



## **Kierrätysmuovien prosessointi uusiomateriaaleiksi**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2024

Ilkka Tenhunen

Tarkastaja: Dosentti Arto Pihlajamäki

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Ilkka Tenhunen

### **Kierrätysmuovien prosessointi uusiomateriaaleiksi**

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2024

30 sivua, 6 kuvaa, 1 taulukko ja 1 liite

Tarkastaja: Dosentti Arto Pihlajamäki

Avainsanat: muovi, kierrätysprosessi, kemiallinen kierrätys, mekaaninen kierrätys

Muovien käyttö maailmanlaajuisesti kasvaa koko ajan. Vaikka muoveille etsitään korvaavia materiaaleja, ei niiden käytön lopettaminen tai raju väheneminen ole realistista. Muovien suuret tuotantomäärät johtuvat sen yleishyödyllisyydestä monissa tuotteissa, mutta tästä kaikesta muovista syntyy elinkaarensa lopulla paljon muovijätettä. Tämän takia tarvitaankin entistä parempia kierrätysprosesseja, joilla saadaan kasvavat muovimäärät kierrätettyä, kun ne lopulta päätyvät jätteeksi.

Tässä kandidaatintyössä käydään läpi yleisimmät muovit, niiden kierrätysmäärät sekä kierrätystavat. Pääasiassa tehdään katsaus yleisimmistä kierrätysprosesseista, esitellään nämä prosessit sekä niiden edut ja haitat. Samalla tehdään pieni katsaus muutaman suomalaisen yrityksen kehittämiin ja käyttämiin kierrätysprosesseihin.

Tutkimuksen tuloksena todettiin, että mekaaniset kierrätysmenetelmät ovat tällä hetkellä parhaimpia ja eniten käytettyjä muovin kierrätysprosesseja. Muovinkierrätyksen tulevaisuuden kannalta kemialliset kierrätysprosessit ovat kuitenkin parempia, mutta niiden teknologia tarvitsee kehitystä ennen kuin niiden täysi potentiaali tullaan saavuttamaan.

## Sisällysluettelo

### Tiivistelmä

1	Johdanto.....	4
2	Yleisimmät muovit .....	5
3	Muovien kierrätys.....	8
3.1	Muovien kierrätys Suomessa ja EU:ssa.....	8
3.2	Muovijätteen käsittely.....	8
4	Mekaaniset kierrätysprosessit.....	10
4.1	Ekstruusio .....	10
4.2	Valut.....	11
5	Kemialliset kierrätysprosessit.....	13
5.1	Pyrolyysi .....	13
5.2	Kaasutus.....	14
5.3	Solvolyysi .....	16
5.4	Katalyyttinen krakkaus .....	17
5.5	Vetyteknologiat.....	18
5.5.1	Hydrokrakkaus.....	18
5.5.2	Hydropyrolyysi .....	19
6	Yritysten käyttämät kierrätysprosessit .....	20
6.1	VTT.....	20
6.2	Fortum.....	20
6.3	Neste .....	21
7	Johtopäätökset .....	22
	Lähteet .....	25

### Liitteet

Liite 1. Materiaalit ja menetelmät

# 1 Johdanto

Muoveja on nykymaailmassa kaikkialla, sitä käyttävät niin yksittäiset kuluttajat kuin kansainväliset suuryritykset, ja sitä tuotetaan jo noin 430 miljoonaa tonnia maailmalla vuodessa (UN, 2023). Moni tuote valmistetaan suoraan muovista, ja jos tuotteessa ei ole itsessään muovia, se on todennäköisesti pakattu muoviin. Muovin käyttö kasvaa koko ajan sen ominaisuuksien takia, se on kevyttä, inerttiä, kestäväää sekä helppoa ja halpaa valmistaa (Roschier *et al.*, 2020). Mutta näiden hyvien puolien lisäksi sillä on yksi iso huono puoli, siitä syntyy paljon jätettä. Suuri osa muovituotteista on kertakäyttöisiä, ja kestumuvituotteetkin rikkoutuvat joskus. Käytännössä siis kaikki muovi päättyy enemmän tai myöhemmin jätteeksi, joka maatuu erittäin hitaasti.

Nykyään muovit ovat yksi suurimpia haittoja luonnolle, koska niitä ei kierrätetä tarpeeksi. Muovit huonon maatuvuutensa takia säilyvät luonnossa periaatteessa loputtomiin ja voivat joutua eliöihin joko kokonaisina paloina tai mikromuovina (Roschier *et al.*, 2020). Jos muovi saataisiin kierrätettyä jätteeksi joutumisen sijaan, voitaisiin vähentää muovijätteen haittavaikutuksia ja vähentää uusien resurssien käyttöä muovien valmistamiseen. Eri kierrätysprosesseilla voidaan muuttaa vanha muovi uudeksi muoviksi, energiaksi, hiilivedyiksi tai muiksi raaka-aineiksi. Näillä eri prosesseilla on omat hyvät ja huonot puolensa ja monia prosesseja pyritään koko ajan kehittämään tehokkaammiksi ja taloudellisesti kannattavammiksi.

Tässä työssä käydään läpi yleisimpiä muoveja, niiden kierrätysmääriä Suomessa ja EU:ssa, sekä mitä muovin kierrätysprosesseja on olemassa, esitellään niiden toimintaperiaatteet, hyvät ja huonot puolet ja mihin ne soveltuvat. Samalla tehdään katsaus muutaman suomalaisen yrityksen kehittämistä ja käyttämistä muovin kierrätysprosesseista. Lopuksi vedetään yhteen prosessien hyödyt ja haitat sekä arvioidaan eri prosessien potentiaalia ja käyttöä tulevaisuudessa.

## 2 Yleisimmät muovit

Muoveja on monenlaisia, mutta tässä työssä keskitytään vain yleisimpien muovien kierrätykseen, koska ne käsittävät valtaosan valmistetuista ja käytetyistä muoveista. Yleisimmät käytössä olevat muovit ovat polyeteenitereftalaatti eli PET, korkeatiheyksinen polyeteeni PE-HD, matalatiheyksinen polyeteeni PE-LD, polyvinyylikloridi PVC, polypropeeni PP ja polystyreeni PS. On myös muita muovimateriaaleja sekä edellä mainittujen muovien yhdistelmiä (Muoviteollisuus ry). Alla olevassa kuvassa 1 on esitettyinä näiden muovien materiaalimerkinnät ja yleisiä ominaisuuksia. Kierrättämisen kannalta on huomioitavaa, että merkinnästä riippumatta, jos materiaalista yli puolet on muovia, sen voi kierrättää kuten tavallisen muovin. (Sumi Oy a)

MATERIAALI-MERKINTÄ	NIMI	YLEISET OMINAISUUDET
	Polyeteenitereftalaatti	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä
	Polyeteeni high-density	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta
	Polyvinyylikloridi	Erittäin monimuotoinen ja -piirteinen
	Polyeteeni low-density	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta
	Polypropeeni	Jäykkä, sitkeä, hyvin monikäyttöinen
	Polystyreeni	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)
	Muut	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät ja muut materiaalit

Kuva 1. Yleisten muovien merkintöjä ja ominaisuuksia (Sumi Oy a)

Polyeteenitereftalaattia käytetään esim. virvoitusjuoma-, kastike- ja öljypulloissa sekä ruokapurkeissa. Noin puolet kotitalouksien muovijätteestä on polyeteenitereftalaattia (Goodship, 2007). Sitä käytetään kertakäyttöisenä pakkausmateriaalina, koska sen turvallinen puhdistaminen on vaikeaa ilman kierrättämistä. (Vedenpuhdistaminen.com, 2022)

Korkeatiheksinen polyeteeni on kestävä ja kestää myös lämpötilan vaihteluita, mikä tekee siitä hyödyllisen materiaalin sisällä sekä ulkona käytettävien tuotteiden valmistuksessa. Sitä käytetään esim. kodinpuhdistusaineiden pakkauksissa, ämpäreissä ja leluissa. (Vedenpuhdistaminen.com, 2022)

Polyvinyylidikloridi on hyvin kestävä ja PET:in kanssa laajimmin käytetty, vaikka se on vaikeasti kierrätettävä muovi (Vedenpuhdistaminen.com, 2022). Sen kierrättämistä vaikeuttavat sen pehmentämisessä käytetyt ftalaatit, joiden tarkoituksena on tehdä PVC-muovista taipuisampaa, mutta niiden myös epäillään aiheuttavan erilaisia terveyshaittoja. (THL, 2024)

Matalatiheksinen polyeteeni on kestonuovi, joka on kohtuullisen turvallinen. PE-LD joustavampaa kuin PE-HD-muovi, ja sitä käytetäänkin paljon erilaisissa muovipusseissa, kuten ostoskasseissa ja käärepusseissa. (Vedenpuhdistaminen.com, 2022)

PP- muovi kestää hyvin lämpöä ja on melko kevyttä. Sitä valmistetaan ja käytetään paljon, koska siitä valmistetaan useita kertakäyttötuotteita, kuten kertakäyttöastioita ja -aterimia. (Vedenpuhdistaminen.com, 2022)

Polystyreeni on halpa ja kevyt muovi, jota käytetään ruoka-astioissa ja kertakäyttöisissä ruokailuvälineissä. Polystyreenin yksi muoto on styroksi, joka on ilmavaa ja näin ollen hyvin kevyttä, joten sitä käytetään usein pakkauksissa sekä eristyksissä. Rakenteensa vuoksi styroksi on haurasta, joten sitä joutuu helposti ympäristöön, ja sen sisältämä styreeni on terveydelle vaarallista. (Vedenpuhdistaminen.com, 2022)

Muita muoveja ovat esimerkiksi polyvinyylialkoholi, etyleenivinyylialkoholi, polykarbonaatti, silikonimuovit, polyuretaani ja polyamidit. Polyvinyylialkoholi on hyvin kestävä alkoholiyhdistelmänsä takia, mutta huonon vedenkestävyyden ja muokattavuuden takia sitä käytetään lähinnä myrkyllisten aineiden pakkaamisessa. Etyleenivinyylialkoholi on puolestaan hyvä eristämään hajuja ja happea, minkä takia siitä tehdyt pakkaukset pitävät ruuan maun ja

laadun hyvin. Polykarbonaatti on kova ja jäykkä muovi, joka voidaan steriloida. Sitä käytetään kovuutensa takia urheiluvälineissä ja muovi-ikkunoissa sekä steriloitavuutensa ansiosta lääkinnällisissä pakkauksissa. Silikonimuovit ovat lämpöä, kylmyyttä ja säätä kestäviä muoveja, jotka kestävät myös hyvin kemikaaleja sekä öljyjä. Näiden kaikkien ominaisuuksien takia silikonimuoveja käytetäänkin laajalti eri aloilla, auto- ja ilmailuteollisuudesta aina keittiövälineisiin ja terveydenhoitoon asti (Shit & Shah, 2013). Polyuretaanit ovat valmistustavastaan riippuen joko vaahtomuoveja tai kestäviä ja elastisia. Sitä käytetään esimerkiksi tekstiileissä ja auton osissa. Yleisin käyttökohde polyuretaanille on polyuretaanivaaho, jota käytetään rakentamisessa lämmöneristeenä (Das & Mahanwar, 2020). Polyamidit ovat kovia ja hyvin lämpö kestäviä muoveja, jotka kestävät hyvin viiltoja ja pistoja, minkä takia niitä käytetään esimerkiksi kankaissa ja naruissa. (Selke *et al.*, 2021)

## 3 Muovien kierrätys

### 3.1 Muovien kierrätys Suomessa ja EU:ssa

Muovien kierrättäminen on tärkeää niistä saatavien raaka-aineiden ja energian takia sekä ympäristön suojelemisen kannalta. Suomessa muoveista kierrätetään pakkausmuoveja, ja niiden kierrätys onkin verrattain hyvällä tasolla. Pakkausmuovit jaotellaan kuluttaja- ja yrityspakkauksiin sekä pantillisiin pakkauksiin, eli muovipulloihin. Suomessa kuluttaja- ja yrityspakkauksista kierrätetään 27 % (Muoviteollisuus ry). Pantillisten pakkausten kierrätyksessä Suomi sijoittuu korkealle kierrättämällä 90 % pantillisista muovipakkauksista. (Palpa, 2023)

Plastics Europe 2024 raportin mukaan vuonna 2022 Euroopassa kerättiin 32,3 miljoonaa tonnia kulutusmuovia, joista kierrätettiin 26,9 %. Pakkausmuovit olivat ylivoimaisesti eniten kerätty jätemuovilaatu, kattaen noin 57 % kaikesta Euroopassa kerätystä muovijätteestä. Pakkausmuoveilla kierrätysprosentti oli puolestaan korkeampi. Pakkausmuoveista 37,8 % kierrätettiin, 44,9 % käytettiin energiana ja loput 17,3 % joutui kaatopaikalle. Pakkausmuovien kierrättäminen on vuosien 2018–2022 välillä noussut noin 22 prosenttia. Raportin mukaan kaikesta Suomessa kerätystä muovijätteestä kierrätettiin 20 %, energiaksi poltettiin 79 % muovijätteestä ja kaatopaikalle joutui hyvin vähän muovia, vain noin 1 %. Pakkausmuovijätteestä Suomessa puolestaan kierrätettiin 28 % ja loput 72 % poltettiin energiaksi, joten yhtään pakkausmuovia ei päätenyt kaatopaikalle. Suomen tavoitteena on nostaa pakkausmuovin kierrätys 50 %:iin vuoteen 2025 mennessä ja 55 %:iin vuoteen 2030 mennessä (Sumi Oy b). Muuhun Eurooppaan nähden Suomessa hyvin vähäinen osa muovijätteestä joutuu kaatopaikalle, mutta myös kierrätettäväksi menevän jätteen osuus on Suomessa pienempi kuin Euroopassa keskimäärin. Kierrätetyn kulutusmuovin osuus uusissa muovituotteissa kuitenkin nousi 7,2 % vuodesta 2018 12,6 % vuoteen 2022. (Plastics Europe, 2024)

### 3.2 Muovijätteen käsittely

Muovien kierrätykseen on olemassa monia prosesseja, jotka voidaan jakaa mekaanisiin kierrätysprosesseihin ja kemiallisiin kierrätysprosesseihin. Suurin osa muovista kierrätetään

mekaanisilla prosesseilla, mutta kemiallisia kierrätysprosesseja, jotka sopivat mekaanisia kierrätysprosesseja paremmin monimutkaisemmille jättemateriaaleille, on viime aikoina kehitetty. (Tenhunen-Lunkka, 2020)

Kierrätysmuovien käsittely aloitetaan yleensä pienentämällä ja pesemällä muovijäte, mutta tämä riippuu siitä, mitä prosessia käytetään. Kaikki muovin kierrätysprosessit eivät välttämättä vaadi muovilta puhtautta tai pientä kokoa. Muoveja kierrätettäessä muovijäte voidaan käsitellä sellaisenaan sekajätteenä tai jätteestä voidaan eritellä eri muovit erilleen. Muovijäte on mahdollista lajitella manuaalisesti, mutta manuaalinen lajittelu on kuitenkin epäkäytännöllistä sen vaatiman työmäärän takia. Erittely yleisimmille muoveille voidaan tehdä mekaanisesti upotus-kellutus -menetelmällä. PP-, PE-LD – ja PE-HD-muovien tiheys on alle  $1 \text{ g/cm}^3$ , jolloin ne kelluvat vedessä, ja PET-, PS-, ja PVC-muovien tiheys on yli  $1 \text{ g/cm}^3$ , joten ne uppoavat pohjalle. PET- ja PVC-muoveilla on sama tiheys, joten niiden erotteluun käytetään röntgenfluoresenssia, jonka avulla tunnistetaan PVC:n sisältämiä klooriatomeja. Toinen käytetty tapa on IR-lajittelu, jossa polymeerit tunnistetaan toisistaan infrapunasäteilyllä niiden absorboimien valon aallonpituuksien perusteella. Muissa erottelutavoissa muovit voidaan erotella värin, staattisen varauksen tai pintaominaisuuksien perusteella, riippuen lajiteltavan muovijätteen sisällöstä. (Goodship, 2007)

## 4 Mekaaniset kierrätysprosessit

Mekaanisissa kierrätysprosesseissa peruseriaatteena on muovijätteen jauhaminen pieniksi paloiksi, jotka käytetään uusien muovituotteiden valmistukseen. Mekaanisessa kierrätyksessä muovijäte ensin erotellaan ja lajitellaan. Lajittelun jälkeen muovijäte pestään, jotta kierrätettyyn tuotteeseen tulisi mahdollisimman vähän kierrätysmuovin laatua huonontavia epäpuhtauksia. Lopuksi jäte jauhetaan granulaatiksi (Ragaert, et al., 2017). Granulaattia voidaan käyttää uusien muovien valmistamiseen esimerkiksi ruiskupuristuksessa tai suulakepuristuksessa. (Schyns and Shaver, 2021)

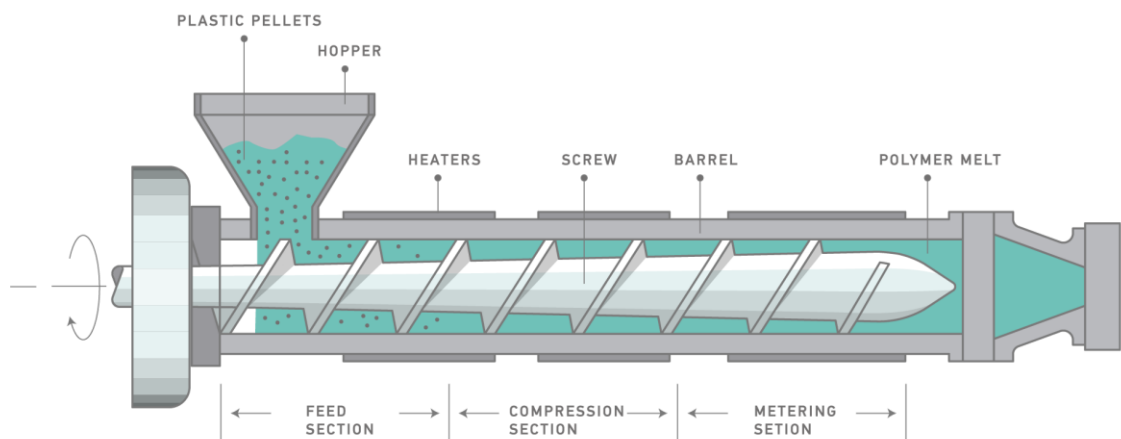
Mekaaninen kierrättäminen on tämänhetkisesti paras tapa kierrättää muoveja. Mekaaniset kierrätysprosessit sopivat parhaiten muovijätteelle, joka on hyvin eroteltu eli sisältää mahdollisimman vähän eri muoveja. Uusiomuovin laatu laskee, mitä enemmän eri muoveja sen valmistamiseen on käytetty (Astikainen, 2021). Kaikkea muovijätettä ei voida kierrättää mekaanisesti. Mekaanista kierrättämistä tulisi kuitenkin käyttää aina, kun se on mahdollista, koska ei-mekaanisten prosessien hiilijalanjälki on suurempi. (VTT)

### 4.1 Ekstruusio

Ekstruusio eli suulakepuristus on erilaisille materiaaleille, kuten muoveille, metalleille ja ruualle, tarkoitettu muokkaamismenetelmä. Ekstruusiossa muokattava materiaali syötetään sylinteriin, jonka keskellä on ruuvi. Ruuvi työntää pyöriessään syötettyä materiaalia eteenpäin kierteiden avulla. Sylinterin ulkoreunoilla on yleensä myös lämmittimiä, jotka lämmitävät sylinteriä ja sen sisällä olevaa materiaalia helpommin muokattavaksi. Sylinterin päässä on suutin tai muotti, josta puristettu materiaali tulee ulos ja jäädytetään muotoonsa. (Hyvärinen, et al., 2020) Kuvassa 2 on esitettyä ekstruusiossa käytettyä lämpöä sekä ruuvin pyöriminen rikkovat muovin polymeeriketjuja lyhyemmiksi, mikä heikentää ekstruusiossa tuotetun muovin mekaanisia ominaisuuksia. Muovin laadun heikkenemistä ekstruusiossa voidaan vähentää tai ainakin hallita säätämällä prosessin olosuhteita eli pääasiassa lämpötilaa ja ruuvin pyörimisnopeutta. Kierrätettävän muovin kemialliset

ominaisuudet vaikuttavat myös, koska eri muovit kestävät ekstruusiossa eri tavoin. Kierrätetyn muovin kestävyyttä voidaan parantaa lisäämällä granulaatin sekaan niin sanottua neitsytpolymeeriä, joka on uutta kierrättämätöntä polymeeriä. Ekstruusio on eniten käytetty tapa käsitellä granuloitua muovijätettä. (Schyns and Shaver, 2021)

Yleisimmät ekstruusiossa käytetyt ekstruusiolaitteet ovat yksöisruuvi- ja kaksoisruuvipuristimet. Kaksoisruuvipuristimia on olemassa kahta eri lajia. Ne eroavat siinä, miten ruuvit toimivat puristimessa. Ruuvit voivat olla joko toisiinsa kietoutuneita tai toisiinsa kietoutumattomia. Parhaimmiksi kaksoisruuvipuristimista on todettu täysin kietoutunut vastakkaisiin suuntiin pyörivä puristin. (Hyvärinen, et al., 2020)



Kuva 2. Yksöisruuvipuristin osineen. (Elastron)

## 4.2 Valut

Ektruusion jälkeen käytetyimpiä käsittelytapoja kierrätetyille granulaatille sekä uudelle muoville ovat ruiskuvalu, rotaatiovalu ja puhallusmuovaus. Ruiskuvalussa muovimassa kuumentetaan ja sekoitetaan ennen ruiskuun syöttämistä. Ruiskuun syötetään massaa valuun oikean kokoinen panos, joka ruiskutetaan paineella suljettuun muottiin. Muovin jäähtyttyä muotissa muotoonsa muotti aukeaa ja valmis tuote poistetaan muotista. (Goodship, 2007)

Rotaatiovalu eroaa ruiskuvalusta siten, että muovimassaa ei lämmitetä etukäteen eikä sitä tarvitse syöttää muottiin paineella. Rotaatiovalussa muovimassa lämmitetään suljetussa

muotissa ja muottia pyöritetään, jolloin muotin sisäpinta peittyy muovikerrokseen. Tämän jälkeen muotti jäädytetään. Rotaatiovalu sopii hyvin isojen onttojen ja saumattomien tuotteiden valmistukseen. (Ogila *et al.*, 2017)

Puhallusmuovaus on rotaatiovalun tavoin onttojen tuotteiden valmistamiseen käytetty menetelmä, mutta soveltuu myös pienempien tuotteiden, kuten muovipullojen, valmistukseen. Puhallusmuovauksessa muovimassa kuumennetaan ennen muottiin syöttöä. Kun kuuma massa on muotissa, puhalletaan muottiin paineella ilmaa, joka työntää muovin muotin sisäreunoille. (Goodship, 2007)

## 5 Kemialliset kierrätysprosessit

Kemiallisten kierrätysprosessien peruseräteenä on depolymeroida eli katkoa muovin polymeerit monomeereiksi, eli hiilivedyiksi tai öljyiksi, joita voidaan käyttää uusien materiaalien valmistuksessa raaka-aineina. Kemiallisessa kierrätyksessä polymeerien pilkkomiseen käytetään kemiallisia reaktioita. Kierrätettävän muovin puhtaus ei ole yhtä merkittävää kuin mekaanisessa kierrätyksessä, koska muovissa olevat epäpuhtaudet pystytään muovin hajottamisen jälkeen erottamaan. (Roschier *et al.*, 2020)

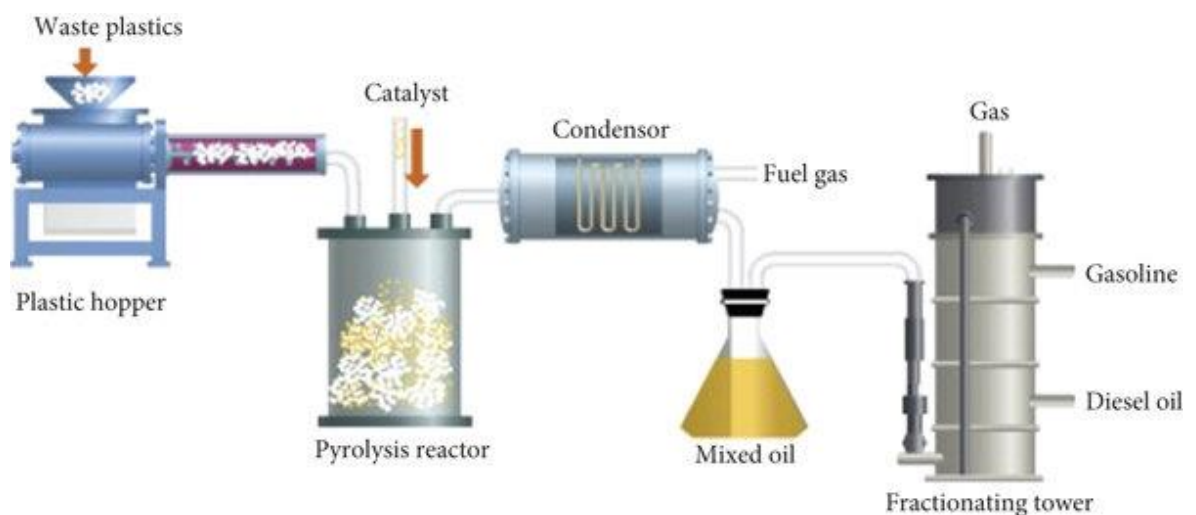
### 5.1 Pyrolyysi

Pyrolyysi on termokemiallinen prosessi, jossa pyrolysoitavan materiaalin monomeereiksi pilkkominen tapahtuu hapettomissa tai vähähappisissa oloissa. Depolymerisaatioreaktion apuna voidaan käyttää katalyyttiä. Reaktoreina pyrolyysissä käytetään yleensä sekoitussäiliöreaktoria, leijupetireaktoria tai ruuvireaktoria (Ragaert, et al., 2017). Pyrolyysissä kierrätettävä muovi lämmitetään useiden satojen asteiden lämpötilaan 300–900°C välille, mutta yleensä noin 500°C tienoille (Jiang *et al.*, 2022). Kuvassa 3 on esitettyä pyrolyysiprosessiä. Reaktiossa käytettävä lämpötila tosin riippuu siitä, minkälaista pyrolyysiprosessia käytetään. Pyrolyysiprosesseja on neljää eri kategoriaa riippuen prosessin olosuhteista. Prosesseja ovat hidas, nopea, flash ja katalyyttinen pyrolyysi. Hitaassa pyrolyysissä lämpötila pidetään alhaisena ja prosessi kestää pitkään. Nopeassa pyrolyysissä käytetty lämpötila on korkeampi ja se voi nousta jopa 1030°C, mutta yleensä lämpötila pysyy 500°C tienoilla. Tosin käytettävä lämpötila riippuu siitä, mitä tuotetta halutaan. Flash pyrolyysissä lämpötila nostetaan hyvin nopeasti hyvin korkeaksi noin 900–1300°C:n lämpötilaan, jonka takia olosuhteiden ei välttämättä tarvitse olla hapettomia. Korkean kuumuuden takia prosessi voi olla hyvin lyhyt, kestäen yleensä alle 0,5 sekuntia. Katalyyttisessä pyrolyysiprosessissa käytetään korkean lämpötilan sijasta katalyyttiä pilkkomaan polymeerit monomeereiksi. Katalyyttinen pyrolyysi tapahtuu 350–550°C lämpötilassa, mikä on muita pyrolyysiprosesseja selvästi alhaisempi, lukuun ottamatta hidasta pyrolyysiä. (Kabeyi & Olanrewaju, 2023)

Katalyyttiä käytetään reaktion avustamiseen sekä sillä estetään epätoivottujen molekyylien, kuten dioksiinien ja furaanin, muodostumista. Katalyyttiä käytettäessä voidaan myös

lyhentää reaktion viipymääikaa ja alentaa lämpötilaa. Pyrolyysissä yleisiä käytettyjä katalyyttejä ovat MCM-41, FCC katalyytti ja alumiinisilikaattiseokset. Katalyyttinä voidaan myös käyttää metallioksiedeja ja mesohuokoisia materiaaleja. (Miandad *et al.*, 2016)

Pyrolyysissä kuumennuksessa saadut kaasut erotellaan ja tislataan öljyiksi ja kaasuiksi. Myös sivutuotteena syntyvä kiinteä hiilimusta pitää erottaa tuotteista. Näin pyrolyysistä tuotteina saadaan pyrolyysiöljyä ja hiilivetykaasuja, mutta pyrolyysiöljy yleensä joudutaan vielä vetykäsittämään happamuutensa takia. Ongelmana pyrolyysissä on kierrätettävässä muovijätteessä mahdollisesti oleva PVC-muovi, koska PVC-muovin sisältämä kloori muodostaa vedyn kanssa sivutuotteena vetykloridia (Ragaert, *et al.*, 2017). Mikäli vetykloridia syntyy, se joudutaan poistamaan tuotteista. Pyrolyysi on taloudellisesti kannattavaa vain suurissa määrissä, vaikka itse prosessi onkin yksinkertainen. (Niessner, 2023)



Kuva 3. Katalyyttinen pyrolyysiprosessi (Kabeyi & Olanrewaju, 2023)

## 5.2 Kaasutus

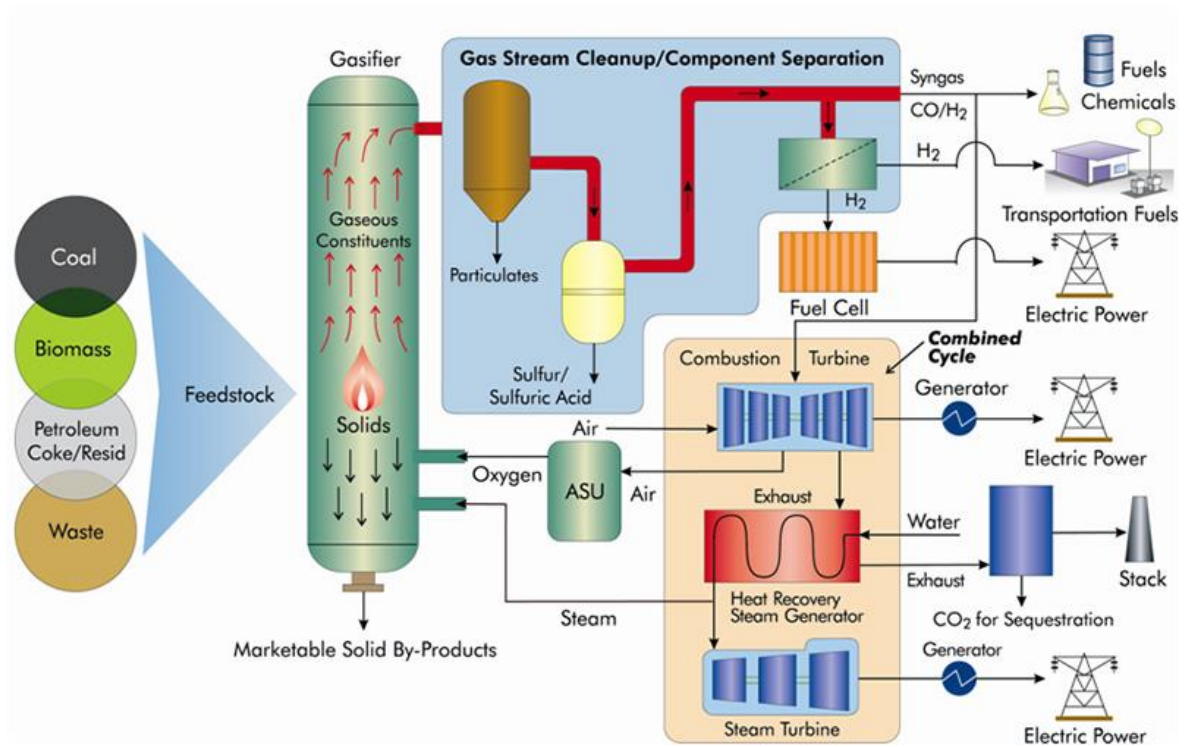
Kaasutuksessa muovijäte pilkotaan hieman samaan tapaan kuin pyrolyysissä. Kaasutuksessa jäte rikotaan monomeereiksi lämmittämällä se korkeaan lämpötilaan eli noin 700–1200°C vähähappisissa olosuhteissa (Mojaver *et al.*, 2023). Kaasutus on osittaishapetusreaktio, koska siinä käytetään vähemmän happea kuin normaalissa palamisessa, vain noin 25-40 prosenttia teoreettisesta tarpeesta (NETL b). Kaasutuksessa tapahtuu myös ennen itse kaasuttamista myös pyrolyysireaktio. Kaasuina kaasutuksessa voidaan käyttää ilmaa, höyryä, ilman

ja höyryn seosta tai puhdasta happea. Kaasutuksessa muovijätteestä syntyy tuotteena synteesikaasua, joka koostuu hiilimonoksidista ja vedystä. Prosessissa voi myös syntyä kaasun lisäksi hiiltä ja tervaa epätoivottuina sivutuotteina. Synteesikaasu voidaan polttaa sellaisenaan, jos halutaan energiaa, tai se voidaan muuttaa nestemäisiksi polttoaineiksi. Kuvassa 4 on esitettynä kaasutusprosessi. (Lopez *et al.*, 2018)

Kaasutusprosesseja on kolmea erilaista tyyppiä riippuen käytetystä kaasuttimesta. Näin lajiteltuja kaasutusprosesseja ovat liikkuva peti -kaasutus, leijupetikaasutus ja kanssavirtauskaasutus. Liikkuva peti -kaasutuksessa kaasutettava aine liikkuu painovoiman avulla hitaasti pedin läpi. Kaasutus tapahtuu yleensä vastavirtaan, eli reaktorin yläosasta syötetty kaasutettava aine kulkee reaktorissa alaspäin ja alhaalta syötetty kaasu virtaa ylöspäin sitä vastaan (Lopez *et al.*, 2018). Koska kaasutus tapahtuu vastavirtaan, kaasutuksessa syntynyt synteesikaasu kulkee ylöspäin kaasuttimessa kohti kaasuttamatonta ainetta. Tämän takia liikkuva peti -kaasutuksessa voidaan käyttää synteesikaasua kaasutettavan aineen esilämmittämisessä ja pyrolyysissä. (Higman and van der Burgt, 2008)

Leijupetikaasutus toimii muuten samoin, kuin liikkuva peti -kaasutus, mutta peti ei ole kiinteä vaan fluidisoitunut. Tämän takia leijupetikaasutuksessa raaka-aine ja kaasu sekoittuvat hyvin. Tämä puolestaan tekee aineen ja lämmön siirtymisestä pedissä paljon helpompaa, mikä auttaa reaktiota tapahtumaan, joten leijupetikaasutuksessa käytetään alempia lämpötiloja kuin muissa kaasutuksissa. Korkeammissa lämpötiloissa peti ei fluidisoidu kunnolla, koska tällöin alkaa muodostua fluidisointia haittaavia kuona-aineita. (Higman and van der Burgt, 2008)

Kanssavirtauskaasutuksessa kaasutus tapahtuu nimensä mukaan eli molemmat aineet syötetään reaktorin yläosasta ja ne virtaavat alaspäin. Kanssavirtauskaasutus tapahtuu korkeamassa lämpötilassa, kuin muut kaasutustavat ja pienemmällä syötettävän aineen partikkelikoilla, koska prosessin viipymäaika on vain muutamia sekunteja. Jotta aineensiirtoa tapahtuisi näin lyhyillä viipymäajoilla, syötettävä raaka-aine pilkotaan korkeintaan 100 mikrometrin kokoisiksi paloiksi ennen prosessiin syöttämistä. (Higman and van der Burgt, 2008)



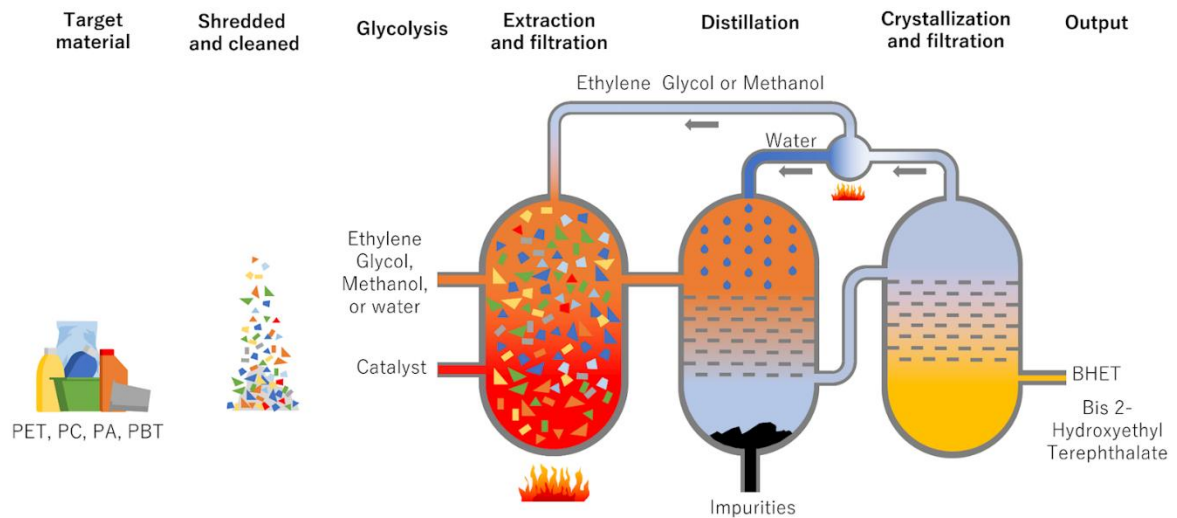
Kuva 4. Kaasutusprosessin ja siinä syntyvien tuotteiden käyttötarkoituksia. (NETL a)

### 5.3 Solvolyyssi

Solvolyyssi perustuu muovijätteen kemialliseen liuottamiseen. Solvolyyssissä liuotusreaktio voidaan tehdä eri liuottimilla. Peruseriaattena solvolyyssissä on rikkoa muovipolymeerien hiilen ja jonkun toisen atomin, kuten hapen, typen tai rikin, välisiä sidoksia. Tuotteina saatavat monomeerit vaihtelevat riippuen siitä, mitä muovia ja liuotinta prosessissa käytetään. Solvolyyssin hyötynä on, että se tapahtuu vain 80–280°C lämpötilassa, joten se ei vaadi yhtä korkeita lämpötiloja niin kuin muut kemiallisen kierrätyksen menetelmät. Huonoina puolina solvolyyssissä ovat pidemmät reaktioajat ja se, että eri muovit sisältävät eri alkuaineita ja erityyppisiä sidoksia, joten eri muovien kierrättämiseen pitää käyttää eri solvolyyssityyppejä. Pitkiä reaktioaikoja voidaan nopeuttaa katalyyteillä. (Jiang *et al.*, 2022)

Solvolyyssin tyyppi määräytyy käytetyn liuottimen mukaan. Solvolyyssireaktiossa voidaan liuottimena käyttää muun muassa alkoholia, vettä, happoa tai ammoniakkia. Solvolyyssireaktiota kutsutaan alkoholia liuottimena käytettäessä alkoholyysiksi, vettä liuottimena käytettäessä hydrolyysiksi, happoa liuottimena käytettäessä asidolyysiksi ja ammoniakkia

liuottimena käyttäessä ammonolyysiksi. Alla olevassa kuvassa 5 on kuvattu alkoholyysiin sisältyvä glykolyysiprosessi. (Xanthos & Patel, 1998)



Kuva 5. Solvolyyysiprosessi. (BPF)

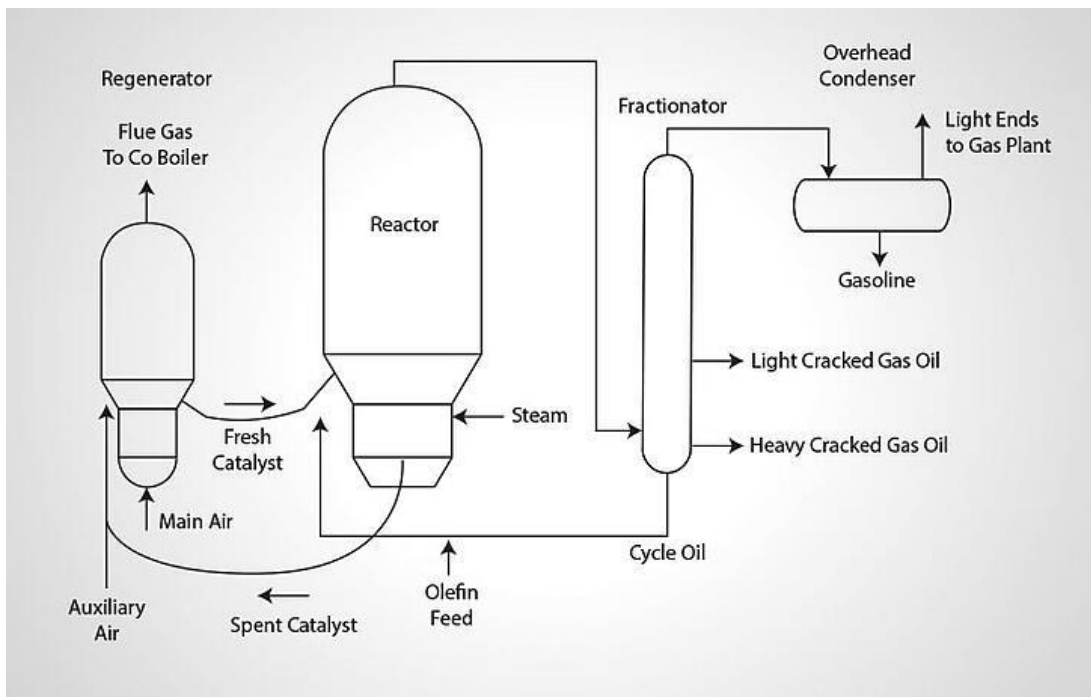
#### 5.4 Katalyyttinen krakkaus

Krakkaus on prosessi, jossa pitkiä hiilivetyketjuja pilkotaan lyhyemmiksi hiilivedyiksi rikkomalla hiilivetyketjun hiili-hiilisisidoksia. Krakkausta on olemassa kahdenlaista, lämpökrakkausta ja katalyyttistä krakkausta. Lämpökrakkauksessa hiili-hiilisisidosten rikkominen tapahtuu korkean lämpötilan avulla, kun puolestaan katalyyttisessä krakkauksessa sidokset rikotaan katalyytin avulla. Esimerkiksi aiemmin käsitelty pyrolyysi on lämpökrakkausprosessi. (Eagleson, 1993)

Katalyyttisen krakkauksen etuna on sen huomattavasti matalampi vaadittu lämpötila lämpökrakkaukseen nähden, mikä tekee sen käytöstä edullisempaa teollisuudessa. Katalyyttisessä krakkauksessa saadaan myös parempia saantoja tietyille tuotteille, kuin lämpökrakkauksessa. Katalyyttisen krakkauksen huonona puolena on taas katalyytin deaktivoituminen, mikä voi tapahtua, jos kierrätettävän jätteen seassa on epäpuhtauksia, jotka sisältävät kloori- tai typpiyhdisteitä. Myös epäorgaaniset materiaalit voivat haitata katalyytin toimimista krakkauksessa. Katalyytin voi myös puhdistaa polttamalla, mikäli siihen tarttuneet epäpuhtaudet palavat (FQE Chemicals, 2016). Katalyyttisessä krakkauksessa käytetään reaktoreina

pääasiassa leijupeti-, kiintopeti- ja liikkuva peti -reaktoreita. Kuvassa 6 on esiteltyä katalyyttinen krakkausprosessi. (Ragaert, et al., 2017)

Katalyyttisiä krakkausprosesseja on kahdenlaisia, nestefaasi- ja kaasufaasiprosesseja. Nämä prosessit eroavat toisistaan siinä, miten katalyytti on vaikutuksessa krakattavan aineen kanssa. Nestefaasikrakkausprosessissa katalyytti on suoraan syötetyn sulan materiaalin kanssa. Kaasufaasiprosessissa puolestaan katalyytti ei ole suoraan syötetyn materiaalin kanssa kosketuksessa, vaan ainoastaan krakkauksessa muodostuvat kaasut tulevat kosketuksiin katalyytin kanssa. (Ragaert, et al., 2017)



Kuva 6. Katalyyttinen krakkausprosessi. (FQE Chemicals, 2016)

## 5.5 Vetyteknologiat

### 5.5.1 Hydrokrakkaus

Hydrokrakkaus on katalyyttinen krakkausprosessi, jossa on mukana lisättyä vetyä. Se tapahtuu korkeassa 70 kPa:n paineessa noin 400°C lämpötilassa. Katalyyttinä käytetään esimerkiksi erilaisia nikkelin ja rikin seoksia, joissa voi mahdollisesti olla muita alkuaineita

lisättynä. Vedyn lisäämisen hyötyinä on, että sillä voidaan kierrättää muovien seoksia ja se poistaa myrkyllisiä sivutuotteita. Se myös parantaa kierrätyksestä saatavien tuotteiden laatua vähentämällä syntyvien aromaattisten yhdisteiden määrää ja tuottamalla enemmän vetyä sisältäviä hiilivetyjä, joten tuotteena saadaan suoraan laadukasta teollisuusbenssiiniä. Huonona puolena vedyn lisäämisessä on se, että vety on melko kallista sekä itse hydrokrakkausteknologia on kallista. (Ragaert, et al., 2017)

### 5.5.2 Hydroropyrolyysi

Integroitu hydroropyrolyysi ja hydrokonversio eli  $\text{IH}^2$  on katalyyttinen lämpökrakkausprosessi. Hydroropyrolyysi itsessään on prosessina samankaltainen kuin nopea pyrolyysi ja siinä käytetään leijupetireaktoria. Hydroropyrolyysissä syntyy vähemmän kuona-aineita kuin tavallisessa pyrolyysissä, joten tuotteiden puhdistaminen on helpompaa. Prosessin hyvinä puolina on, että sillä voidaan käsitellä melkein mitä tahansa raaka-ainetta ja muovijätteestä saadaan suoraan hiilivetyjä. Prosessissa syntyvää pyrolyysiöljyä ei myös tarvitse käsitellä, koska se ei ole yhtä hapanta eli se ei sisällä yhtä paljon rikkiyhdisteitä kuin tavallisesta pyrolyysistä syntyvä pyrolyysiöljy. Hydroropyrolyysin huonona puolena on vedyn hinta, kuten hydrokrakkauksessa. Hydroropyrolyysiteknologialla on todettu olevan taloudellisesti potentiaalia sen nykyistä laajempaan käyttöön markkinoilla, koska kaikki prosessin yksittäiset osat ovat jo kaupallisessa käytössä. (Ragaert, et al., 2017)

## 6 Yritysten käyttämät kierrätysprosessit

### 6.1 VTT

Teknologian tutkimuskeskus VTT on suomalainen tutkimus- ja teknologiayhtiö, joka on kehittänyt myös muovien kierrättämistä varten olevia uusia tekniikoita. VTT on kehittänyt Olefy-teknologiaa kemiallisena kierrätysprosessina sekä mekaanisena kierrätysprosessina VAREXia. VAREX on VTT:n kehittämä ekstruusioon perustuva mekaaninen kierrätyslinjasto. Linjasto on suunniteltu seuraamaan sulan virtauksen ominaisuuksia, jolloin virtaukseen voidaan lisätä tarkasti sopivia lisäaineita. VAREXIA voidaan käyttää muovipakkausten kierrättämisen lisäksi sähkö- ja elektroniikkajätteen sekä loppuun käytettyjen ajoneuvojen kierrättämiseen. (VTT)

Olefy-teknologian peruseräteenä on muovijätteen pilkkominen olefiineiksi ja muiksi hiilivedyiksi kaasuttamalla. Näin prosessissa syntyneitä olefiineja ja muita hiilivetyjä voidaan käyttää uusien muovien valmistusprosesseissa raaka-aineina. Olefy-prosessin etuna on, että kierrätetyn muovin laatu ei heikkene kierrätettäessä. Olefyllä muovin valmistamiseen tarvittavan naftan määrä on huomattavasti pienempi. (VTT, 2022)

### 6.2 Fortum

Fortum on suomalainen energiayhtiö, jonka pääasiallisina tuotteina ovat energia ja sähkö, mutta sen liiketoimintaan sisältyy jätteiden kierrättämistä ja kierrätettyjä tuotteita. Fortum Circo® on Fortumin valmistama mekaanisesti kierrätetty kierrätysmuovi, jota yritys valmistaa PP, PE-LD ja PE-HD laatuina granulaatteina. Fortum käyttää Circo® uusiomuoviseoksen valmistamisessa kuluttajamuovipakkauksia, joiden sekaan lisätään lisäaineita valmistettavan muovin haluttujen ominaisuuksien mukaan. (Fortum)

### 6.3 Neste

Neste on suomalainen öljynjalostusyhtiö. Nesteellä on täysin uusiutuvista ja kierrätetyistä raaka-aineista valmistettava Neste RE, joka on raaka-aine muovien valmistukseen. Uusiutuvat osat Neste RE:stä valmistetaan suurimmaksi osaksi jäteöljyistä ja -rasvoista. Nämä Neste valmistaa patentoimallaan NEXBTL-tekniikalla, jossa öljyä käsitellään vedyllä eri tavoin, esimerkiksi hydrokrakkaamalla (Laakkonen *et al.*, 2013). NEXBTL-tekniikalla Neste valmistaa Neste RE:n lisäksi myös uusiutuvia polttoaineita (Neste, 2020b). Kierrätetyt osat Neste RE:stä valmistetaan muovijätteestä kemiallisella kierrätyksellä. (Neste, 2020a)

## 7 Johtopäätökset

Tässä työssä oli tarkoituksena tutkia ja esitellä muovien kierrättämiseen käytettyjä prosesseja sekä käydä läpi muutaman suomalaisen yrityksen käyttämiä kierrätysprosesseja . Alla olevassa taulukossa 1 on yhteenveto läpikäytyjen kierrätysprosessien hyvistä ja huonoista puolista, sekä niillä kierrätettävistä yleisistä muoveista. Vaikka mekaaniset kierrätysprosessit vielä vallitsevat muovien kierrätystä, kirivät kemialliset kierrätysmenetelmät niitä suosiossa vähitellen. VTT:n, Fortumin ja Nesteen kehittämistä ja käyttämistä menetelmistä voidaan todeta, että mekaaniset ja kemialliset prosessit ovat molemmat tasapuolisesti käytössä sekä kehityksessä näillä suomalaisilla yrityksillä.

Taulukko 1. Muovien kierrätysmenetelmien sopivuuksia sekä hyötyjä ja haittoja. (Jiang *et al.*, 2022) (Ragaert, *et al.*, 2017)

Kierrätysprosessi	Sopivat muovit	Hyödyt	Haitat
Mekaaniset prosessit	Kaikki	Laajalti tutkittu ja käytetty sekä kustannustehokas menetelmä.	Muovin laatu ja arvo laskevat kierrätyksessä ja kierrätyksestä saadaan vain muovia tuotteena.
Pyrolyysi	Kaikki paitsi PVC	Syntyy suhteellisen vähän myrkyllisiä kaasupäästöjä ja tuotteina saadaan useita eri tuotteita.	Kemiallisesti monimutkaista, ja kustannustehokasta vain suurilla määrillä.
Kaasutus	Kaikki	Kierrätettävää jätettä ei tarvitse lajitella. Kaasutuskaasut ovat halpoja	Syntyy myrkyllisiä kaasupäästöjä, ei toimi sekamuovijätteelle ja ei voida tuottaa monomeerejä.
Solvolyysi	PET, PC	Yksinkertainen ja tehokas, koska depolymerointi liuottimella lämmön sijasta.	Täysi depolymerointi kestää pitkään ja epäpuhtauksien erottelu vaikeaa
Katalyyttinen krakkaus	PE, PP, PS, PVC, PET	Tuottaa vain muutamia tuotteita ja reaktioolosuhteet eivät ole liian tarkat	Katalyytti voi deaktivoitua, ja teknologiaa ei ole kehitetty vielä tarpeeksi
Vetyteknologiat	Kaikki	Saadut tuotteet laadukkaita suoraan prosessista ja teknologiassa on huomattavaa potentiaalia.	Tarvittavan vedyn ja teknologian korkea hinta, sekä itse teknologia tarvitsee lisätutkimusta.

Mekaaniset kierrätysmenetelmät ovat kuitenkin vielä tällä hetkellä kemiallisia kierrätysmenetelmiä parempia, koska ne ovat vielä huomattavasti yksinkertaisempia ja kustannustehokkaampia. Tosin mekaanisten kierrätysmenetelmien ongelmana on, että niillä valmistettu kierrätysmuovi on heikompilaatuista kuin täysin uutena valmistettu muovi. Kemiallisilla kierrätysmenetelmillä tämä laadun heikkenemisen ongelmaa ei olisi, koska näillä menetelmillä saadut kierrätetyt raaka-aineet toimivat samalla tavalla muovien valmistuksessa kuin kierrättämättömät raaka-aineet. Näin ollen kemiallisesti kierrätetty muovi olisi parempaa kuin mekaanisesti kierrätetty muovi. Lisäksi kemiallisella kierrätyksellä saadaan tuotettua raaka-aineita muuhunkin kuin muoveihin.

Tällä hetkellä kemiallisista kierrätysmenetelmistä eniten potentiaalia on katalyyttisillä krakkausprosesseilla, koska niiden energian tarve on melko vähäinen ja niillä voidaan kierrättää kaikkia yleisiä muoveja. Näiden prosessien käyttämissä katalyyteissä on vieläkin kehittämistä, ja paremmilla katalyyteillä prosessien heikkouksia voitaisiin minimoida sekä prosesseja itseään parannella. Myös vetyteknologiat ovat lupaavia laadukkaiden tuotteiden takia, mutta niiden taloudellinen kannattavuus on epävarmempaa. Suurimpana ongelmana kemiallisilla kierrätysmenetelmillä on, vaikka nämä tekniikat ovat kehittyneitä, niin niiden käyttäminen ei ole vielä taloudellisesti kannattavaa. Tämä tulee kuitenkin luultavasti muuttumaan tulevaisuudessa tekniikoiden kehittyessä. Kemiallisten kierrätysmenetelmien potentiaalin takia niiden kehittymisen myötä ne tulevat olemaan mekaanisten kierrätysmenetelmien lisäksi, ja todennäköisesti tulevat jopa korvaamaan mekaanisia kierrätysmenetelmiä ja olemaan tulevaisuudessa eniten käytetty muovien kierrätystapa.

## Lähteet

Asikainen, T. 2021. *Mekaaninen kierrätys*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://muovienkierratys.wordpress.com/mekaaninen-kierratys/> [Viitattu: 28.12.2023]

BPF. *Overview of Key Processes, British Plastics Federation*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.bpf.co.uk/hub/overview-of-key-processes.aspx> [Viitattu: 2.8.2024].

Das, A. & Mahanwar, P. 2020. 'A brief discussion on advances in polyurethane applications', *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(3), pp. 93–101. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.07.002>.

Eagleson, M. 1993. *Concise Encyclopedia Chemistry*. Saatavissa: <https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/kn/resources/kpCEC0000B/toc?cid=toc&kpromoter=federation> [Viitattu: 5.2.2024].

Elastron. *What is Extrusion? Plastic Extrusion Process, Elastron Kimya*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.elastron.com/en/what-is-extrusion-plastic-extrusion-process-elastron-tpe> [Viitattu: 2.2.2024].

Fortum. *Kierrätysmuovigranulaatit / Fortum*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/muovien-kierratys/fortum-circo-kierratysmuovi/granulaatit> [Viitattu: 30.6.2024].

FQE Chemicals. 2016. 'Catalytic Cracking Process, Fouling, & Cleaning Methods', *Catalytic Cracking*, 12 December. Saatavissa: <https://fqechemicals.com/catalytic-cracking/> [Viitattu: 28.7.2024].

Goodship, V. 2007. *Introduction to Plastics Recycling*. Saatavissa: <https://web-p-ebsochost-com.ezproxy.cc.lut.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMjM0ODU5X19BTg2?sid=23638c79-959c-4f16-8d39-e4ece6db5735@redis&vid=0&format=EB&rid=1> [Viitattu: 15.7.2024].

Higman, C. & van der Burgt, M. 2008. *Gasification*. San Diego, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/lut/detail.action?docID=331996> [Viitattu: 29.1.2024].

Hyvärinen, M. *et al.* 2020. 'The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review', *Polymers*, 12(6), p. 1306. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/polym12061306>.

Jiang, J. *et al.* 2022. 'From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), p. 106867. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.

Kabeyi, M. & Olanrewaju, O. 2023. Review & Design Overview of Plastic Waste-to-Pyrolysis Oil Conversion with Implications on the Energy Transition. *Journal of Energy*. 2023. 1-25. 10.1155/2023/1821129.. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/370969559\\_Review\\_and\\_Design\\_Overview\\_of\\_Plastic\\_Waste-to-Pyrolysis\\_Oil\\_Conversion\\_with\\_Implications\\_on\\_the\\_Energy\\_Transition](https://www.researchgate.net/publication/370969559_Review_and_Design_Overview_of_Plastic_Waste-to-Pyrolysis_Oil_Conversion_with_Implications_on_the_Energy_Transition)

Laakkonen, M. *et al.* 2013. 'Improved process for manufacture of liquid fuel components from renewable sources'. Saatavissa: <https://patents.google.com/patent/WO2013050653A1/en> [Viitattu: 4.7.2024].

Lopez, G. *et al.* 2018. 'Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 576–596. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>.

Miandad, R. *et al.* 2016. 'Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review', *Process Safety and Environmental Protection*, 102, pp. 822–838. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>.

Mojaver, P. *et al.* 2023. 'Plastic Waste Gasification', in R. Hasanzadeh and P. Mojaver (eds) *Plastic Waste Treatment and Management: Gasification Processes*. Cham: Springer Nature Switzerland (Engineering Materials), pp. 47–60. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31160-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31160-4_3).

Muoviteollisuus ry. *Muovien kierrätys, Muoviteollisuus ry.* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit\\_ja\\_ymparisto/muovien\\_kierratys/](https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/muovien_kierratys/) [Viitattu: 2.4.2024].

Neste. 2020a. *100% uusiutuva ja kierrätettyä, Neste*. Saatavissa: <https://www.neste.fi/vas-tuulliset-ratkaisut/ratkaisut/muovit/neste-re/100-uusiutuva-ja-kierratettya> [Viitattu: 4.7.2024].

Neste. 2020b. *NEXBTL-teknologia, Neste*. Saatavissa: <https://www.neste.fi/konserni/tietoa-meista/tuotanto/nexbtl-teknologia> [Viitattu: 4.7.2024].

NETL a. *5.1. Gasification Introduction, netl.doe.gov*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification> [Viitattu: 29.1.2024].

NETL b. *5.1.1. Fundamentals, netl.doe.gov*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/gasifier-intro> [Viitattu: 29.1.2024].

Niessner, N. 2022. *Recycling of Plastics*. Hanser Publishers. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRP000017/recycling-plastics/recycling-plastics>

Ogila, K. *et al.* 2017. 'Rotational molding: A review of the models and materials', *Express Polymer Letters*, 11, pp. 778–798. Saatavissa: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.75>.

Palpa. 2023. *Pantillinen järjestelmä*. Saatavissa: <https://www.palpa.fi/juomapakkausten-kierratys/pantillinen-jarjestelma/> [Viitattu: 20.5.2024].

Plastics Europe. 2024. 'The Circular Economy for Plastics – A European Analysis 2024 • Plastics Europe'. Saatavissa: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/> [Viitattu: 4.7.2024].

Roschier, S. *et al.* 2020. *Muovijätteen kemialliset hyödyntämiskäytännöt ja -markkinat kiertotaloudessa*. työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161993> [Viitattu: 2.8.2024].

Ragaert, K. *et al.* 2017. 'Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste', *Waste Management*, 69, pp. 24–58. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

Schyns, Z.O.G. and Shaver, M.P. 2021. 'Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review', *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3), p. 2000415. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>.

Selke, S. et al. 2021. *Knovel - Plastics Packaging - Properties, Processing, Applications, and Regulations (4th Edition)*. Saatavissa: <https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/kn/resources/kpPPPPAR02/toc?cid=kpPPPPAR02> [Viitattu: 24.6.2024].

Shit, S.C. & Shah, P. 2013. 'A Review on Silicone Rubber', *National Academy Science Letters*, 36(4), pp. 355–365. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0150-2>.

Sumi Oy a. 'Muovien materiaalimerkit', *Pakkaus kiertää*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sumi.fi/pakkaus-kiertaa/muovien-kierratys/muovien-materiaalimerkit/> [Viitattu: 21.5.2024].

Sumi Oy b. 'Muovit säästävät energiaa ja ympäristöä', *Pakkaus kiertää*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sumi.fi/pakkaus-kiertaa/> [Viitattu: 28.7.2024].

THL. 2024. *Ftalaatit - THL, Terveiden ja hyvinvoinnin laitos*. Saatavissa: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoverveys/ymparistomyrkyt/ftalaatit> [Viitattu: 22.5.2024].

Tenhunen-Lunkka, A. 2020 *Kemiallinen kierrätys ratkaisuna / VTT*. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kemiallinen-kierratys-ratkaisuna-muovien-ymparistoongelmiin-0> [Viitattu: 20.1.2024].

UN. 2023. 'Fast Facts - What is Plastic Pollution?', *United Nations Sustainable Development*. Saatavissa: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/08/explainer-what-is-plastic-pollution/> [Viitattu: 4.8.2024].

Vedenpuhdistaminen.com. 2022. '7 eri muovityyppiä, niiden ominaisuudet ja pahimmat haitat | Vedenpuhdistaminen'. Saatavissa: <https://vedenpuhdistaminen.com/muoveista-7-eri-muovityyppia-ja-missa-niita-kaytetaan/> [Viitattu: 22.5.2024].

VTT. 2022. *VTT:ltä spinnaava Olefy / VTT*. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vttlta-spinnaava-olefy-mullistaa-muovin-kierron> [Viitattu: 21.1.2024].

VTT. *Muovien kiertotalous / Palvelut / VTT*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/muovien-kiertotalous> [Viitattu: 20.1.2024].

Xanthos, M. & Patel, S.H. 1998. 'Solvolysis', in G. Akovali et al. (eds) *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 425–436. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1626-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1626-0_20).

## Liitteet

### Liite 1. Materiaalit ja menetelmät

Tämän kappaleen tarkoituksena on käydä hieman läpi tässä kandidaatintyössä käytettyjä tiedonhaun menetelmiä.

Tässä työssä käytin tiedonhakuun pääasiassa Google Scholaria ja LUT Primoa, mutta muutamassa haussa käytin myös Knovelia ja tavallista Googlea. Ennen varsinaista tiedonhakua kokeilin erilaisia hakusanoja ja niiden yhdistelmiä ja päädyin siihen, että kaikki haut kannattaa tehdä englanniksi, koska suomeksi ei löytynyt käytännössä juuri mitään. Ainoat suomenkieliset hakuni liittyivät kappaleen 4 suomalaisten yritysten kierrätysmenetelmien etsimiseen ja kappaleen 2 Suomen muovin kierrätyksen tilastoihin ja muovien perustietoihin. Pääasiallisina hakusanoina käytin ”recycling”, ”plastics”, ”process”, ”mechanical” ja ”chemical”, joita yhdistelemällä keskenään sain suurimman osan tarvittavasta tiedonhausta suoritettua. Näiden sanojen lisäksi lisäsin hakuun tarvittaessa tarkentavia sanoja, kuten ”pyrolysis” ja ”extrusion”, jotta saisin etsittyä paremmin tietoa yksittäisestä prosessista. Minun ei tiedonhaussa oikeastaan tarvinnut käyttää hauissani Boolean operaattoreita, vaan tarvittavat tiedot löytyivät melkein aina suoraan muutamalla sanalla. Yritysten käyttämien menetelmien tiedonhaussa yritin ottaa tuloksetta yhteyttä Nesteeseen ja Fortumiin.