

Muovin mekaaninen kierrätys

Kandi
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Sofia Toom
Tarkastaja:
FT. Sari Granroth

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Toom, Sofia Muovin mekaaninen kierrätys

Kandi, 18 s., 3 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2024

Muovia on nykyään kaikkialla, suuri osa ruuastamme pakataan muoviin, ja myös autot, elektroniikka ja rakennukset sisältävät kaikki muovia. Muovi valmistetaan raakaöljystä, jonka pumppaaminen maasta on todella tuhoista maapallollemme. Koko ajan lisääntyvälle muovijätelmäärälle on tehtävä jotakin. Siksi viime vuosikymmenten aikana on kehitelty monia erilaisia muovijätteen kierrätystapoja. Kierrätyksellä tarkoitetaan jätteen, esimerkiksi muovin, lajittelua ja uudelleen käyttöä. Muovin kierrätykselle on kehitetty useita menetelmiä. Tässä tutkielmassa kerrotaan miten muoville käy kun se pääsee käyttöikänsä loppuun ja minkälaisia menetelmiä on käytössä eri muovilajien lajittelulle ja kuinka ne toimivat.

Asiasanat: muovi, mekaaninen kierrätys, jätteen käsittely

Sisällys

Johdanto	1
1 Muovit	1
1.1 Muovilajit	2
1.2 Muovin käyttö ja hyvät puolet	5
1.3 Muovin loppukäsittely	5
2 Muovijätteen lajittelu	6
2.1 Infrapuna-sensorit	6
2.2 Raman-spektroskopia	9
3 Lajittelun jälkeen	12
4 Haasteet	13
4.1 Muovin kierrätyksen haasteet	13
4.2 Tulevaisuuden näkymät	14
4.3 Biomuovit	15
5 Yhteenveto	16

Johdanto

Kun raakaöljystä tuli ensisijainen polttoaine 1900-luvun alussa korvaantuivat myös useat silloiset materiaalit edullisilla, kestävillä ja monipuolisilla pertokemikaalisilla muoveilla[1]. Muovit sekä muut synteettiset materiaalit ovat nykyään lähes välttämättä osa meidän jokaisen elämää. Elektroniikassa, rakennuksissa, pakkauksissa, terveydenhuollossa ja jopa avaruusaluksissa, muovi on keskeisessä roolissa. Maailmanlaajuinen muovintuotanto, ja siten muovijätteen määrä, on jatkuvassa kasvussa eikä loppua näy. [2]

Mekaaninen kierrätys on laajimmin käytössä oleva kierrätysmenetelmä muovijätteenle. Käytännössä mekaanisella kierrätyksellä tarkoitetaan menetelmää, jossa muovi lajitellaan, silputaan ja sitten sulatetaan ja muovataan uusiokäyttöön.

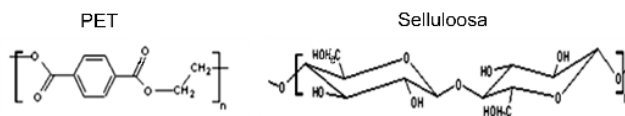
Tässä tutkielmassa perehdytään tarkemmin mekaanisen kierrätyksen eri vaiheisiin, esitellään joitakin lajittelulaitteistoja ja pohditaan mekaanisen kierrätyksen hyviä ja huonoja puolia. Käsitellään muovin mekaanista kierrätystä erityisesti ymäristövaikutusten kautta ja lopuksi mietitään muovin kierrätyksen tulevaisuutta ja kehityskohtia. Tutkielmassa kiinnitetään myös huomiota kierrätetyistä muoveista valmistettujen tuotteiden ja neitsytmuovista valmistettujen tuotteiden laatueroihin.

Tutkielmassa käytetään Zhaon [2] määritelmää kierrätykselle: muovijätteen mekaaninen käsittely ja sen muuntaminen kappaleeksi, jonka kemiallinen koostumus usein sama ja arvo on sama tai alempi kuin alkuperäisen tuotteen.

1 Muovit

Muovit ovat suurimolekyylisestä polymeeristä valmistettuja materiaaleja. Polymeeri on aine, joka muodostuu monomeerien liittyessä yhteen ja kemiallisten reaktioiden seurauksena ne järjestäytyvät ketjumaisesti tai verkkomaisesti [3].

Polymeeri syntyy polymeroinnin seurauksena. Polymerointireaktion aikana suuri



Kuva 1. Esimerkki synteettisestä polymeeristä polyeteenitereftalaatista (PET) ja luonnonpolymeeristä selluloosasta [4]

määrä yksinkertaisia rakenteellisia yksiköitä, monomeerejä, yhdistyy kovalenttisilla sidoksilla, muodostaen yhden pitkän molekyylin, polymeerin[5]. Polymeerejä on sekä synteettisiä, että luonnonpolymeerejä, kuten selluloosa[3]. Kuvassa 1 nähdään PET:n ja selluloosan kemialliset rakenteet. Nämä kemialliset rakenteet toistuvat siis kussakin polymeerissä ketjumaisesti. Suurin osa maailman muoveista on valmistettu synteettisistä polymeereistä, joiden jätteenkäsittely on ongelmallista.

Muovijäte voidaan kierrättää joko mekaanisesti tai kemiallisesti tai se voidaan muuntaa energiankantajiksi. Kemiallisen ja mekaanisen kierrätyksen suurin ero on, että mekaanisessa kierrätyksessä pyritään pitämään muovin kemiallinen koostumus samana, kemiallinen kierrätys perustuu kemiallisen koostumuksen muuntamiseen uusiokäyttöä varten. [6]

1.1 Muovilajit

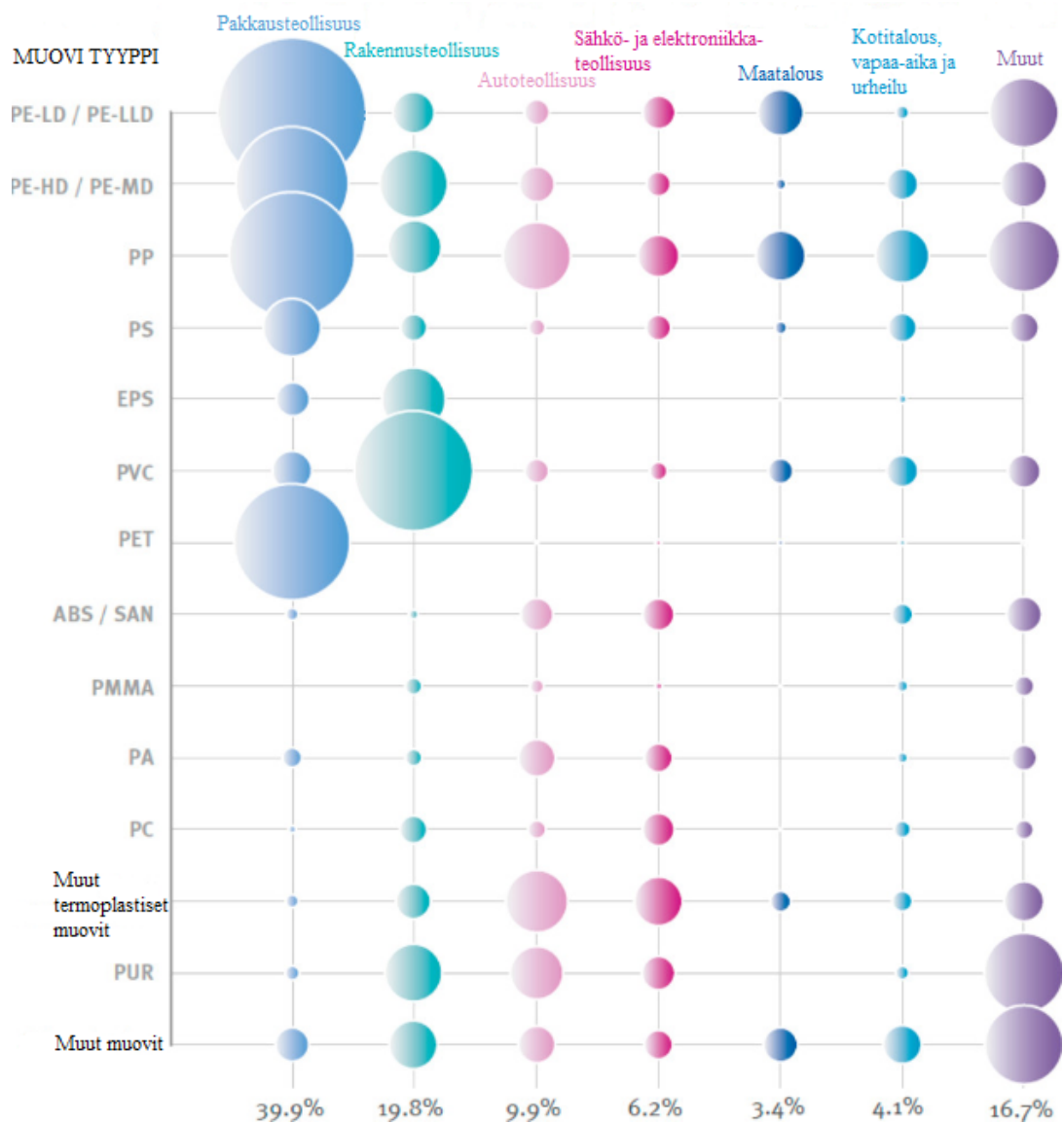
Muoveja on erilaisia, mikä vaikeuttaa kierrätysprosessia sekä johtaa usein kierrätetyistä materiaaleista tehtyjen kappaleiden huonoon laatuun. Tästä syystä kenties tärkein osa mekaanista kierrätystä onkin lajittelu. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että eri muovilajit erotellaan toisistaan, jotta uudet, kierrätetyistä materiaaleista tehdyt, kappaleet olisivat mahdollisimman puhtaita ja siten laadukkaita. [2]

Society for plastic industries (SPI) luokittelee muovilajit seitsemään eri luokkaan, joita merkitään tietyillä koodeilla. Nämä ovat: polyeteenitereftalaatti (PET), korkeatiheyksinen polyeteeni (HDPE), polyvinyylikloridi (PVC), matalatiheyksinen polyeteeni (LDPE), polypropeeni (PP), polystyreeni (PS) ja muut muovit (OTHERS).

Erilaisten muovilajien sekoittaminen alentaa lopullisen tuotteen laatua. [7] Muovi-teollisuus ry taas luokittelee muovit kahteen pääluokkaan, kertamuoveihin ja kestomuoveihin. Kertamuovit ovat SPI:n luokituksen muut muovit, eli käytännössä ei-termoplastiset muovit, joita ei voida sulattaa ja muovata uudelleen hajottamatta niiden kemiallista rakennetta. Kestomuovit ovat siis termoplastisia muoveja, joita voidaan sulattaa ja muovata uudestaan useita kertoja. Kertamuovien raaka-aine on yleensä nestemäistä ja kestomuovien raamuotoista. [3] Kuvassa 2 näkyvä PUR eli polyuretaani on kertamuovi.

Noin 57 % kaikesta tuotetusta muovista on polyolefinejä, joihin kuuluvat edellä mainituista PET, HDPE ja LDPE. Polyolefiinit ovat pitkistä hiilivetyketjusta muodostuvia polymeerejä.[2] Eri polymeerilajien tärkeimmät käyttötarkoitukset on esitetty kuvan 2 taulukossa.

Kaikesta Euroopan muovijätteestä, sekä teollisuuden että yksilöiden tuottamasta, suurin osa kierrätetään mekaanisesti, mukaan lukien PE-, PP- ja PET-muovit.[8] TWI on organisaatio, joka tarjoaa asiantuntijaneuvontaa insinööri-, materiaali- ja liitosteknologia aloilla. He tarjoavat myös asiakkailleen tukea muovin mekaaniseen kierrätykseen. TWI:n mukaan kaikki termoplastiset muovit voidaan kierrättää mekaanisesti niiden käyttöään lopussa. Termoplastisella muovilla tarkoitetaan muovia, jota voidaan sulattaa sen pehmentämiseksi[8]. Kaikki tämänhetkiset kierrätysmenetelmät keskittyvät termoplastisiin muoveihin eli ne käyttävät hyväkseen muovin sulaa muotoa korkeissa lämpötiloissa. On kuitenkin olemassa ei-termoplastisia, ristsidoksisia polymeerejä, jotka eivät ole sopivia perinteiseen mekaaniseen kierrätysprosessiin[9]. Tuotteen kierrätyskelpoisuuteen vaikuttavat kuitenkin monet muutkin asiat kuin polymeerilaji. Näitä ovat esimerkiksi tuotteen koko, muoto ja resurssit kuten saatavilla olevat kierrätyspisteet. Muovijätteen käsittelyssä yhtenä haasteena on eri polymeerien eroavat sulamispisteet[10].



Kuva 2. Eri polymeerien käyttötarkoitukset Euroopassa. Kuplan koko kuvaa suuruusluokkaa, jossa kyseistä polymeeriä käytetään kuhunkin tarkoitukseen. (kuva muokattu lähteestä [10])

Kuvassa 2 EPS on paisutettu polystyreeni (eng. expanded polystyrene), ABS on krynitiiriilibutadienistyreeni, joka on PS:n ja akrylitiiriilin kopolymeri, SAN on styreeni-akrylitiiriili, PMMA on polymetyylimatakrylaatti, PA on polyamidi ja PC on polykarbonaatti[3].

1.2 Muovin käyttö ja hyvät puolet

Muovijätteen määrä ja kierrätyksen haasteet ovat suuri ongelma, mutta on hyvä muistaa että muovilla on myös hyviä puolia. Pakkausmuovien käyttö ruuan säilytyksessä pidentää ruuan säilymisaikaa ja täten vähentää ruokahävikkiä. Etenkin nopeasti pilaantuvien ruoka-aineiden kuten lihojen ja tuoreiden kasvien säilyvyysaikaa saadaan pidennettyä huomattavasti.[10]

Myös terveydenhuollossa muovit ovat tärkeässä roolissa. Muovien avulla voidaan suojata ja huolehtia puhtaudesta. [10] Vuonna 2020 koko maailmalle levinneellä Covid-19 pandemiolla oli maailman muovijätteelle suuri vaikutus, kun suuressa osassa maailmaa kertakäyttöisistä kasvomaskeista tuli osa arkea yli vuodeksi. Lisäksi pakkausmateriaalien tarve kasvoi hyvän hygienian ylläpitämiseksi.[2]

Muovin käyttöikä vaihtelee pakkausmuovien muutamasta kuukaudesta joidenkin ilmailu- ja rakennusalan sovelluksien jopa yli 50 vuoteen. [11]

Kuten kuvasta 2 nähdään, Euroopassa noin 40% kaikesta käytetystä muovista on pakkausmuoveja. Suuruusjärjestyksessä seuraavat kaksi kuluttajaa ovat rakennus- (20%) ja autoala (10%). Muovi on erittäin monikäyttöinen, minkä takia sen käyttö on yleistynyt huomasti 1950-luvulta alkaen. [11]

1.3 Muovin loppukäsittely

Euroopassa vain noin kolmasosa muovijätteestä kierrätetään, suurin osa (43%) poltetaan ja loput päätyvät kaatopaikoille. [11] Tietenkin muovin päätyminen kaatopaikoille on huonoksi ympäristölle, mutta muovin kierrätykselle on myös muita hyviä syitä. Muovin kierrättäminen ja uudelleenkäyttö on energian säästön kannalta myös parempi vaihtoehto kuin uusien neitsyttuotteiden valmistus. Yksi tonni kierrätettyä muovia voi säästää jopa 130 miljoonaa kJ energiaa. Kaiken maailman muovijätteen kierrättäminen voisi teoriassa säästää vuosittain 3,5 miljardin öljytynnyrin verran

energiaa. Rahallisesti tämä tarkoittaisi yli 160 miljardin euron säästöjä.[9] Nämä luvut ovat tietenkin vain teoreettisia.

Mekaanisen ja kemiallisen kierrätyksen vaikutukset ilmastonmuutokseen ovat lähes samat, kemiallisen kierrätyksen vaikutus hieman (noin 6%) suurempi. Muut erot, esimerkiksi vaikutus makean veden rehevöitymiseen ja energian käyttö, ovat myös mekaaniselle kierrätykselle suotuisia, isommilla eroilla. [11] Tässä tutkielmassa keskitytään mekaaniseen kierrätykseen.

2 Muovijätteen lajittelu

Mekaanisen kierrätyksen prosessi voidaan jakaa kahteen päävaiheeseen: muovijätteen esikäsitteily ja kierrätysmuovigranulaatin (pellettien) valmistus. [11]

Esikäsitteilyyn kuuluu lajittelu, hienonnuks, pesu ja kuivatus[11]. Jotta muovi voidaan kierrättää, täytyy se ensin lajitella muovilajin mukaan. Eri lajittelumenetelmiä voidaan käyttää joko erikseen tai useampaa menetelmää sarjassa. Tähän vaikuttaa halutun lopputuloksen puhtaus, jätevirta sekä käytettävissä oleva rahoitus[8]. Lajittelumenetelmiä on useita erilaisia. Tässä tutkielmassa esitellään niistä kaksi, NIR-sensorit ja Raman-spektroskopia.

Muovien kysyntä on kasvanut viimeisen 70 vuoden aikana noin 200 kertaiseksi. Arviolta vain 9 % kaikesta muovijätteestä ikinä on kierrätetty. Tänä päivänä maailmanlaajuisesti noin 18% muovijätteestä kierrätetään. [12]

2.1 Infrapuna-sensorit

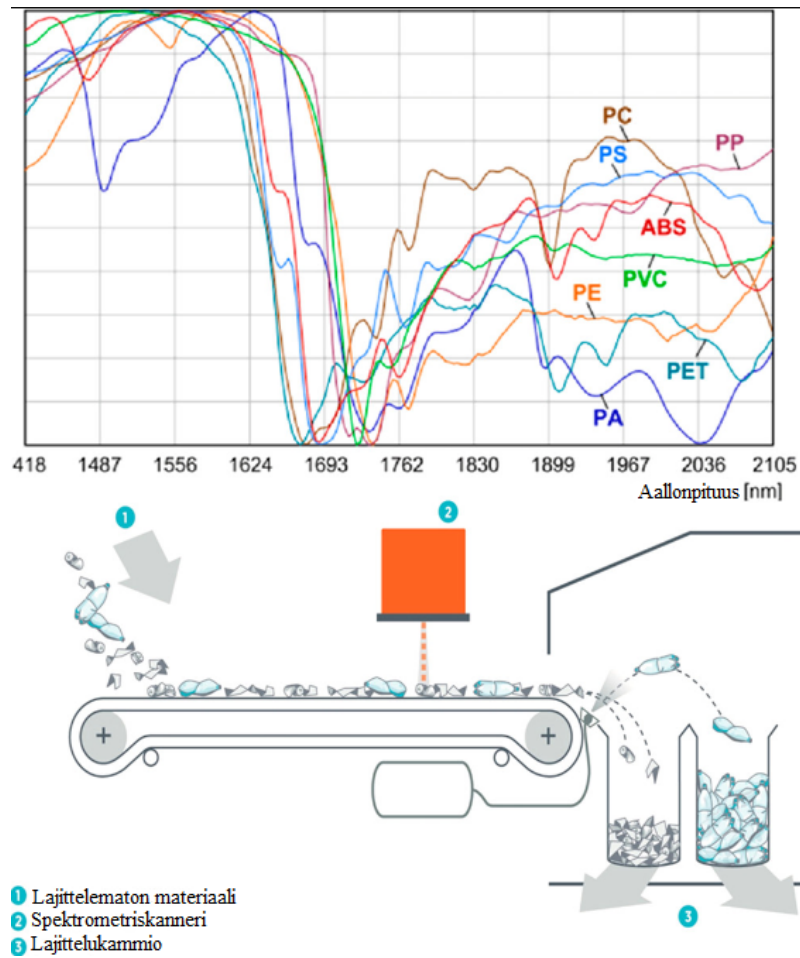
Infrapuna (lyh. IR) -spektroskopia oli ensimmäinen rakenteellinen spektroskopinen tekniikka, jota käytettiin laajalti etenkin kemian tutkimuksessa jo 1930-luvulla. [13] Automatisoidut sensoreihin perustuvat lajittelusysteemit erottelevat materiaaleja

fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi tiheys, sähköjohtavuus ja susceptibiliteetti. Joidenkin näiden systeemien toiminta perustuu pinnan ja materiaalin ominaisuuksiin, kuten väriin tai lyhytaaltoisen infrapunan (eng. near infrared, lyh. NIR) spektriin. [14]

NIR-laitteistossa skannerit keräävät infrapunavalon avulla tietoa materiaalista. Eri-
laiset materiaalit absorboivat eri aallonpituuksia ja näin kone pystyy tunnistamaan ja täten erottelemaan jopa sekajätettä. [14] Myös erilaiset muovilajit heijastavat ja absorboivat eri aallonpituuksia eri tavoilla, joten tämä teknologia on ihanteellinen muovijätteen lajittelulle. Näitä eri muovilajien tuottamia eri aallonpituuksia on esitelty kuvan 3 yläosassa. Erot eivät ole suuria, mutta laitteisto osaa silti erotella ne. Laitteiston toiminta perustuu infrapunasppektroskopiaan, jonka perusideana on mitata kemikaalien tai materiaalien kykyä absorboida tai heijastaa infrapunasäteilyä. Tällä alueella sähkömagneettinen säteily keskittyy erityisesti molekyylin sisällä olevien erilaisten kemiallisten sidosten pyörimis- ja värähtelytaajuuksiin. Nämä taajuudet ovat molekyylien absorboimia resonanssitaaajuuksia, muut taajuudet transmittoituvat. [12] Kuvassa 3 esitetty infrapunalajittelu on yleisin automatisoitu metodi erottelulle, mutta nämä systeemit voivat olla kalliita ja monimutkaisia asentaa jätteidenkäsittelylaitoksille. [10]

Kuvan 3 alaosa esittää NIR-sensoreihin perustuvan lajittelulaitteiston perusperiaatteen. Jäte (1) syötetään tasaisesti liukuhihnalle, jossa NIR-sensori (2) havainnoi sitä. Jos sensorit havaitsevat materiaalia, joka heijastaa tai absorboi tiettyä aallonpituutta, kuten PET, ne lähettävät käskyn ohjainyksikköön (eng. control unit), joka erottelee materiaalin lajittelukammioon (3). Havaitut materiaalit erotellaan muusta jätteestä paineilman avulla. Muovilaji tunnistetaan tutkimalla NIR-spektrin piikkejä ja vertaamalla niitä tietokantaan. [10]

NIR-sensoreihin perustuvalla lajittelulla tavoitellaan laadukkaampia kierrätysmateriaaleja, poistamalla ns. ongelmapartikkeleja. Vegas et al. kuvailee tutkimusta,



Kuva 3. Esimerkki infrapunajäätelussa havaituista aallonpituuksista eri polymeereille. Kuvan alaosassa on esitetty, miten muovijätteen lajittelu infrapunan avulla tapahtuu. Prosessi on sama myös hienonnetulle jätteelle. (kuva suomennettu lähteestä[10])

jossa erilaisia materiaaleja lajiteltiin NIR-lajittelua käyttäen. Tässä tutkimuksessa huomattiin, että käsittelyn jälkeen suurin osa näytteistä sisälsi alle 1% ei-haluttuja materiaaleja. Tässä näytteet eivät kuitenkaan olleet muovijätettä, ja muovi oli luokiteltu ei-halutuksi materiaaliksi. [14]

NIR-spektroskopia perustuu infrapunasaateilyn ja materiaalin väliseen vuorovaikutukseen, jossa säteilyn energia muuttuu tutkittavan materiaalin molekyylien pyörimis- ja värähtelyenergiaksi eli energiaksi, joka yhdistetään molekyylin kemiallisten sidosten koossa pitämien atomien liikkeeseen. Tietyn aallonpituuden (λ) fotonista siirtyvä

energia (E_p) saadaan kaavasta:

$$E_p = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

jossa h on Planckin vakio ja c valonnopeus.

Molekyylien virittyminen tapahtuu, kun tietyn taaajuuden säteily tuottaa tarkalleen kahden värähtelytason välisen energian tai kahden värähtelyn kombinaation. [15]

Suurin osa läpinäkyvistä muovipulloista on PET-muovia, kun taas monet läpinäkymättömät ovat HDPE-muovia. Läpinäkyvät pullot päästävät enemmän valoa lävitseen, joten niiden heijastusspektrillä on matalampi intensiteetti kuin läpinäkymättömillä. Heijastusspektriä voitaisiin siis käyttää muovipullojen lajitteluun.

Tacwalli kertoo artikkelissaan myös muovipullojen epäpuhtauksista ja kertoo, että kuivat epäpuhtaudet eivät vaikuta NIR-signaalin laatuun, mutta paperietiketti vääristää sen toisin kuin todella ohut muovietiketti. Paperietiketin aiheuttama vääristys voidaan kuitenkin eliminoida lukemalla näyte useampaan kertaan. NIR-sensorit eivät ainakaan vielä ole sovellettavissa tosielämän näytteille[7].

Yksi suuri ongelma muovinkierrätyksen parissa on värien ja etenkin mustan värin tunnistus. On kuitenkin joitain mustia väriaineita, jotka voidaan tunnistaa NIR-sensoreilla. [10] Tämä teknologia vaatii kuitenkin vielä runsaasti kehitystä, jotta se saataisiin laajemmalle käytölle.

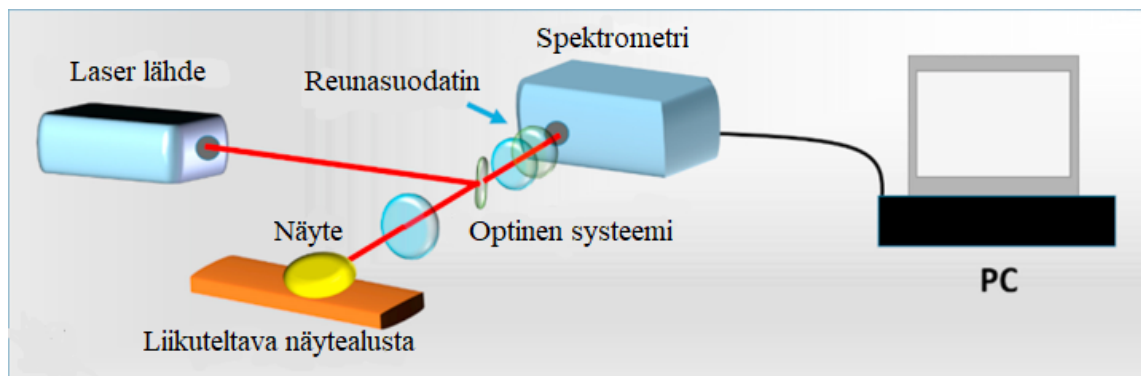
2.2 Raman-spektroskopia

Raman-spektroskopian keksi Chandrasekhra Venkata Raman vuonna 1928. Tuon aikaiset laitteistot olivat alkukantaisia nykyisiin menetelmiin verrattuna. Raman käytti valonlähteenä aurinkoa ja teleskooppia valon kerääjänä. Spektrometrin sijaan hän teki havaintonsa silmin.[16] Vuosien ja vuosikymmenten aikana Raman-spektroskopian laitteisto kehittyi asteittain ja lopulta päädyttiin kuvan 4 laitteistoon, jossa valonlähteenä on laser ja havainnot saadaan spektrometrillä suoraan tietokoneelle. Nykyään Raman-spektri voidaan mitata myös Fourier-muunnos spekt-

roskopiolla. [16]

Spektroskopia tutkii sähkömagneettisen säteilyn ja aineen välistä vuorovaikutusta[16]. Aineet koostuvat molekyyleistä, jotka koostuvat atomeista. Molekyylissä olevat atomit ovat toisissaan kiinni sidoksien (polymeerien tapauksessa yleisesti kovalenttisin sidoksien), jotka värähtelevät tietyillä aallonpituuksilla. Raman-sironta tapahtuu kun laserlähteestä tuleva valon fotonin osuu molekyyliin ja fotonin energia muuttuu. Raman-spektroskopia perustuu eri molekyyleistä tapahtuvaan sähkömagneettisen säteilyn epäelastiseen sirontaan. Sironta voi johtua joko fotonin energian lisääntymisestä tai menetyksestä. Raman-spektroskopiassa näyte säteilytetään voimakkaalla laserilla UV:n näkyvän valon aallonpituusalueella. Näytteestä siroava valo havaitaan spektrometrissä [16]. Molekyylien Raman-spektri antaa "sormenjälki"informaatiota niiden kemiallisista ominaisuuksista. Tämä antaa yksiselitteisen kuvan molekyyli-komponenteista jopa monimutkaisissa seoksissa[7]. Raman-spektri muistuttaa NIR-spektriä ja dataa luetaan piikeistä.

Raman-spektroskopian laitteisto on esitelty kuvassa 4. Tutkittava näyte asetetaan liikutettavalle alustalle ja säteilytetään erityisen monokromaattisella laserilla. Lasersäde tarkennetaan näytteeseen käyttämällä linssisysteemiä. Tässä kyseisessä tilanteessa samaa linssisysteemiä käytetään lasersäteiden tarkentamiseen sekä siroutuneiden signaalien keräämiseen. Reunsuodatin estää muiden kuin haluttujen signaalien (Rayleigh signaalin) pääsyä spektrometriin[7].



Kuva 4. Raman-spektroskopian yleinen laitteisto, kuva suomennettu lähteestä [7]

Raman-spektroskopiolla on useita hyviä puolia, sillä saadaan tarkka molekyyli rakenne analyysi ja se on ideaali laitteisto tosielämän näytteille kuten mikromuoveille [7]. Toisin kuin useat muut analyysimenetelmät, Raman-spektroskopia pystyy mittaamaan myös läpinäkyvien pakkausmateriaalien lävitse. Raman sironta läpinäkyvien näytteiden tapauksessa syntyy ainoastaan pinta kerroksesta eikä riipu näytteen paksuudesta. Partikkelit jotka ovat paksumpia tai jotka absorboivat voidaan tunnistaa ilman näytteen esivalmistelua. Muovien ominaisia spektrejä voidaan suoraan verrata spektrikirjastoon niiden tunnistamiseksi. Jos kuitenkin muovinäytteessä on täytemä tai lisäaineita ne voivat johtaa näytteen epätarkkaan tunnistamiseen. [7] Tämä on jälleen uusi esimerkki, miksi sekoitetuista muoveista tuotettujen tuotteiden lajittelu ja kierrätys on niin haastavaa.

Useilla molekyyleillä Raman-sironta tapahtuu ainoastaan noin yhdellä fotonilla miljoonasta, eli sironnan havaitseminen voi olla erittäin haastavaa. Ramanin laser on niin tehokas, että mustat näytteet kuumenevat liikaa. Sekä Raman- että NIR-spektroskopiassa haastena on usein vaadittava näytteen valmistelu, joka vaatii lisää aikaa ja resursseja lajittelulaitoksilta. [7]

3 Lajittelun jälkeen

Muovijätteen esikäsittelyn jälkeen kierrätysmuovin valmistukseen kuuluu materiaalien erottelu, epäpuhtauksien poisto, uudelleen lajittelu, suulakepuristus ja pelletointi. [11]

Muoviteollisuus ry määrittelee nettisivuillaan suulakepuristuksen seuraavasti: "Ekstruusio, eli suulakepuristus, on menetelmä, jolla muoviraaka-aine plastisoidaan ja muotoillaan jatkuvana prosessina suulakkeen läpi halutun muotoiseksi tuotteeksi." Plastisoinnilla tarkoitetaan muovin sulattamista muovattavaan tilaan.[3]

Taulukossa I on esitetty mekaanisen kierrätyksen materiaalin osuus kierrätysmate-

Taulukko I. Mekaanisesti kierrätetyn materiaalin osuus koko kierrätettävästä materiaalista[11]

Syöte/Ulostulo	Tuote	Määrä (per t kierrätysmateriaalia)
Syöte	Sekoitettu muovijäte	1,5t
	Sähkö	1,89 GJ
Ulostulo	Muovigranulaatti	1t
	Jäännösjäte (poltettu)	0,5t

riaalin . Taulukosta nähdään, että kierrätetystä muovijätteestä arviolta kolmannes ei päädy lainkaan granulaatiksi. Jäännösjäte poltetaan energian säästämiseksi. [11] Kierrätysmuovigranulaatti ei sovellu kaikkiin muovinkäyttötarkoituksiin sen useiden laadullisten ongelmien vuoksi. Sen yleisimmät käyttötarkoitukset ovat tietyömaat, ikkuna- ja oviprofiilit ja putket. Näiden lisäksi sitä käytetään myös esimerkiksi pakkausmateriaalina, joka on muutenkin suurin muovin kääyttötarkoitus Euroopassa (kuva 2). [6]

4 Haasteet

Heterogeenisten tai monikerroksisten muovien mekaaninen kierrättäminen on vaikeaa verrattuna homogeenisiin, vain yhtä muovilajia sisältäviin kappaleisiin. [11] Kierrätysmuovilla ei ole mahdollista savuttaa samaa vahvuutta, väriä, hajua tai muita fysikaalisia ominaisuuksia kuin alkuperäisellä muovituotteella. [2]

Muovin kysynnän laajuus johtaa koko ajan uusiin haasteisiin. Suureen kysyntään vaikuttavat muovattavuus, kestävyys, kustannustehokkuus, alhainen paino, ja mahdollisuus muuttaa muovin fysikaalisia ominaisuuksia käyttämällä lisäaineita ja täyteaineita. Nämä ovat myös osasy syy miksi muovin kierrätys ja hävittäminen ovat niin vaikeita ilman ympäristöhaittoja. Perinteiset jätteen käsittelymenetelmät, kuten hautaaminen tai polttaminen, eivät sovellu muovin käsittelyyn, niistä seuraavien ympäristöhaittojen vuoksi. Esimerkiksi paperijätteen kierrätyksen yhteydessä ei ole vastaavia ympäristöhaittoja, lisäksi sen kierrätys ja uusiokäyttö ovat toimivampia.[7]

4.1 Muovin kierrätyksen haasteet

Jokainen muovilaji reagoi eri lailla mekaanisen kierrätyksen prosessiin. Tähän reagointiin vaikuttavat kyseisen muovin kemialliset ja mekaaniset ominaisuudet sekä sen lämpöominaisuudet. [9]

Siispä pelkästään muovijätteen kierrätys ja uusiokäyttö ei todennäköisesti riitä syrjäyttämään raakaöljyn matalia hintoja ja laajoja käyttömahdollisuuksia. Jotta kierrätysmateriaaleista valmistettujen tuotteiden laatu vastaisi neitsytmuoveista tuotettujen laatua, täytyy yleensä kierrätysmuovigranulaatin sekaan lisätä neitsytmuovia.[2]

Mekaanisesti kierrätettyjen muovien laadullisia ongelmia verrattuna neitsytmuoveihin ovat esimerkiksi: huonommat mekaaniset ominaisuudet kuten vahvuus, jäännösvärit ja -hajut kierrätetystä jätteestä ja ei-toivotut visuaaliset ominaisuudet. Lisäksi on otettava huomioon prosessin parissa työskenteleville työntekijöille aiheutuvat

terveys- ja turvallisuushuolet, jotka johtuvat mm. kierrätetyistä muoveista aiheutuvista hajuista. [2]

Aiemmin esitellyt muovijätteen kierrätysmenetelmät keskittyvät eri muovilajien eikä eri värien tunnistamiseen. Saman polymeerilajin eri väristen kappaleiden sulattaminen ja pelletointi johtaa harmahtavaan tai rusehtavaan lopputuotteeseen, joka ei ole useimmiten toivottua. Näin siis kierrätetyistä polymeereistä valmistetun tuotteen käyttömahdollisuudet ovat rajallisia. Useimmiten näitä harmaita tuotteita tummennetaan vielä ennestään, jotta voidaan tasoittaa vielä mahdollisia värien epätasaisuuksia. Joskus tämä johtaa mustien kappaleiden tuottoon, joiden tunnistus on erittäin haastavaa jos tuote taas päätyy kierrätykseen.[10]

4.2 Tulevaisuuden näkymät

Billiet et al. kertoo The American Chemistry Council:in (ACC) muoviosaston julkaisemasta tutkimuksesta, joka käsittelee muovin korvaamisen vaikutuksia. Tutkimuksessa todettiin, että Yhdysvalloissa muovin korvaaminen voisi luoda 69% enemmän hiilidioksidipäästöjä ja massallisesti 390% enemmän jätettä. Lisäksi se käyttäisi 90% enemmän energiaa ja 481% enemmän vettä kuin nykyinen muovintuotto. Vastaavat luvut Kanadassa ja Euroopassa ovat matalampia. Tämä johtuu matalammasta riippuvuudesta fossiilisiin polttoaineisiin ja korkeammasta kierrätysprosentista kaikille materiaaleille. [10]

Tärkeää olisi siis lisätä kierrätysmahdollisuuksia ja parantaa kierrätyslaitoksien tehokkuutta. On hyvä myös muistaa, että muovijäte ei ole ainoastaan makrotason ongelma. Monet kierrätys- ja lajittelumenetelmät on suunniteltu pääasiassa jätteen käsittelylle. Esimerkiksi mereen päätyvä muovijäte hajoo hiljalleen ja muodostaa mikromuoveja[1]. Aikaisemmin tutkielmassa esitetty Raman-spektroskopia on toimiva menetelmä myös mikromuoveille.

4.3 Biomuovit

Fredi määrittelee biomuovit muoveina, jotka ovat biohajoavia ja/tai tuotettu uusiutuvista materiaaleista. Biomuovit käyttävät huomattavasti vähemmän luonnonvaroja. Vaikka niitä on tutkittu ja kehitetty jo vuosikymmeniä, on niiden kehitys vielä melko alkuvaiheessa. Vuonna 2019 arviolta 0,6% maailman kaikesta muovituotannosta oli biomuoveja. Biomuovien tuotto on kalliimpaa ja monet mekaaniset ominaisuuden heikompia kuin petrokemikaalisten, raakaöljystä tuotettujen, muovien. Vaikka biomuoveja markkinoidaan biohajoavina, ei niiden hävittäminen ole paras mahdollinen vaihtoehto. Useimmat biomuoveista hajoavat hitaasti ja vain tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Lisäksi hajoaminen johtaa metaanipäästöihin, joilla on kielteisiä ympäristövaikutuksia. [1]

Käsitteet biohajoava ja uusiutuvista materiaaleista valmistettu (eng. bio-based) on määritelty kansainvälisesti ja materiaalin täytyy täyttää useita kriteerejä. Esimerkiksi, jotta tuote voidaan määritellä kompostoitavaksi i) sen on hajottava 84 vuorokauden kuluessa niin, että sen alkuperäisestä painosta on jäljellä enintään 10% ii) 180 vuorokauden jälkeen 90% orgaanisesta hiilestä tulisi olla muuttunut hiilidioksidiksi ja iii) tuotetta sisältävän kompostin kyky tukea kasvien kasvua ei saisi erota vastaavasta kompostista, joka ei sisällä tuotetta. [1]

Sen sijaan, että biomuovit päätyisivät suoraan jätteeksi, tulisi niiden elämän kaarta pitkittää usealla uusiokäyttö- ja kierrätysaskeleella. Tämän jälkeen elinkaaren viimeinen askel voisi olla biohajoaminen, toisin kuin petrokemiallisilla muoveilla, joilla viimeinen askel useimmiten on kaatopaikka. Biohajoavat muovit ovat usein suunniteltu hajoamaan vain tietyissä olosuhteissa, yleisimmin teollisissa kompostointilaitoksissa. Ne eivät siis hajoa muissa ympäristöissä tai hajoaminen on erittäin hidasta. Uusiutuvista materiaaleista tuotetut ei-biohajoavat polymeerit kuten bioPET ja bioPE voidaan kierrättää samassa laitoksessa vastaavien petrokemiallisten polymeerien kanssa ja niitä voidaan sekoittaa kierrätettyihin tuotteisiin. Biohajoaviin polyme-

reihin tämä ei päde. Biomuovit eivät voi korvata petrokemikaalisia muoveja kokonaan. Biohajoaville muoveille on kuitenkin löydetty monia kertakäyttösovelluksia. Esimerkiksi biojätepussit, ruokien pakkaukset ja maataloudessa käytetyt multakalvot. [1] Biomuoveiksi luokitellaan esimerkiksi selluloosa-asetaatti (CA) ja viskoosi. Nämä ovat muunnellusta luonnonpolymeereistä valmistettuja. Myös biomassasta valmistettuja muoveja, esimerkiksi sokeri-etanoli-eteeni-reittiä tehty polyeteeni, nimitetään joskus biomuoveiksi.[3]

5 Yhteenveto

Muovijätteen määrän kasvua on mahdotonta pysäyttää hetkessä. On kuitenkin jo olemassa olevia mekaanisen kierrätyksen menetelmiä, joiden avulla voidaan pitkitää muovin käyttöikä ja vähentää muovin määrää kaatopaikoilla.

On myös tärkeää muistaa, että pelkästään muovin kierrätyksen lisääntyminen ei tule ratkaisemaan käsillä olevaa ongelmaa. Tarvitaan ratkaisuja niin tieteellisiltä aloilta kuin hallinnollisiltakin. Muovijätettä syntyy, sillä se on helposti ja edullisesti saatavilla. On siis paitsi kehitettävä vaihtoehtoisia materiaaleja sekä parempia kierrätysmenetelmiä, myös saatava niistä helposti saavutettavia esimerkiksi lainsäädäntöjen avulla. Kierrätetty muovi ei myöskään sovellu kaikkiin neitsytmuovien käyttötarkoituksiin.

Kaikkea muovia ei voida siis korvata vaihtoehtoisilla materiaaleilla. Voidaan kuitenkin keskittyä esimerkiksi suurimpaan muovintuottoalaan, pakkausteollisuuteen. Pakkausmateriaaleja on jo alettu vaihtamaan ympäristöystävällisempiin, kuten kierrätys-/kierrätettäviin kartonkeihin ja papereihin. Kuten tutkielmassa mainittiin, pakkausmuovit ovat yksiä lyhytikäisimmistä muoveista. Niiden käyttöikä voi olla jopa vain muutamia kuukausia.

Lisäksi ongelmina ovat esimerkiksi biomuovien kierrättäminen ei-biomuovien seassa sekä mustat muovit joiden tunnistaminen on erittäin vaativaa. Tärkeintä olisi pai-

nottaa lisää resursseja muovin kierrätysprosessiin. Tutkimusta on keskitettävä käsillä olevaan monipuoliseen määrään erilaisia polymeerejä, näiden tunnistamiseen ja kierrätystuotteiden käyttötarkoitusten keksimiseen. Myös muiden kuin termoplastisten muovien kierrätykseen on löydettävä toimivia keinoja.

Viitteet

- [1] G. Fredi ja A. Dorigato, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* **4**, 159 (2021).
- [2] X. Zhao, B. Boruah, K. F. Chin, M. Đokić, J. M. Modak ja H. S. Soo, *Advanced Materials* **34**, 2100843 (2022).
- [3] Muovisanastoa [online, viitattu 15.2.2024], <<https://www.plastics.fi/sanasto/>>.
- [4] F. Erchiqui, F. A.s ja D. Pagé, kirjassa *Influence Of The Choice of Additives in High Melting Polyesters (HMP) Reinforced With Natural Fibers (NF) in View of Structural Applications* (PUBLISHER, 2011).
- [5] J. Halpern ja S. Johnson, Prince George's Community College General Chemistry for Engineering CHM 2000, chpt 8.8, 2016.
- [6] R. Volk, C. Stallkamp, J. J. Steins, S. P. Yogish, R. C. Müller, D. Stapf ja F. Schultmann, *Journal of Industrial Ecology* **25**, 1318 (2021).
- [7] U. Adarsh, V. Kartha, C. Santhosh ja V. Unnikrishnan, *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **149**, 116534 (2022).
- [8] What is Mechanical Recycling? [online, viitattu 18.11.2024], <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-recycling.aspx>>.
- [9] J. M. Garcia ja M. L. Robertson, *Science* **358**, 870 (2017).
- [10] S. Billiet ja S. R. Trenor, *ACS Macro Letters* **9**, 1376 (2020).
- [11] H. Jeswani, C. Krüger, M. Russ, M. Horlacher, F. Antony, S. Hann ja A. Azapagic, *Science of The Total Environment* **769**, 144483 (2021).
- [12] E. R. K. Neo, Z. Yeo, J. S. C. Low, V. Goodship ja K. Debattista, *Resources, Conservation and Recycling* **180**, 106217 (2022).
- [13] P. Larkin, kirjassa *Infrared and Raman Spectroscopy*, toimittanut P. Larkin (ElsevierOxford, 2011), pp. 7–25.
- [14] I. Vegas, K. Broos, P. Nielsen, O. Lambertz ja A. Lisbona, *Construction and Building Materials* **75**, 121 (2015).
- [15] Y. Tachwali, Y. Al-Assaf ja A. R. Al-Ali, *Resources, Conservation and Recycling* **52**, 266 (2007).
- [16] J. R. Ferraro, K. Nakamoto ja C. W. Brown, kirjassa *Introductory Raman Spectroscopy (Second Edition)*, toimittanut J. R. Ferraro, K. Nakamoto ja C. W. Brown (Academic PressSan Diego, 2003), pp. 1–94.