

## Kierrätysjärjestelmät ja uudet liiketoimintamallit jättemateriaalien uudelleenkäyttöön

### 2.1 Muovin kierrätyksen optimointi

Ennen kierrätysmateriaalien varsinaista uudelleenkäsittelyä uusiksi tuotteiksi jättemateriaalit tulee muuttaa uusiksi raaka-aineiksi. Tätä vaihetta kutsutaan yleisesti "jätevaiheen päättymiseksi", ja se alkaa keräysvaiheen jälkeen. Prosessi voi sisältää seuraavat vaiheet, joista jokainen voi tapahtua missä tahansa välillä "ei ollenkaan"–"useita kertoja koko prosessin aikana":

- Erottelu ja lajittelu: tapahtuu muodon, tiheyden, koon, värin tai kemiallisen koostumuksen perusteella.
- Paalaus: jos muovia ei käsitellä lajittelupaikalla, se paalataan usein kuljetusta varten.
- Pesu: (usein orgaanisten) epäpuhtauksien poistaminen.
- Jauhaminen: koon pienentäminen tuotteista hiutaleiksi.
- Sekoittaminen ja pelletointi: optionaalinen hiutaleiden uudelleenkäsittely rakeiksi, joita on hiutaleita helpompi käyttää jatkoprosessoinnissa.

#### 2.1.1. KERÄYS

Järjestelmät, jotka sisältävät kuluttajalta tulevan muovijätteen keräyksen, voidaan jakaa karkeasti kolmeen yleisluokkaan:

- Monomateriaalikeräys: Jätekeräys on suunniteltu siten, että saadaan vain yksi lähteestä erotettu materiaalifraktio, kuten muovit. Jätekeräys voi sisältää useita muovityyppejä yhdessä tai kohdentamalla tiettyjä muovityyppejä (esim. PET-pullot tai jäykkä muovi, kuten ruukut, altaat ja tarjottimet).
- Monimateriaalikoelma: Keräys on suunniteltu kokoamaan erityyppisistä lähteistä erotettuja kierrätettäviä materiaaleja, kuten metalleja, lasia ja muovia.
- Sekakeräys: Tämyntyyppisestä keräyksestä syntyvä jäte on usein erittäin saastunutta ja vaatii intensiivistä jatkokäsittelyä. Tämä jätevirta voi sisältää orgaanista jätettä.

Muovin monomateriaalikeräys voidaan suunnitella hyvin eri tavoin. Keräysjärjestelmät voidaan suunnitella vain yhdelle tai muutamalle polymeerille (esim. PET-pullot), muovityypeille (esim. jäykkä tai joustava muovi) tai muoville yleensä.

Laaja valikoima erilaisia muovityyppejä vaatii myös tarkempaa hienolajittelua jälkikäteen, mikä johtaa suurempaan hylätyn materiaalin osuuteen ja joissakin tapauksissa huonompaan lopputuotteen (toissijainen muovi) laatuun.

Monien erotustekniikoiden tehokkuus riippuu muovin yleisestä pinnan puhtaudesta. Pinnoitteet, kuten etiketit ja painatukset, voivat vaikuttaa esimerkiksi spektroskooppiseen analyysiin perustuviin tunnistusmenetelmiin.

Lisäksi erotettavan materiaalin koon pienentäminen (murskaus) on usein keskeinen prosessivaihe. Se yleensä parantaa erotustehokkuutta, mikä mahdollistaa erittäin puhtaiden tuotteiden valmistamisen.

## **2.1.2. MUOVIEN PUHDISTUS**

### **2.1.2.1. Kuivapesu**

Ilmaa puhalletaan materiaalikerroksen läpi, mikä poistaa kevyet epäpuhtaudet. Tämä puhdistusprosessi liittyy usein koon pienentämiseen. Hienot epäpuhtaudet poistetaan, kun tekniikat, kuten seulonta, seulonnat, hydrosyklonit tai suodattimet, ovat vapauttaneet ne.

### **2.1.2.2. Pesu epäpuhtauksien poistamiseksi**

Neste- ja ruokajäämät voidaan tarvittaessa poistaa pesemällä muovi sopivalla pinta-aktiivisella aineella. Pesu vaaditaan myös etikettien poistamiseksi pulloista. Liimoja, jotka kiinnittävät etiketit pulloon, voidaan käyttää vain reunassa, tai ne voivat peittää etiketin takaosan kokonaan. Kuumaliimat ovat erityisen hankalia, koska niiden pehmeneminen vaatii perinteisiä liimoja huomattavasti korkeamman lämpötilan. Osa painoväreistä voi myös olla vesiliukoista ja sisältää myrkyllisiä metalleja, kuten lyijyä. Pesuprosessista syntyvän saastuneen veden käsittely lisää lajittelun kustannuksia.

### **2.1.2.3. Pinnoitteen poistaminen hioma-aineilla**

Kuten edellä on selitetty, pinnoite tulee poistaa etukäteen, jotta materiaali voidaan tunnistaa. Pinta puhdistetaan yleensä hiomalaikalla. Tämä on aikaa vievä prosessi, ja siksi se kannattaa tehdä vain suurille esineille.

## **2.1.3. KOON PIENENTÄMINEN**

Koon pienentäminen on usein tärkeää. Pienempi koko edistää materiaalien vapautumista ainesosien seoksista, lisää muovin bulkkitiheyttä kuljetuskustannusten minimoimiseksi ja tekee koosta tarkemmin mitattavaa. Pienentäminen tuottaa oikean kokoluokan materiaalia erotusprosessia varten. Tähän tarkoitukseen käytetään useita tekniikoita.

### **2.1.3.1. Silppurit ja kiertomurskaimet**

Silppurit pienentävät muovin kokoa leikkaamalla. Muovi vedetään sarjaan asynkronoituja, vastakkain pyöriviä akseleita, jotka on varustettu leikkauslaikoilla ja holkeilla. Pyörivät murskaimet hirtävät symmetrisiä puruja hiottavasta materiaalista roottoriin asennetuilla teräspaloilla. Kiertomurskaimet toimivat tyypillisesti alhaisella nopeudella (noin 80–100 rpm) ja suurella vääntömomentilla.

### 2.1.3.2. Pyörivät veitsileikkurit

Pyörivät veitsileikkurit ovat eniten käytetty laite muovin koon pienentämiseen. Laite käyttää kiinteiden ja pyörivien terien yhdistelmää muovia pienentäessään. Leikkaustoiminto syntyy muovin liikkeessä paikallaan olevien ja pyörivien terien välillä. Pyörivät terät on asetettu pieneen kulmaan roottorin akseliin nähden ja kiinteät terät samaan kulmaan, mutta vastakkaiseen suuntaan.

### 2.1.3.3. Kryogeeninen murskaus

Lämpötilaa voidaan hyödyntää parantamaan murskauksen energiatehokkuutta sekä parantamaan liimojen, etikettien ja komposiittimateriaalien vapautumista. Muovin jäähdytys estää myös polymeerien, kuten PVC:n, lämpöhajoamisen, jota voi tapahtua muissa jauhamisprosesseissa. Nestemäistä tyyppiä voidaan suihkuttaa muovien päälle tai muovit voidaan vetää nestekyllyn läpi suljetussa tunnelissa.

## 2.2 Mekaaninen kierrätys

Kerätyn muovin lajittelulla ja erottelulla on yleisesti tarkoituksena mahdollistaa korkealaatuinen kierrätys. Eri polymeerien erottaminen on erityisen tärkeää mekaanisessa kierrätyksessä, koska sekamateriaalien käsittelystä muodostuisi muuten huonolaatuista kierrätysmateriaalia, jota voitaisiin käyttää vain rajoitetussa määrässä käyttökohteita. Lajittelu- ja erottelutekniikoilla pyritään vähentämään muiden kuin muovimateriaalien määrää ja vähentämään ei-toivottujen muovipolymeerien määrää.

Lajitteluun valittu tekniikka riippuu useista tekijöistä:

- muoviseoksen kompleksisuus
- laatu (kontaminaatiotaso)
- polymeerin fyysinen muoto
- muovin loppukäyttö
- taloudellisuus (erottamisen kustannukset).

Lajittelulaitosten tuotos voi olla yksittäistä polymeeriä tai erilaisia polymeerityyppien seoksia (yksivärisiä tai sekavärejä). Lajittelutapoja on saatavilla useita materiaalien keräyksestä riippuen (mono- tai seka), koko...

### 2.2.1. Manuaalinen lajittelu

Manuaalista lajittelua käytetään tyypillisesti suurten esineiden erottamiseen 2D-muovikalvoina muista muoveista/sekoitetuista kierrätettävistä materiaaleista. Lisäksi sitä voidaan käyttää ei-kohdennettujen materiaalien poistamiseen monomateriaalijätevirroista. Kohdentamattomat materiaalit voivat olla epäpuhtauksia tai ei-sertifioituja pakkausjättemateriaaleja.

Toimintatapa perustuu siihen, että operaattori tunnistaa muovit visuaalisesti. Manuaalinen lajittelu on pääomasijoitusten kannalta halpaa, mutta se on hidasta ja työvoimavaltaista.

### 2.2.2. Manuaalinen lajittelu jossain määrin automatisoituna

Raaka-aine kuljetetaan kuljetinhihnaa pitkin, jotta operaattori voi tunnistaa sen visuaalisesti ja lajitella polymeeriluokkiin aktiivisella automaattisen poistomekanismin.

### 2.2.3. Automaattiset lajittelutekniikat

Automaattisia lajittelutekniikoita on useita. Seuraava taulukko on yhteenveto niistä.

Lähi-infrapunalla (aallonpituus 600–2500 metriä) voidaan tunnistaa lajittelemattomia muoveja. Altistuessaan lähi-infrapunavaloaltoille jokainen polymeeri heijastaa tunnistusspektrin. Tällä menetelmällä voidaan tunnistaa tarkasti erilaisia polymeerejä. Menetelmä ei kuitenkaan sovellu tummien muovien tunnistamiseen. Tunnistusmenetelmä on nopea.

Lisäksi lajitteluun on käytetty myös röntgensäteistä. PVC:n lajitteluun käytetään pääosin tätä tekniikkaa, koska PVC:n klooriatomit antavat helposti havaittavissa olevan, karakteristisen piikin röntgenspektrissä.

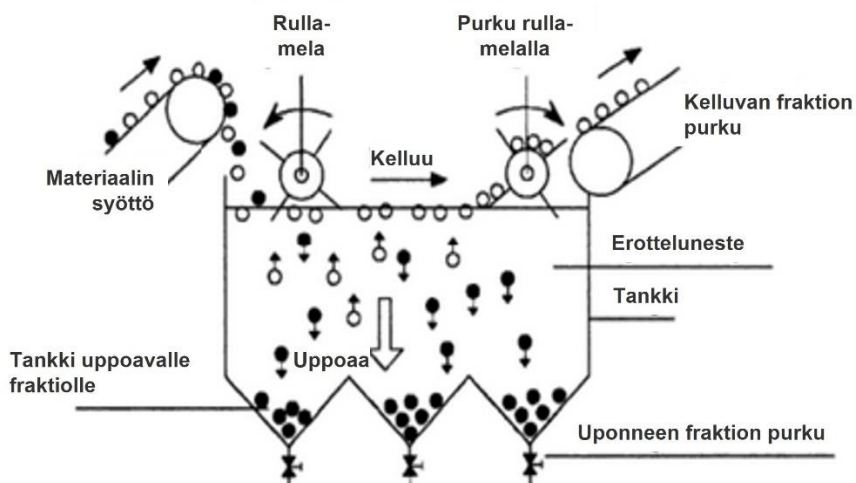
Valmistuksen aikana lisättyjen merkkiaineiden käyttö tunnistuksessa (infrapunavärit PETissä tai fluoresoivat väriaineet) tarjoavat korkean tunnistustarkkuuden eri polymeereille tai jopa eri polymeerilaaduille (jopa 90 % värillisten hiukkasten kontaminaatiosta, joka on peräisin kirkkaasta PET-hiutaleesta).

Tunnistusmenetelmä	Hyötyjä	Heikkouksia	Sovelluksia
Optinen	Ainoa tehokas keino lajitella värin mukaan.	Ei tunnista polymeeriä.	Käytetään poistamaan värillisiä epäpuhtauksia ja lajittelemaan yksi polymeeri värin perusteella (esim. PET).
Keski-infrapuna	Tunnistettu ja vakiintunut tekniikka.	Ei toimi nopeissa tunnistussysteemeissä. Vaatii suhteellisen tasaisen ja puhtaan pinnan. Tunnistettava tuote on tuotava instrumentin mittaussikkunaan.	Käytetään autonosien avustetussa manuaalisessa lajittelussa.

Lähi-infrapuna	Nopea – fotodetektoreilla on nopea vasteaika. Soveltuu läpinäkyvien tai kevyesti värjättyjen kohteiden tunnistukseen.	Ei toimi tummille, kuten nokimustaa sisältäville tuotteille, koska se absorboi ja siroaa lähi- infrapunataajuuksilla.	Pullojen lajittelu
UV-fluoresenssi	Merkkiaineita käyttämällä järjestelmällä pystytään tunnistamaan polymeerblendit.	Ei erottele tarpeeksi ilman merkkiaineita. Merkkiaineiden kallis hinta estää käyttöä.	Yleiskäyttö kaikille merkkiaineita sisältäville polymeereille
Röntgensäteily	Tunnistettu ja vakiintunut tekniikka PVC:n tunnistukseen.	Alkuaineanalyysi – monet polymeerit koostuvat samoista alkuaineista.	PVC:n erottaminen PETistä

#### 2.2.4. Kellutussäiliöt

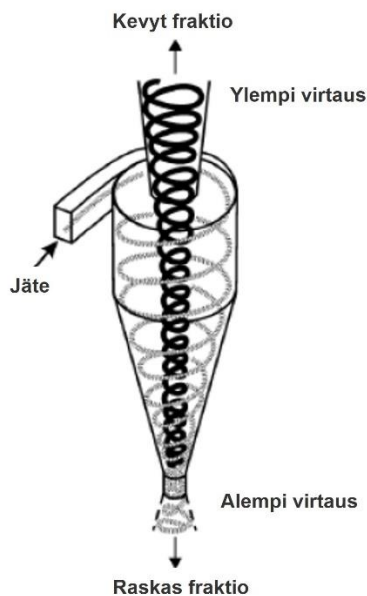
Perustuu nesteessä tapahtuvaan polymeerien erotukseen tiheyserojen avulla. Erottelua voidaan parantaa ylikriittisten nesteiden ja muiden ei-orgaanisten liuottimien avulla, joilla voidaan korvata vesi.



(Lähde: Sorting of Waste Plastics for Recycling. R.D. Pascoe. Muokattu)

### 2.2.5. Hydrosyklonit

Tiheyslajittelu perustuu keskihakuvoiman vastukseen nesteessä. Jäte syötetään hydrosykloniin suspensiona. Kevyemmät jakeet kulkeutuvat ylöspäin, kun taas tiheämmät hiukkaset päätyvät syklonin pohjalle. Koon pienennys tehdään yleensä ennen käsittelyä hydrosykloneissa. Hydrosyklonin käyttö mahdollistaa staattisia kelluntasäiliöitä paremman erottelun. Tekniikalla voi erottaa PE:n raskaammasta PVC:stä, PETistä tai PS:stä. Kauttaaltaan korkeampi kuin staattiset kellunta- ja upposäiliöt.



(Lähde: Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste)

### 2.2.6. Ilmaluokitin

Erottelee materiaalien ilmavirrassa tapahtuvan putoamisnopeuden mukaan. Tavoitteena on erottaa kevyet ja raskaat osat. Ilmaluokittimia on saatavilla erityyppisiä.

### 2.2.7. Ballistinen erotin

Automaattinen lajittelu koon, tiheyden ja jäykkyyden mukaan. Lajittelun tuloksena on kolme fraktiota:

- kevyt fraktio (kevyet ja litteät osat)
- raskas fraktio (raskas ja kuutiomainen osa)
- hieno fraktio (esim. alle 20 mm).



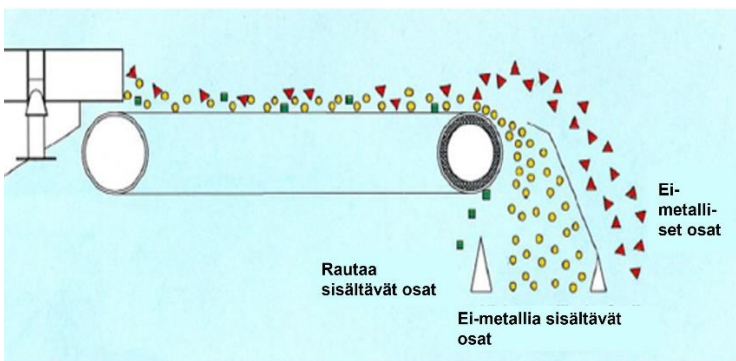
Ballistinen erotin on periaatteessa tärisevä rei'itetty kansi. Kannen pieni kaltevuus saa raskaat materiaalit putoamaan kannen alemmalle tasolle, kun taas kevyempiä materiaaleja, kuten muovikalvoja, kuljetetaan ylöspäin. Hienot materiaalit putoavat rei'itetyn pohjan läpi.



(BRT HARTNER ballistinen erotin)

### 2.2.8. Magneettinen erotus ja pyörrevirtaerotus

Laitetta käytetään magneettisen raudan ja ei-rautametallien (kuten alumiinin) lajitteluun. Magneetti pystyy erottamaan ferromagneettiset osat ei-ferromagneettisista materiaaleista. Tällaisissa laitteissa ei eroteta ruostumatonta terästä ja muita metalleja.



Kuvio. Pyörrevirtaerotuksen toimintaperiaate

### 2.2.9. Sähköstaattinen erotus

Erotus voidaan toteuttaa myös hyödyntämällä erilaisten muovien sähköistä varausta. Tämä menetelmä erottaa muovimateriaalit niiden sähköstaattisten varausten erojen perusteella. Materiaalit lajitellaan antamalla niiden pudota vapaasti kahden rinnakkaisen vastakkaisesti varautuneen elektrodisarjan välisen sähkökentän läpi ja kerätään erikseen niillä olevan tribosähköisen varauksen mukaan.

### 2.2.10. Valikoiva liuotus

Valikoiva liuotus tarkoittaa sekoitettujen muovien liuottamista erissä liuottimilla. Polymeereillä on erilainen liukoisuus orgaanisiin liuottimiin (erot vahvistuvat lämpötilan vaikutuksesta). Tekniikassa on eri vaiheita, kuten liuotus, saostus, suodatus ja lopuksi liuottimien haihdutus. Tekniikka auttaa polymeerien täydellisessä erottamisessa toisistaan tietyssä lämpötilassa ja sopivalla liuottimella. Yksittäinen polymeeri voidaan erottaa kompleksisista seoksista, kontaminaatiosta, kuten liasta tai maaperästä. Tämän tekniikan huono puoli on käytettyjen liuottimien määrä, vaikka suurin osa liuottimista kierrätetään prosessissa.

### 2.2.11. Lajittelu sulattamalla

Tämä lajittelutekniikka soveltuu vain kahden muovilajin lajitteluun kerrallaan. Menetelmän käyttäminen edellyttää, että muovien sulamislämpötilat eroavat merkittävästi toisistaan. Tekniikka koostuu lämmitetystä telahihnaerottimesta. Lajittelu tapahtuu pehmenettyjen hiukkasten selektiivisellä lämpöadheesiolla teloihin tai hihnaan.

Useimmat eurooppalaiset lajittelulaitokset koostuvat edellä mainittujen tekniikoiden yhdistelmästä, jotta voidaan varmistaa taloudellinen ja tehokas syöttömateriaalin lajittelu ja tyydyttävä tuotteen laatu. Tietyn laitoksen tarkka kokoonpano tulee säätää syöttömateriaalin ja tuotteen vaaditun laadun mukaan.

Mekaanisessa kierrätyksessä käytetään suhteellisen yksinkertaisia prosesseja ja tuotetaan korkealaatuisia polymeerimateriaaleja. Menetelmä soveltuu kuitenkin pääasiassa homogeenisille jätevirroille, jotka vaativat usein puhdasta samantyyppistä tai korkeaa jätteen lajitteluastetta, mikä voi lisätä käyttökustannuksia.

### 2.2.2. Tärkeimmät haasteet liittyvät mekaaniseen kierrätykseen

Sekä mono- että sekamuovien kierrätyksessä syntyy erilaisia haasteita. Pääasiallinen ongelma on polymeerien hajoaminen tietyissä olosuhteissa. Näitä olosuhteita ovat muun muassa lämpö, hapettuminen, valo, ionisoiva säteily, hydrolyysi ja mekaaniset leikkausvoimat.

## 2.3 Toissijaiset muovituotteet – esimerkkejä ja markkinatrendejä



## 2.4 Kemialliset kierrätysreitit – liuotus-, katalyyttiset ja termokemialliset tekniikat

### 2.4.1 Depolymerointi ja liuotus

Tässä osiossa esitellään erilaisia muovien kemiallisen kierrätyksen reittejä. Ne voidaan ryhmitellä kahteen teknologialuokkaan: kemialliseen depolymerointiin ja liuotinvusteiseen erotukseen.

#### KEMIALLINEN DEPOLYMEROINTI

##### Prosessin yleiskuvaus

Kemiallinen depolymerointi tarkoittaa polymeeriketjujen hajottamisesta kemikaalien avulla. Kirjallisuudessa sitä voidaan kutsua myös kemolyysiksi ja solvolyyksiksi.

Muovijäte esikäsitellään ensin kiinteiden epäpuhtauksien poistamiseksi ennen prosessin aloittamista. Kemikaaleja käytetään hajottamaan polymeeriketjut joko lyhyempiketjuisiksi oligomeereiksi (osittainen depolymerointi) tai monomeereiksi (täydellinen depolymerointi). Kun depolymerointi on valmis, monomeerit otetaan talteen ja puhdistetaan.

##### Sovellukset

Kemiallinen depolymerointiprosessi soveltuu vain tietyntyyppisille muoveille. Tärkeimpänä niistä ovat kondensaatiopolymeerit. Nimi tulee niiden muodostumistavasta (polymerointi kondensaatioreaktiolla).

Polyeteenitereftalaatti (PET) ja muut polyesterit, polyuretaani (PU), polyamidit (PA) ja polylaktidi (PLA) ovat tärkeimpiä polymeerejä, jotka voidaan depolymeroida kemiallisesti.

Polymeeri	Jätevirta
<b>Polyeteenitereftalaatti (PET)</b>	Pullot Kalvot ja tarjottimet Tekstiilit (sis. polyesteri ja polyesteri-puuvillasekoitteet)
<b>Polyuretaanit (PU)</b>	Matot, vaahdot Kovat vaahdot
<b>Polyamidit (PA)</b>	Kalastussiimat ja -verkot Tekstiili, joihin sisältyvät kankaat ja vaatetus
<b>Polylaktidi (PLA)</b>	Juomakupit

## Kemiallisen syötteen mukaiset tuotteet

Depolymerointiprosessin toimintatapa on käytännössä sama jokaiselle polymeerille. Monomeerejä yhdistävät sidokset katkeavat. Reaktioreitti, jolla kemialliset sidokset katkeavat, riippuu kuitenkin depolymerointiin käytetystä molekyylistä.

Pääasiallisia kemiallisia syötteitä on viisi, joista jokaisella on erillinen reaktioreitti ja siten erilainen monomeerien tuotto. Alla olevassa taulukossa on esitetty PETille saatavissa olevat eri tuotteet.

Taulukko: PETin depolymerointituotteet kemiallisen syötteen mukaan.

Kemiallinen syöte	Reaktioreitti	Muodostuva monomeeri	Muut tuotteet
<b>Glykoli</b>	Glykolyysi	Bis(2-hydroksietyleeni) tereftalaatti (BHET)	Etyleeniglykoli
<b>Vesi</b>	Hydrolyysi	Tereftaalihappo (TPA)	Etyleeniglykoli
<b>Metanoli</b>	Metanolyysi	Dimetyylitereftalaatti (DMT)	Etyleeniglykoli
<b>Amiinit</b>	Aminolyysi	Bis(2-hydroksietyleeni) tereftalamidi (BHETA)	---
<b>Ammoniakki</b>	Ammonolyysi	Tereftalamidi	Etyleeniglykoli

Näitä reittejä ei tällä hetkellä hyödynnetä kaupallisesti. Glykolyysi, hydrolyysi ja metanolyysi ovat osoittautuneet toimiviksi pilottilaitoksen tasolla tai suuremmassa mittakaavassa. Niistä glykolyysi on osoittautunut kaupallisesti elinkelpoisimmaksi. Aminolyysin ja ammonolyysin osalta ei ole toistaiseksi todisteita siitä, että ne olisivat edenneet laboratoriotestejä pidemmälle.

## Ympäristövaikutukset

Kemiallisten depolymerointiprosessien ympäristövaikutuksia on yritetty arvioida useampaan otteeseen. Yleisesti ottaen kemialliseen depolymerointiin tarvitaan liikaa energiaa ja mekaanista kierrätystä pidetään edelleen kokonaisuutena edullisimpana teknologiana.

Kemiallinen depolymerointi mahdollistaa kuitenkin mekaanisesti kierrätetyn PETin väistämättömiin epäpuhtauksiin liittyvien ongelmien ratkaisemisen, erityisesti useiden kierrätysyötkien jälkeen, mikä on huomionarvoinen näkökohta.

## Yhteenveto

Seuraavassa on esitetty Hannin ja Connockin (2020) Chemical Recycling -raportin mukainen yhteenveto kemiallisen depolymeroinnin eduista ja heikkouksista.

Edut:

- Monomeerituotteista voidaan valmistaa muovituotteita, jotka ovat yhtä laadukkaita kuin vastaavat neitseellisistä materiaaleista valmistetut. Ne ovat mahdollisesti sopivia elintarvikekontaktimateriaaleiksi.
- Tarjoavat esimerkkejä järjestelmistä, jotka mahdollistavat kemiallisten reagenssien, kuten katalyyttien ja liuottimien, talteenoton ja uudelleenkäytön.
- Useilla teknologioilla on osoitettu olevan korkea tuotto.
- Pullo- ja kuitujätteen käyttö on osoitettu kaupallisesti kannattavaksi.

Heikkoudet:

- Pystyy tällä hetkellä käsittelemään vain materiaalivirtoja, jotka ovat luonteeltaan suurelta osin homogeenisia.
- Vaatii usein tiukkoja esilajittelu- ja/tai esikäsittelyvaiheita ennen varsinaista puhdistusta.
- Tyypillisesti korkeat energiavaatimukset, erityisesti jälkipuhdistuksen kuivausvaiheessa.
- Tyypillisesti epäpuhtauksia ei pystytä poistamaan kokonaan.
- Ei ole osoitettu tarjoavan tuotteena elintarvikelaatuista materiaalia.
- Epäselvyys liuotintyypeistä ja myrkyllisyydestä suuremman mittakaavan esimerkeissä.
- Ei salli materiaalin rajatonta kierrätystä, koska polymeeriketjut hajoavat lämpötilan vaikutuksesta uudelleenkäsittelyn ja uusiksi muovituotteiksi prosessoinnin aikana.
- Tämänhetkinen epäselvyys ympäristövaikutuksista.
- Taloudellinen kannattavuus kaupallisessa mittakaavassa vielä osoittamatta.

## LIUOTINPUHDISTUS

### Prosessin yleiskuva

Liuotinpuhdistuksen lähtökohtana on käyttää liukoisuusperiaatetta mahdollisten kontaminoivien aineiden selektiiviseen erottamiseen muovijätteestä. Nämä epäpuhtaudet koostuvat tyypillisesti seuraavista:

- lisäaineet, kuten palonestoaineet, stabilointiaineet, iskunvaimennusaineet, väriaineet ja pigmentit
- muut kuin kohdepolymeerit
- tahattomasti lisätyt aineet (NIAS), jotka ovat yhdisteitä, jotka sekä imeytyvät että muodostuvat muovimateriaalin sisällä käytön aikana. Voivat sisältää valmistusprosessin sivutuotteita sekä hajoamistuotteita, jotka ovat peräisin sekä itse polymeerin osittaisesta hajoamisesta että muovin sisältämistä lisäaineista.

Muovi murskataan ja liuotetaan liuottimeen, johon polymeerillä on korkea liukoisuus ja epäpuhtauksilla on alhainen liukoisuus. Epäpuhtaudet pysyvät kiinteinä ja erottuvat nestefaasista.

Kun puhdistusprosessi on valmis, polymeeri uutetaan liuksesta asettamalla se muuhun nesteeseen kuin liuottimeen polymeerin uudelleen kiinteystämiseksi prosessissa, joka tunnetaan



termillä saostus. Polymeeri jatkokäsitellään nesteen poistamiseksi (pitää sisällään suodatuksen, pesun ja kuivauksen).

### Sovellukset

Koska tämän tekniikan tehokkuus riippuu liukoisuudesta, sitä voidaan teoriassa soveltaa melkein mihin tahansa polymeeriin, mikäli sopiva liuotin löytyy.

Alla olevassa taulukossa on esitetty tämänhetkiset liuotinpuhdistuksen sovellukset polymeerityypin ja jätevirtojen mukaan.

Polymeeri	Jätevirta
Polystyreeni (PS)	Vaahtopolystyreeni (EPS) Kotitalouksien PS-jäte
Polyeteenitereftalaatti (PET)	Polyesteri-puuvillatekstiilit Pakkaukset
Polueteeni (PE)	Monikerrospussit
Polyamidit (PA)	Monikerrospussit
Polypropeeni (PP)	Matot

### Kriittiset näkökohdat

Polymeerin puhdistuksen tehokkuus riippuu huomattavasti jätteen tarkasta koostumuksesta epäpuhtauksien suhteen. Suurimmalle osalle tekniikoista epäpuhtaudet ovat ongelmallisia. Ihannetapauksessa, jos kaikki muovijätteen sisältämät polymeerityypit ja kaikki epäpuhtaudet tunnetaan, prosessia voitaisiin käyttää usean materiaalin jätevirtojen puhdistamiseen edellyttäen, että liuottimen valinnassa on riittävästi varaa.

Teoriassa tällä voitaisiin välttää kustannukset, jotka liittyvät erilliskeräykseen ja kehittyneeseen lajitteluinfrastruktuuriin, joita tarvitaan tiettyjen polymeerityyppien erottamiseen. Kuitenkin lisääntynyt monimutkaisuus, joka vaaditaan kunkin polymeerityypin selektiivisyyden varmistamiseen, johtaa korkeampiin ympäristö- ja taloudellisiin kustannuksiin, jotka johtuvat lisääntyneistä liuotin-, energia- ja aikapanoksista.

Materiaalien seulonta ja lajittelu on yleinen esikäsittelyvaihe ulkoisten epäpuhtauksien, esimerkiksi tarrojen, liiman, teipin, erottamiseksi. Myös puhdistuksen jälkeen jäännösepäpuhtauksien riski on usein ongelma, koska materiaalin ominaisuudet ovat heikentyneet verrattuna neitseelliseen polymeeriin.

Lisäksi prosessilla voi olla jännitysvaikutus polymeerin rakenteeseen, kuten lämpö- ja fyysiset rasitukset muovin uudelleen käsittelyn aikana, mikä on toinen tärkeä rajoittava tekijä. Näin ollen menetelmä ei todennäköisesti salli muovimateriaalin loputonta kierrätystä.

## Ympäristövaikutukset

Alankomaiden hallituksen rahoittamassa tutkimuksessa **seulottiin LCA-tutkimuksia kemiallisen kierrätyksen teknologioista sen määrittämiseksi, sopivatko ne Alankomaiden jätehuoltojärjestelmään.**

Tutkimuksen tulokset eivät ole riittävän yksityiskohtaisia yleistysten tekemiseksi. Kuitenkin kun verrattiin menetelmiä, joita käytettiin jätteen hyödyntämisessä energiaksi, havaittiin merkittäviä ilmastonmuutoshyötyjä polystyreenin (EPS) liuotinpuhdistuksen käytössä.

Tämä teknologia ei kuitenkaan ole vielä yleistynyt kaupalliseen käyttöön, joten siitä on vaikea tehdä tarkkoja johtopäätöksiä. Ajantasaiset tutkimukset ovat perustuneet skenaarioihin, joissa määritellään hyvin spesifiset jätevirran syötöt onnistuneen puhdistuksen varmistamiseksi.

## Yhteenveto

Seuraavassa on esitetty Hannin ja Connockin (2020) Chemical Recycling -raportin mukainen yhteenveto liuotinpuhdistuksen eduista ja heikkouksista.

Edut:

- On osoitettu, että se erottaa polyesterin ja puuvillan tekstiilisekoituksia.
- Ympäristölle haitattomia liuottimia on testattu menestyksekkäästi laboratoriomittakaavassa.
- Yleensä sallii liuottimen talteenoton uudelleenkäyttöä varten.
- Prosessin on osoitettu ottavan talteen ei-kohteena olevat sivutuotteet valorisaatiota varten.

Heikkoudet:

- Syötteenä tarvitaan tyypillisesti homogeenisia jätevirtoja, mikä vaatii usein laajaa esikäsittely-/lajitteluteknologiaa.
- Tiedonpuute kemiallisten reagenssien ja muiden lisämateriaalien, esim. katalyyttien, määristä.
- Epäselvyys teknologioihin liittyvistä kokonaisenergiapanoksista, prosesseista, jotka vaativat usein suuria energiapanoksia.
- Satotietojen puute kasvitasolla.
- Yleinen ymmärtämättömyys kontaminaatitasosta, jonka tekniikat pystyvät käsittelemään, sekä siitä, miten epäpuhtauksia käsitellään monomeerin puhdistuksen jälkeen.
- Vaarallisia syötteitä/sivutuotteita ei ole juuri huomioitu tekniikkaa koskevissa julkaisuissa.
- Todistettujen ympäristövaikutusta koskevien tietojen puute suurimmasta osasta teknologioita.



**Tekijänoikeus: CC BY-NC-SA 4.0:**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Tämä lisenssi sallii muiden levittää ja muokata teosta ja luoda sen pohjalta uusia teoksia, mutta ei kaupalliseen käyttöön.



**Kuitenkin vain seuraavilla ehdoilla:**

**Nimeä** — Sinun on asianmukaisesti mainittava alkuperäinen tekijä, annettava linkki lisenssiin ja ilmoitettava, onko muutoksia tehty. Voit tehdä sen millä tahansa kohtuullisella tavalla, mutta et millään tavalla, joka viittaa siihen, että lisenssinantaja tukee sinua tai käyttöäsi.

**EiKaupallinen** — Et saa käyttää materiaalia kaupallisiin tarkoituksiin.

**JaaSamoin** — Jos muunnat tai luot materiaalin pohjalta uutta materiaalia, sinun on jaettava tuotoksesi samalla lisenssillä kuin alkuperäinen.

**Ei lisärajoituksia** — Et saa soveltaa laillisia ehtoja tai teknisiä toimenpiteitä, jotka laillisesti estävät muita tekemästä mitään, mitä lisenssi sallii.

Tässä julkaisussa esitetyt tiedot ja näkemykset ovat laatijoiden omia eikä niitä välttämättä voida pitää Euroopan unionin virallisena kantana. Euroopan unionin toimielimiä tai niiden puolesta toimivia henkilöitä ei voida pitää vastuussa tämän raportin sisällöstä tai sen sisältämien tietojen käytöstä.



Yhteisrahoitettu  
Euroopan unionin  
Erasmus+ -ohjelmasta



Yhteisrahoitettu  
Euroopan unionin  
Erasmus+ -ohjelmasta