol.159, 2021.
- [17] K.P. Bhatt, S. Patel, D.S. Upadhyay, R.N. Patel, A critical review on solid waste treatment using plasma pyrolysis technology, *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, Vol.177, 2022.
- [18] S.D.A. Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua, A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Conversion and Management*, Vol.115, 2016, pp. 308–326.
- [19] P.H.M. Putra, S. Rozali, M.F.A. Patah, A. Idris, A review of microwave pyrolysis as a sustainable plastic waste management technique, *Journal of Environmental Management*, Vol.303, 2022.
- [20] S. Pal, A. Kumar, A.K. Sharma, P.K., Ghodke, S. Pandey, A. Patel, Recent Advances in Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste for the Production of Hydrocarbon Fuels, *Processes*, Vol.10, No.8, 2022.
- [21] O. Dogu, M. Pelucchi, R. Van de Vijver, P.H.M. Van Steenberg, D.R. D'hooge, A. Cuoci, et al. The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.84, 2021.
- [22] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao, M. Olazar, Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.82, 2018, pp. 576–596.
- [23] J. Huang, A. Veksha, W.P. Chan, A. Giannis, G. Lisak, Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.154, 2022.
- [24] Y. Chang, Y. Zhang, C. Tian, S. Zhang, X. Ma, F. Cao, et al. Nitrogen isotope fractionation during gas-to-particle conversion of NO_x to NO₃⁻ in the atmosphere – implications for isotope-based NO_x source apportionment, *Atmospheric chemistry and physics*, Vol.18, No.16, 2018, pp. 11647–11661.
- [25] I. Barbarias, G. Lopez, J. Alvarez, M. Artetxe, A. Arregi, J. Bilbao, et al. A sequential process for hydrogen production based on continuous HDPE fast pyrolysis and in-line steam reforming, *Chemical Engineering Journal*, Vol.296, 2016, pp. 191–198.
- [26] G.A. Buchner, K.J. Stepputat, A.W. Zimmermann, R. Schomäcker, Specifying Technology Readiness Levels for the Chemical Industry, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol.58, No.17, 2019, pp. 6957–6969.

- [27] H. Hellsmark, J. Frishammar, P. Söderholm, H. Ylinenpää, The role of pilot and demonstration plants in technology development and innovation policy, *Research Policy*, Vol.45, No.9, 2016, pp. 1743–1761.
- [28] The Importance of a Pilot Plant, EPIC Pilot Plants. Saatavissa (viitattu 26.2.2023): <https://pilotplantdesign.com/blog/the-importance-of-a-pilot-plant>
- [29] How does the pilot plant work and how much does it cost? ECTC Chemical Technologies, 2021. Saatavissa (viitattu 26.2.2023): <https://ect-center.com/blog/pilot-plant-en#rec310009552>
- [30] D. Frączak, G. Fabiś, B. Orlińska, Influence of the Feedstock on the Process Parameters, Product Composition and Pilot-Scale Cracking of Plastics, *Materials*, Vol.14, No.11, 2021.
- [31] H. Li, H.A. Aguirre-Villegas, R.D. Allen, X. Bai, C.H. Benson, G.T. Beckham, et al. Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges, *Green Chemistry: an international journal and green chemistry resource: GC*, Vol.24, No.23, 2022, pp. 8867–9332.
- [32] V. Sinha, M.R. Patel, J.V. Patel, Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review, *Journal of Polymers and the Environment*, Vol.18, No.1, 2010, pp. 8–25.
- [33] D. Simón, A.M. Borreguero, A. de Lucas, J.F. Rodríguez, Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability, *Waste management*, Vol. 76, 2018, pp. 147–171.
- [34] About Itero, Itero. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.itero-tech.com/about-itero>
- [35] G. Smith, Constant improvement: Delivering commercial progress through research and development, Itero. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.itero-tech.com/news/research-and-development-chemical-recycling-iver>
- [36] Projects – Our technology in action, Itero. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.itero-tech.com/projects>
- [37] Itero - Dutch demonstration plant for chemical recycling, Plasteurope. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): https://www.plasteurope.com/news/ITERO_t246832/
- [38] OMV scales up innovative ReOil® recycling technology at Schwechat refinery, OMV Group, 2021. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.omv.com/en/news/221220-omv-scales-up-innovative-reoil-recycling-technology-at-schwechat-refinery>
- [39] Plastic2Plastic: ReOil completes the circle in plastics recycling, OMV Group, 2021. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.omv.com/en/blog/plastic2plastic-reoil-completes-the-circle-in-plastics-recycling>
- [40] ReOil: Getting crude oil back out of plastic, OMV Group, 2018. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.omv.com/en/blog/reoil-getting-crude-oil-back-out-of-plastic>

- [41] Production started at Quantafuel's new recycling line in Kristiansund, Quantafuel, 2021. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.quantafuel.com/media#/pressreleases/production-started-at-quantafuels-new-recycling-line-in-kristiansund-3148255>
- [42] Pilot plant in Kristiansund, Quantafuel. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.quantafuel.com/Kristiansund>
- [43] Cooperation aims to become the leading plastic upstream player in the Nordics, Energy Northern Perspective, 2022. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://energynorthern.com/2022/04/04/cooperation-aims-to-become-the-leading-plastic-upstream-player-in-the-nordics/>
- [44] Our Technology, Quantafuel. Saatavissa (viitattu 22.3.2023): <https://www.quantafuel.com/our-solution/technology>
- [45] M. Fricker, Rohnert Park's Resynergi wants microwaved plastics to power your truck fleet, The Press Democrat, 2022. Saatavissa (viitattu 24.3.2023): <https://www.pressdemocrat.com/article/north-bay/rohnert-park-company-wants-microwaved-plastics-to-power-your-truck-fleet/>
- [46] The CMAP™ System, Resynergi. Saatavissa (viitattu 24.3.2023): <https://www.resynergi.com/the-technology>
- [47] The Circular Economy of Plastics, Resynergi. Saatavissa (viitattu 24.3.2023): <https://www.resynergi.com/circularity>
- [48] Revolutionizing Plastic Circularity: Modular and Efficient Waste Conversion, Resynergi. Saatavissa (viitattu 24.3.2023): <https://www.resynergi.com/#resynergi-revolutionizing-plastic-circularity>
- [49] About Us, Anellotech. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://anellotech.com/about-us>
- [50] Muovisanastoa, Muoviteollisuus ry. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=15>
- [51] H. Dembicki, Practical petroleum geochemistry for exploration and production, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2017, 344 p.
- [52] Anellotech Demonstrates New Direct Route to Light Olefins and BTX from Conversion of Mixed Plastic Waste in 0.5 TPD Pilot Plant, Anellotech, 2022. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://anellotech.com/press/anellotech-demonstrates-new-direct-route-light-olefins-and-btx-conversion-mixed-plastic-waste>
- [53] Plas-TCat™ for Mixed Plastic Recycling, Anellotech. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://anellotech.com/plas-tcat>
- [54] Anellotech Presentation, Anellotech, 2022. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://anellotech.com/sites/default/files/Anellotech%20Presentation%20March%202022.pdf>
- [55] Who we are, NOVA Chemicals. Saatavissa (viitattu 18.3.2023): <https://www.novachem.com/who-we-are/>

- [56] About us, Enerkem. Saatavissa (viitattu 18.3.2023): <https://enerkem.com/company/about-us/>
- [57] NOVA Chemicals and Enerkem Advance Commercialization of Made-in-Alberta Chemical Recycling Technology, NOVA Chemicals, 2022. Saatavissa (viitattu 18.3.2023): <https://www.novachem.com/media-center/news-releases/nova-chemicals-and-enerkem-advance-commercialization-of-made-in-alberta-chemical-recycling-technology/>
- [58] K. Connolly, Nova Chemicals, Enerkem Move Forward with Advanced Recycling Pilot, Plastics today, 2022. Saatavissa (viitattu: 18.3.2023): <https://www.plasticstoday.com/waste-fuel/nova-chemicals-enerkem-move-forward-advanced-recycling-pilot>
- [59] VTT spins out Olefy to revolutionize circular plastic recycling, VTT, 2022. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/vtt-spins-out-olefy-revolutionize-circular-plastic-recycling>
- [60] G. Giordano, Finnish Company Converts Waste Plastic into Infinitely Recyclable Material, Plastics Today, 2022. Saatavissa (viitattu 25.3.2023): <https://www.plasticstoday.com/advanced-recycling/finnish-company-converts-waste-plastic-infinitely-recyclable-material>
- [61] BP at a glance, bp. Saatavissa (viitattu: 18.3.2023): <https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/bp-at-a-glance.html>
- [62] BP's new technology to enable circularity for unrecyclable PET plastic waste, bp, 2019. Saatavissa (viitattu: 18.3.2023): <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-new-technology-to-enable-circularity-for-unrecyclable-pet-plastic-waste.html>
- [63] About us, Cumapol Polyester Upgrading. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://www.cumapol.nl/cumapol/about-us/>
- [64] CuRe: Join the polyester rejuvenation revolution!, Cumapol Polyester Upgrading. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://www.cumapol.nl/curepolyester/>
- [65] FAQ, CuRe Polyester Rejuvenation. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://curetechnology.com/faq/>
- [66] I. Vollmer, M.J. Jenks, M.C. Roelands, R.J. White, T. van Harmelen, P. de Wild, et al. Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste, *Angewandte Chemie (International ed)*, Vol.59, No.36, 2020, pp. 15402–15423.
- [67] Competition looming for Ioniqua, KIVI Engineering Society. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://www.kivi.nl/afdelingen/nederlandse-procestechnologen/nieuws/artikel/competition-looming-for-ioniqua>
- [68] About CuRe, CuRe Polyester Rejuvenation. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://curetechnology.com/about-cure-technology/>
- [69] E. Thoden van Velzen, M. Brouwer, C. Stärker, F. Welle, Effect of recycled content and rPET quality on the properties of PET bottles, part II: Migration, Packaging technology & science, Vol.33, No.9, 2020, pp. 359–371.

- [70] The CuRe Pilot Plant is up and running, CuRe Polyester Rejuvenation. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://curetechnology.com/news/the-cure-pilot-plant-is-up-and-running/>
- [71] X. Hu, D. Ma, G. Zhang, M. Ling, Q. Hu, K. Liang, et al. Microwave-assisted Pyrolysis of Waste Plastics for Their Resource Reuse: A Technical Review, Carbon Resources Conversion, 2023.
- [72] R. Miandad, M.A. Barakat, A.S. Aburizaiza, M. Rehan, A.S. Nizami, Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review, Process Safety and Environmental Protection, Vol.102, 2016, pp. 822–838.
- [73] E. Barnard, J.J. Rubio Arias, W. Thielemans, Chemolytic depolymerisation of PET: a review. Green chemistry : an international journal and green chemistry resource : GC, Vol.23, No.11, 2021, pp. 3765–3789.
- [74] M. Bröckl, H. Kiuru, S. Heads, K. Kämäräinen, J. Patronen, K. Luoma-aho, et al. Jätteenpolton kiertotalous- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjaukskeinoin, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 2021. Saatavissa (viitattu 3.3.2023): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162690/VNTEAS_2021_08.pdf
- [75] M.G. Davidson, R.A. Furlong, M.C. McManus, Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review, Journal of cleaner production, Vol.293, 2021.
- [76] J. Jiang, K. Shi, X. Zhang, K. Yu, H. Zhang, J. He, et al. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review, Journal of environmental chemical engineering, Vol.10, No.1, 2022.
- [77] Muovien kiertotalous, VTT. Saatavissa (viitattu 8.4.2023): <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/muovien-kiertotalous>