

LUT-Yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

SER-MUOVIEN SISÄLTÄMIEN HAITALLISTEN AINEIDEN
TUNNISTUSMENETELMÄT JA TEHOKKUUS

THE IDENTIFICATION METHODS OF HARMFUL SUBSTANCES IN WEEE
PLASTICS AND EFFECTIVENESS

Lappeenrannassa 3.6.2020

Juuso Juuri

Tarkastaja Prof. Timo Kärki

Ohjaaja TkT Ville Lahtela

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Juuso Juuri

SER-muovien sisältämien haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät ja tehokkuus

Kandidaatintyö

2020

51 sivua, 7 kuvaa ja 7 taulukkoa

Tarkastaja: Prof. Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Ville Lahtela

Hakusanat: sähkö- ja elektroniikkaromu, muovien haitalliset aineet, muovien tunnistusmenetelmät

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan sähkö- ja elektroniikkaromussa (SER) käytettyjen muovien haitallisia aineita ja niiden tunnistusmenetelmiä. Työn tavoitteena on arvioida haitallisten aineiden tunnistusmenetelmien tehokkuutta, nopeuden, taloudellisuuden, ympäristöystävällisyyden ja toimivuuden kannalta. Työn tutkimusmenetelmänä on systemaattinen kirjallisuuskatsaus ja hyvien tuloksien saamiseksi työssä pyrittiin käyttämään mahdollisimman uutta lähteistöä. Aiheeseen saavutettiin erilaisia näkökulmia hyödyntäen asiantuntijoiden haastattelua SER-muoveista.

SER-muovit lisääntyvät jatkuvasti globaalilla tasolla ja niiden kierrättäminen sekä uudelleen prosessointi vaatii kehitystä. SER-muovit erotellaan pääosin mekaanisesti muista SER-materiaaleista, jonka jälkeen niille voidaan tehdä erilaisia jatkotoimenpiteitä. SER-muoveille käytettyjä tunnistusmenetelmiä on useita. SER-muovien haitallisista aineista hyvin yleisiä sekä huomiota tunnistamisessa vaativia ovat bromatut palonestoaineet. SER-muovien sisältämistä haitallisista aineista on tehty erilaisia lakeja ja säädöksiä. Lait ja säädökset koskevat SER-muovin haitallisten aineiden käyttöä valmistusvaiheessa sekä oikeanlaista kierrättämistä tietynlaisten aineiden esiintyessä muovissa. Toimiva ja oikeanlainen lajittelu ja alkukäsittely tukee SER-muovien tunnistusmenetelmien tehokkuutta.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Juuso Juuri

The identification methods of harmful substances in WEEE plastics and effectiveness

Bachelor's thesis

2020

51 pages, 7 figures and 7 tables

Examiner: Prof. Timo Kärki

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Ville Lahtela

Keywords: waste electrical and electronic equipment, identification methods for plastics, harmful substances in plastics

This bachelor's thesis investigates the identification methods of harmful substances in electrical and electronic waste (WEEE) plastics. The aim of this thesis is to evaluate the efficiency by speed, economy, environmental friendliness and functionality of methods for the identification of harmful substances. The researching method of the thesis is a systematic literature review. In order to obtain good results in the thesis is based to sought as new sources as possible. Different perspectives were reached on the topic by utilizing an interview of experts on plastics in WEEE.

Plastics in WEEE are constantly increasing on a global scale and their recycling and reprocessing requires development. Plastics in WEEE are mainly mechanically separated from other materials in WEEE. After that they can be subjected to various further operations. There are several identification methods used for plastics in WEEE. Brominated flame retardants are very common and demanding in identification of plastics in WEEE. Various laws and regulations have been made about the harmful substances of plastics in WEEE. Laws and regulations concern the use of harmful substances in plastics at the manufacturing stage and the proper recycling of certain types of substances. Functional and correct sorting and initial treatment supports the efficiency of plastic identification methods.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
LYHENNELUETTELO	5
1 JOHDANTO	7
1.1 Tutkimuksen tausta	7
1.2 Työn tavoitteet	8
1.3 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymys	8
1.4 Rajaukset.....	8
2 TUTKIMUSMENETELMÄT	9
2.1 Kirjallisuuskatsaus	9
2.2 Systemaattinen kirjallisuuskatsaus	9
2.3 Tutkimuksen lähestymistapa.....	10
3 SER-MUOVIT	11
3.1 SER	11
3.1.1 Materiaalit	12
3.1.2 Esikäsittely ja kierrätys	13
3.2 SER-muovit	14
3.3 SER-muovien käyttö.....	15
3.4 SER-muovien kierrätys	17
4 HAITALLISET AINEET JA NIIDEN TUNNISTUSMENETELMÄT	19
4.1 SER-muovien haitalliset aineet.....	19
4.1.1 RoHS.....	19
4.1.2 Palonestoaineet	20
4.1.3 Muoveissa esiintyvät liuottimet	21
4.1.4 Muovien pehmentimet	22
4.1.5 Muovien muut lisäaineet.....	23
4.2 Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät	24
4.2.1 Liukeneminen	24
4.2.2 Palaminen.....	25
4.2.3 Lämpöanalyysitekniikka	26
4.2.4 Spektrometrinen lajittelu.....	28
4.2.5 Tiheyden perustuvat menetelmät	30
4.2.6 Mekaaninen analyysi	33
4.2.7 Pesemismenetelmät.....	34
5 TEHOKKUUS	36
5.1 SER keräys.....	36
5.2 SER-muovien yhdisteet	36
5.3 Symbolikoodit.....	37
5.4 Kemiallinen lajittelu	38
5.5 Haastattelu SER-muovin käsittelystä Suomessa.....	39
5.5.1 SER:n- ja SER-muovin kierrättäminen Suomessa yleisesti	40
5.5.2 Toimintatapoja SER-muovin sisältämille haitallisille aineille	40
5.5.3 SER-muovien haitallisten aineiden tunnistamisen tehostaminen	41
6 POHDINTA	42
LÄHTEET	45

LYHENNELUETTELO

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene, (<i>akryliniiriibutadieenistyreeni</i>)
ATR	Attenuated total reflection, (<i>vaimennettu kokonaisheijastus</i>)
DSC	Differential scanning calorimetry, (<i>differentiaaliskannauskalorimetri</i>)
DTA	Differential thermal analysis, (<i>differentiaalilämpöanalyysi</i>)
EEE	Electrical and electronic equipment, (<i>SE, sähkö- ja elektronisetlaitteet</i>)
EPS	Expanded polystyrene, (<i>solupolystyreeni</i>)
FTIR	Fourier transform infrared, (<i>fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia</i>)
HBCB	Hexabromocyclododecane, (<i>heksabromisyklododekaani</i>)
HDPE	High-density polyethylene, (<i>korkeatiheksinen polyeteeni</i>)
HIPS	High impact polystyrene, (<i>iskunkestävä polystyreeni</i>)
IARC	International agency for research on cancer, (<i>kansainvälinen syöväntutkimuslaitos</i>)
IR	Infra-red, (<i>infrapuna</i>)
LDPE	Low-density polyethylene, (<i>matalatiheksinen polyeteeni</i>)
MDS	Magnetic density separation, (<i>magneettitiheyserottelu</i>)
LIPS	Laser induced plasma spectroscopy, (<i>laserindusoitu plasmaspektroskopia</i>)
MIR	Mid infrared spectroscopy, (<i>keski-infrapunaspektroskopia</i>)
NaOH	Sodium hydroxide, (<i>natriumhydroksidi</i>)
NIR	Near infrared spectroscopy, (<i>lähi-infrapunaspektroskopia</i>)
OPE	Organophosphates, (<i>organofosfaatit</i>)
PA	Polyamide, (<i>polyamidi</i>)
PBDE	Polybrominated diphenyl ether, (<i>polybrominoitu difenyylieetteri</i>)
PBT	Polybutylene terephthalate, (<i>polybutyleenitereftalaatti</i>)
PC	Polycarbonate, (<i>polykarbonaatti</i>)
PE	Polyethylene, (<i>polyeteeni</i>)
PET	Polyethylene terephthalate, (<i>polyeteenitereftalaatti</i>)
PMMA	Polymethyl methacrylate, (<i>polymetyylimetakrylaatti</i>)
POM	Polyoxymethylene, (<i>polyoksimeteeni</i>)
POP	Persistent organic pollutants, (<i>pysyvät orgaaniset yhdisteet</i>)
PP	Polypropylene, (<i>polypropeeni</i>)
PPO	Polyphenylene oxide, (<i>polyfenyylioksidi</i>)

PS	Polystyrene, (<i>polystyreeni</i>)
PUR	Polyurethane, (<i>polyuretaani</i>)
PVC	Polyvinyl chloride, (<i>polyvinylikloridi</i>)
REEs	Rare earth elements, (<i>harvinaiset maametallit</i>)
RoHS	Restriction of Hazardous Substances, (<i>vaarallisten aineiden rajoittaminen</i>)
SAN	Styrene acrylonitrile, (<i>styreeniakrylinitriili</i>)
TGA	Thermogravimetric analysis, (<i>lämpögravimetrinenanalyysi</i>)
TBA	Torsion braid analysis, (<i>vääntöpunosanalyysi</i>)
TBBPA	Tetrabromobisphenol A, (<i>tetrabromibisfenoli-A</i>)
TCEP	Tris 2-carboxyethyl, (<i>tris-2-kloorietyyli</i>)
TDCIPP	Tris 1,3-dichloro 2-propyl phosphate, (<i>1-klooripropaani-2-propyylifosfaatti</i>)
UP	Unsaturated polyester, (<i>tydyttämätön polyesteri</i>)
WEEE	Waste electrical and electronic equipment, (<i>SER, sähkö- ja elektroniikkalaiteromu</i>)
XRD	X-ray diffraction, (<i>röntgen diffraktio</i>)
XRF	X-ray fluorescence, (<i>röntgen fluoresenssi</i>)

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta



Kuva 1. Puretun sähköelektronisenlaitteen muovilaatuja (Malin & Tuominen 2017).

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun (SER) sisältämien muovien jatkuva lisääntyminen ja jatkokäsittelyn haastavuus on kasvava, sekä globaali ongelma. SER-muoveja esiintyy lähes päivittäin käytettävissä laitteissa, kuten tietokoneissa, puhelimissa ja kodinkoneissa (Kuva 1). Ongelman taustalla on SER-muovin sisältämien haitallisten aineiden ajallisesti ja taloudellisesti tehokkaiden tunnistusmenetelmien löytäminen ja yleisesti SER jatkokäsittely- ja kierrätys. Tässä tutkimuksessa tehdään kirjallisuuskatsaus SER-muovien sisältämiin haitallisiin aineisiin ja niiden tunnistamiseen liittyviin ongelmiin ja pyritään löytämään, sekä arvioimaan menetelmiä nykyhetkeen ja tulevaisuuteen. Työtä tullaan hyödyntämään LUT-yliopiston konetekniikan osaston seuraavien tutkimuksien ja projektien pohjatyönä. SER-määrät tulevat lisääntymään tulevaisuudessa, joten tehokkaiden menetelmien löytäminen tulee olemaan hyödyksi seuraavien tutkimuksien ja käytännön ratkaisujen kannalta.

1.2 Työn tavoitteet

Työssä tutkitaan SER-muovien sisältämiä haitallisia aineita ja niiden tunnistusmenetelmiä, sekä tehokkuutta. Työn päätavoitteena on saavuttaa mahdollisimman taloudellinen, tehokas ja ympäristöystävällinen tunnistusmenetelmä. Lisäksi työn tavoite on avata elektronisista laitteista puretun muovivromun haasteita kierrätyksessä ja valmistuksessa, sekä kertoa yleisesti sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta. SER-muovien haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät ovat aiheena sen verran marginaalinen, että tietoa on vaikeasti saatavilla, mutta tulevaisuudessa tälle tiedolle tulee olemaan käyttöä.

1.3 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymys

Tutkimuksen ongelmana on eri vaihtoehtojen kartoitus tunnistusmenetelmiin ja selvittää onko tunnistamiseen mahdollisesti tullut uusia teknologioita markkinoille. Tutkittavan aiheen muuttujina toimivat haitalliset aineet ja eri teknologiat, joilla haitallisia aineita tunnistetaan eri parametrein. Ongelmana on moniako haitallisia aineita tietyt teknologiat kykenevät tunnistamaan. Osa teknologioista saattaa tunnistaa vain yhden merkittävän aineen tai jopa useita aineita. Lisäksi analysoidaan, miten SER-muovin jatkokäsittelyn vaikeaa ennustettavuutta saataisiin parannettua ja mistä johtuu, että tunnistusmenetelmien tehokkuuteen vaikuttaa erilaiset ympäristöolosuhteet.

1.4 Rajaukset

Työn aihe rajattiin tutkimaan ainoastaan SER-muovia, koska muista SER aineiden haitallisuudesta ja jatkokäsittelystä on hyvin tietoa saatavilla. Lisäksi muovia käytetään yhä enemmän sähkö- ja elektronisten laitteiden (SE) valmistusmateriaalina, joten tulevaisuudessa muovien kierrättämistä on lisättävä. Työssä keskitytään menetelmien toimivuuden tarkasteluun erilaisissa ympäristöolosuhteissa, koska muovilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia esimerkiksi kosteassa tai lämpötilaa vaihtelevissa olosuhteissa. Ympäristöolosuhteilla tulee olemaan suuri vaikutus tutkimuksen lopputulokseen. Työssä otetaan myös huomioon haitallisia ainesosia sisältävän SER-muovin jatkokäsittelyn vaikea ennustettavuus. Rajauksena tehokkuuden mittaamisessa käytetään aikaa. Menetelmiä vertaillaan toisiinsa sen mukaan, kuinka nopeaa jatkokäsittely- ja tunnistaminen on. Lisäksi luotettavien menetelmien potentiaalia tarkastellessa on tärkeää huomioida elektroniikkatuotteiden jatkuva yleistyminen ja niiden käyttöiän pieneneminen.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Kirjallisuuskatsaus

Tässä työssä käytetään tutkimusmetodiikkana systemaattista kirjallisuuskatsausta. Kirjallisuuskatsauksessa pyritään analysoimaan ja arvioimaan omaa aihetta ja tutkimusongelmaa. Kirjallisuuskatsauksessa käytetään apuna aikaisempia tutkimuksia ja tieteellistä kirjallisuutta. Aikaisempien tutkimuksien ja kirjallisuuden hyödyntämisessä tulee olla kriittinen ja käyttää vain luotettavia lähteitä. (Koppa 2019).

2.2 Systemaattinen kirjallisuuskatsaus

Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on tieteellinen tutkimusmenetelmä, jossa on tarkka kriteeristö tiedonhankintaa. Tärkeää systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa on tutkimusprosessin huolellinen dokumentointi. (Koppa 2019). Tässä työssä systemaattisesti dokumentoidaan tiedonhaun prosessia erilaisista tietokannoista tutkimukseen asetetuilla rajauksilla. Lähteiden hakuun työssä käytetään yritysten- ja yhdistysten verkkosivuja ja kirjallisuutta. Kirjallisuus lähteiden hakemiseen hyödynnetään LUT Finna-ohjelmistoa. Lähdekriittisyys on tärkeää ja tässä työssä etenkin tieteellisten artikkeleiden arviointiin käytetään SCOPUS-ohjelmistoa. Tietoa on marginaalisesti vähän saatavilla SER-muovien haitallisten aineiden tunnistusmenetelmistä. Lisäksi tässä työssä pyritään selvittämään markkinoilla olevia uusia tunnistusmenetelmiä, joten lähdekriittisyydessä keskitytään mahdollisimman uusien lähteiden käyttämiseen ja analysointiin. Lähteiden hakemisessa on tärkeää käyttää hakusanoina muovia ja tunnistusmenetelmiä, koska lähes kaikki tieteelliset artikkelit käsittelevät yleisesti SER:a. Löydettyjen lähteiden käsittelyssä valitaan uudet ja SCOPUS-haussa luotettavaksi todetut lähteet. Lisäksi löydettyistä lähteistä tulee tehdä yhteenveto, mitä näkökulmaa heidän artikkeleissaan hyödynnetään välttääkseen uudelleen kerrontaan ja referointia.

2.3 Tutkimuksen lähestymistapa

Työn ongelmanratkaisuun käytetään SCOPUS-hakua, jonka avulla paneudutaan aiheeseen liittyvien tieteellisten artikkeleiden analysointiin. Työn toteutus on luonteeltaan kvalitatiivinen lähdekirjallisuuteen perustuva tutkimus ja siihen hyödynnetään sähkö- ja elektroniniikkalaiteromun olemassa olevia säädöksiä ja lakipykälää. Tutkimuskysymykseen pyritään vastaamaan triangulaation avulla. Triangulaatio on tutkimusmenetelmä, jossa valitaan erilaisia näkökulmia aiheen tutkimiseen ja analysointiin. Tämän systemaattista kirjallisuuskatsausta noudattavan tutkimuksen triangulaatio muodostuu tieteellisistä lähteistä, lakiasetuksista ja asiantuntijahaastattelusta. Asiantuntijahaastattelun toteutus pohjautuu kvalitatiiviseen strukturoimattomaan haastatteluun. Haastattelu on kysymyksiltään ja vastauksiltaan avoin ja se dokumentoidaan litteroiden. Asiantuntija vastaa avoimesti hänelle esitettäviin kysymyksiin ja tapahtumasta otetaan äänitallenne. Äänitallenne puhtaaksikirjoitetaan tekstimuotoon ja siitä rakennetaan omin sanoin kappale asiantuntijoiden näkökulmasta kirjoitettuna. Tutkimuksen triangulaation avulla pyritään varmistamaan johtopäätökset valideiksi.

3 SER-MUOVIT

3.1 SER

SER eli sähkö- ja elektroniikkalaiteromu on sähköelektronisista laitteista purkamisvaiheessa syntyvää jätettä. Sähköelektroniikan laiteromusta on EU asettanut laitedirektiivin (WEEE-direktiivi). Suomessa direktiivi on saatettu lainsäädäntöön jätelailla (646/2011), sekä ympäristösuojelulain (86/2000) 16- ja 52§:n neljän momentin nojalla. Kyseisestä laiteromusta on Suomessa laadittu valtioneuvoston asetus (519/2014). (Finlex 2014). Sähkö- ja elektroniikkaromua ei saa sotkea muiden jätteiden kanssa. Suomessa on kierrätyspisteinä SER:lle omat jäteasemat, sekä palautuspisteitä joissakin kaupoissa. Näihin kierrätyspisteisiin voi toimittaa SER:a ilmaiseksi.

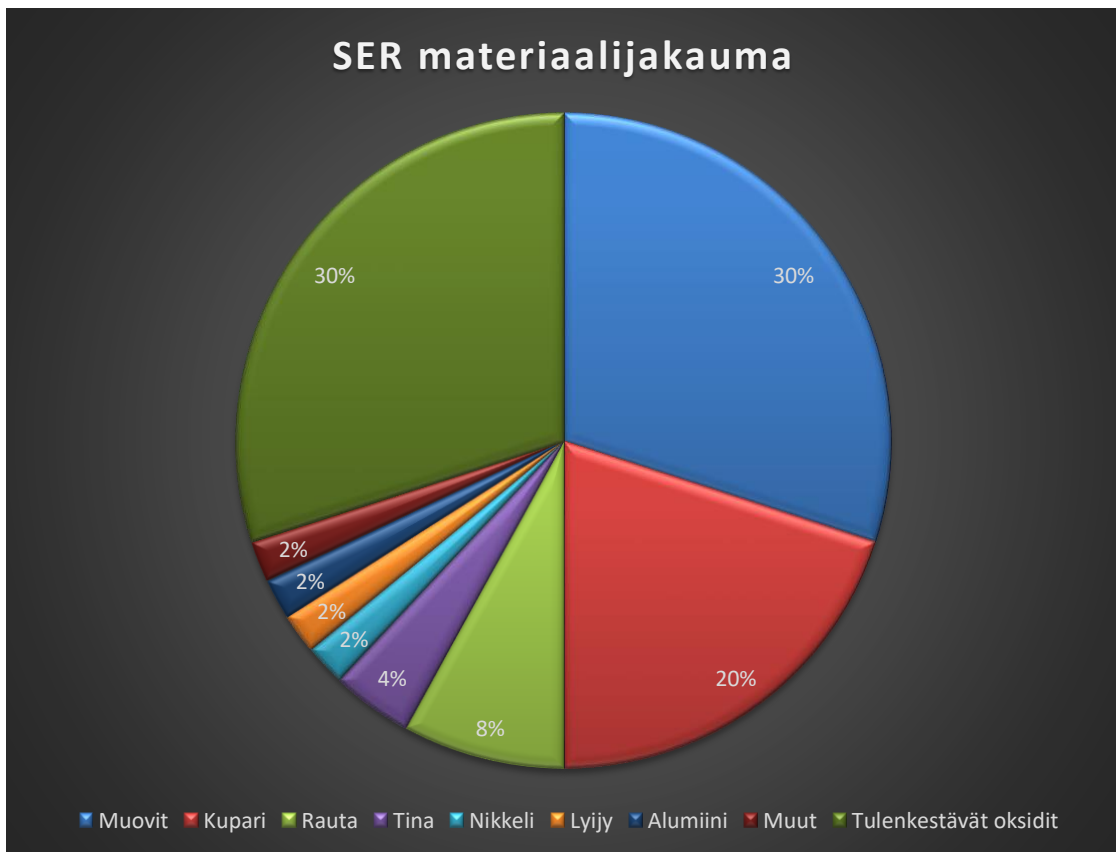
SER:n piiriin kuuluvat kaikki paristo- ja akkukäyttöiset, sekä aurinkoenergialla tai sähkövirralla toimivat laitteet. Kategoriaan kuuluu myös kaikki lamput, paitsi halogeeni- ja hehkulamppu. (SER-kierrätys 2012). Sähkö- ja elektroniikkalaiteromut ovat asetettu RoHS-direktiivin mukaan eri luokkiin (Taulukko 1).

Taulukko 1. Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun laiteluokat. (Eskelinen et al. 2016).

LUOKKA	LAITTEET
1	Suuret kodinkoneet
2	Pienet kodinkoneet
3	Tieto- ja teletekniset laitteet
4	Kuluttajaelektroniikka
5	Valaistuslaitteet
6	Sähkö- ja elektroniikkatyökalut
7	Lelut ja urheiluvälineet
8	Terveystuotteiden laitteet ja tarvikkeet
9	Tarkkailu- ja valvontalaitteet
10	Automaatit
11	Muut sähkö- ja elektroniikkalaitteet

3.1.1 Materiaalit

Sähkö- ja elektroniikkalaitteet (SE) muodostavat tällä hetkellä isoimman jätevirran Euroopassa. SER määrän arvioidaan olevan vuoden 2020 loppuun mennessä 12 miljoonaa tonnia. Tämä tulee asettamaan haasteita, sillä SE-laitteista pyritään erottelemaan- ja taltioimaan materiaaleja. Sähkö- ja elektroniikkalaitteet koostuvat monista erilaisista materiaaleista, joista käytetyimpiä ovat metallit ja muovit. Sähkö- ja elektroniikkalaitteissa käytetyistä metalleista yleisempiä ovat rauta (Fe), kupari (Cu) ja alumiini (Al). Joissain laitteissa käytetään myös arvometalleja, kuten kulta (Au), hopea (Ag) ja palladium (Pd). SE-laitteissa käytettäviä kriittisiä raaka-aineita (CRM, Critical Raw Materials) ovat indium (In), gallium (Ga), koboltti (Co), pii (Si) ja maametallit (REEs, Rare Earth Elements). SE-laitteista löytyy myös vaaralliseksi luokiteltuja aineita, kuten arsenikkia ja tulenkestäviä oksideja- ja lisäaineita. Muita SE-laitteissa käytettäviä aineita ovat esimerkiksi lasi ja keraamiset aineet, kuten savi. (European Commission 2016). SER määrien jatkuva kasvaminen ja uusien materiaalien käyttäminen luo paljon haasteita SER lajittelun- ja kierrättämisen kannalta.



Kuva 2. SER materiaalien jakautuminen. (Czajczynka et al. 2017).

Kuvassa 2 on visualisoitu arvio sähköelektronisen laitteen keskimääräisestä materiaali-jakaumasta. Käytetyimpiä materiaaleja ovat erilaiset muovit, tulenkestävät oksidit- ja lisäaineet sekä kupari. Nämä materiaalit kattavat SE-laitteen materiaalisällöstä noin 80 prosenttia. SE-laitteet sisältävät muita materiaaleja huomattavasti vähemmän, mutta kuitenkin merkittävästi tunnistamisen ja kierrättämisen kannalta.

3.1.2 Esikäsittely ja kierrätys

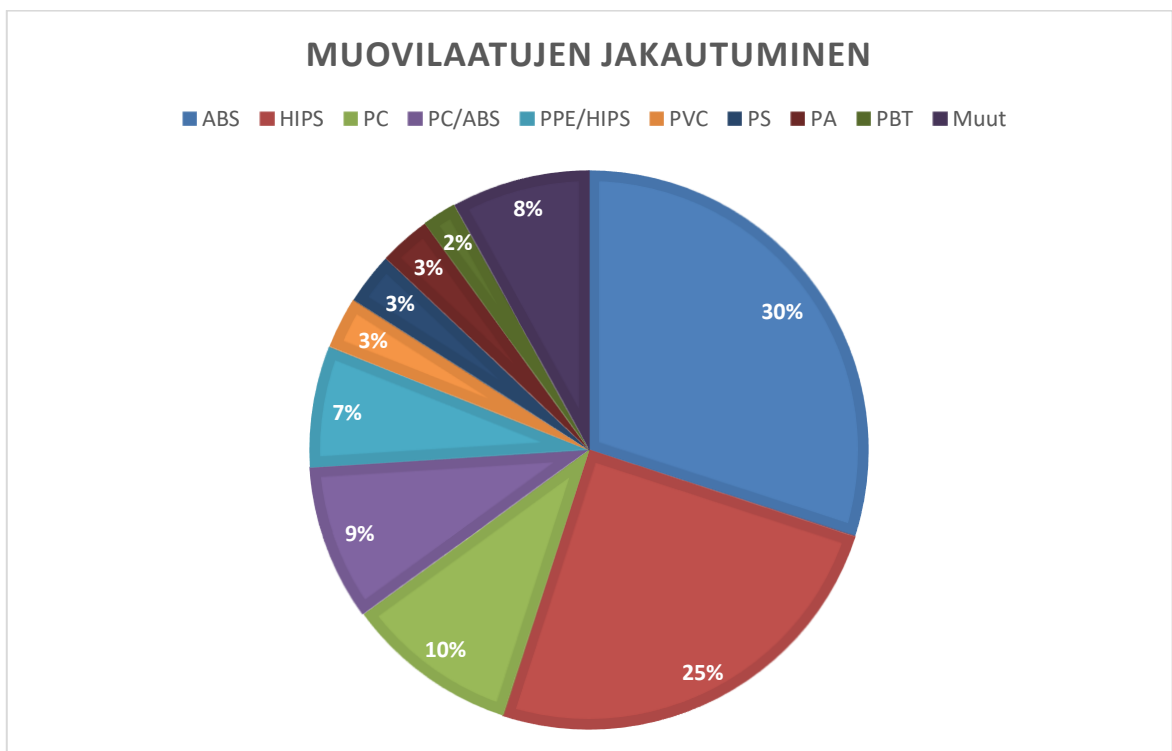
SER:n esikäsittelypaikalla laitteet luokitellaan pääpiirteisesti kokonsa- ja koostumuksensa mukaan. SE-laitteista taltioidaan suurin osa erilaisista metalleista. SER:n esikäsittelyssä käytetään pääosin mekaanista esikäsittelyä. Mekaanisessa esikäsittelyssä voidaan käyttää esimerkiksi ristivirtausleikkuria, pyörösilppuria tai hitaasti pyöriviä pyöröleikkureita. SER:n murskaamisen jälkeen suositetaan hitaasti pyörivien vasaramyllyjen, veitsimyllyjen, iskumyllyjen ja rakeistimien käyttöä. Murskaamiseen käytetyt menetelmät riippuvat laitteen koosta. Tämän hetkisiä murskaamisessa käytettyjä menetelmiä on useita ja ne vaihtelevat pääosin murskaamisessa käytetyn muovin koon ja koostumuksen mukaisesti. SER:n murskaamisen ja pienentämisen jälkeen ne seulotaan kehruurumpuun, jossa materiaaleista poistetaan niihin sitoutunut lika- ja mahdolliset haitalliset aineet. (Vegliò & Birloga 2018).

Kierrätykseen vietyjen SE-laitteiden joukosta seulotaan käyttökelpoiset laitteet, jotka menevät uudelleen käyttöön. Suurin osa kierrätykseen viedyistä SE-laitteista on niin huonossa kunnossa, että ne siirretään esikäsittelyyn, jossa ne murskataan ja käytetään uudelleen materiaaleina. Kaikista tehokkainta on nykyaikaisten tietokoneiden materiaalin hyödyntäminen, niistä saadaan jopa 99% kierrätettyä teollisuudessa uudelleen käytettäväksi. Lisäksi, tuottajavastuulainsäädäntö sitoo yrityksiä Euroopan alueella SE-laitteita toimittavia tai valmistavia yrityksiä huolehtimaan laitteista, kun niistä päätetään luopua. Suurin osa yrityksistä liittyy tuottajayhteisöön, joka keskitetysti kerää ja kierrättää käytetyt laitteet. (SER-kierrätys 2012).

3.2 SER-muovit

SER-muovit ovat sähköelektronisissa laitteissa käytettyjä muoveja, jotka luetellaan romuksi. SE-laitteiden muoveista valtaosa luetellaan teknisiksi muoveiksi, mutta myös valtamuoveja käytetään paljon (Järvelä & Järvelä 2015). Muovit ovat tärkeä rakennusosa sähköelektronisille laitteille niiden ominaisuuksien johdosta. Sähköelektronisissa laitteissa esimerkiksi matkapuhelimissa tarvitaan kimmoisuutta, lämmön- ja sähköneristävyyttä, keveyttä, värjäytyvyyttä, sekä muovattavuutta. Muoveilla saadaan kustannustehokkaasti täytettyä nämä laitteiden ominaisuusvaatimukset (Kuva 1).

Muovit ja niiden ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, mitä polymeerejä, sekä lisäaineita niissä käytetään. Muovien polymeerit ovat pääosin orgaanisia materiaaleja, jotka koostuvat pienistä monomeereista. Muovien lisäaineet koostuvat erilaisista täyte- ja apuaineista, sekä seosaineista. Muovien lisäaineiden avulla säädellään polymeerien ominaisuuksia. Lisäaineiden avulla muoviin saadaan kestävyyttä, värejä, kimmoisuutta, muovattavuutta, erilaisien olosuhteiden sietokykyä, sekä muita ominaisuuksia. Lisäaineet muodostavat pääosin valmistetun muovin valmistuskustannukset ja myyntihinnan. (Luhtala 2018). Erilaisien ominaisuuksien omaavien polymeerilaatujen käyttäminen SER-laitteissa jakautuu Kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Tyypillinen SER-muovilaatujen jakautuminen. (Dimitris et al. 2015).

SER-laitteista kaksi selvästi eniten löytyvää muovimateriaalia ovat akryylinitriilibutadienistyreenia (ABS) sisältävät muovit ja iskunkestävät polystyreeni muovit (HIPS). Nämä muovityypit muodostavat lähes puolet SER-muovityypeistä (Kuva 3). Myös monia muita muovityyppejä ja muovisekoitteita käytetään paljon, niiden ominaisuuksien ja laitteiden vaatimuksien vuoksi. Lisäksi monissa SE- laitteissa käytetään muoviyhdisteitä ja tämä aiheuttaa haasteita haitallisten aineiden tunnistamiseen ja erotteluun.

3.3 SER-muovien käyttö

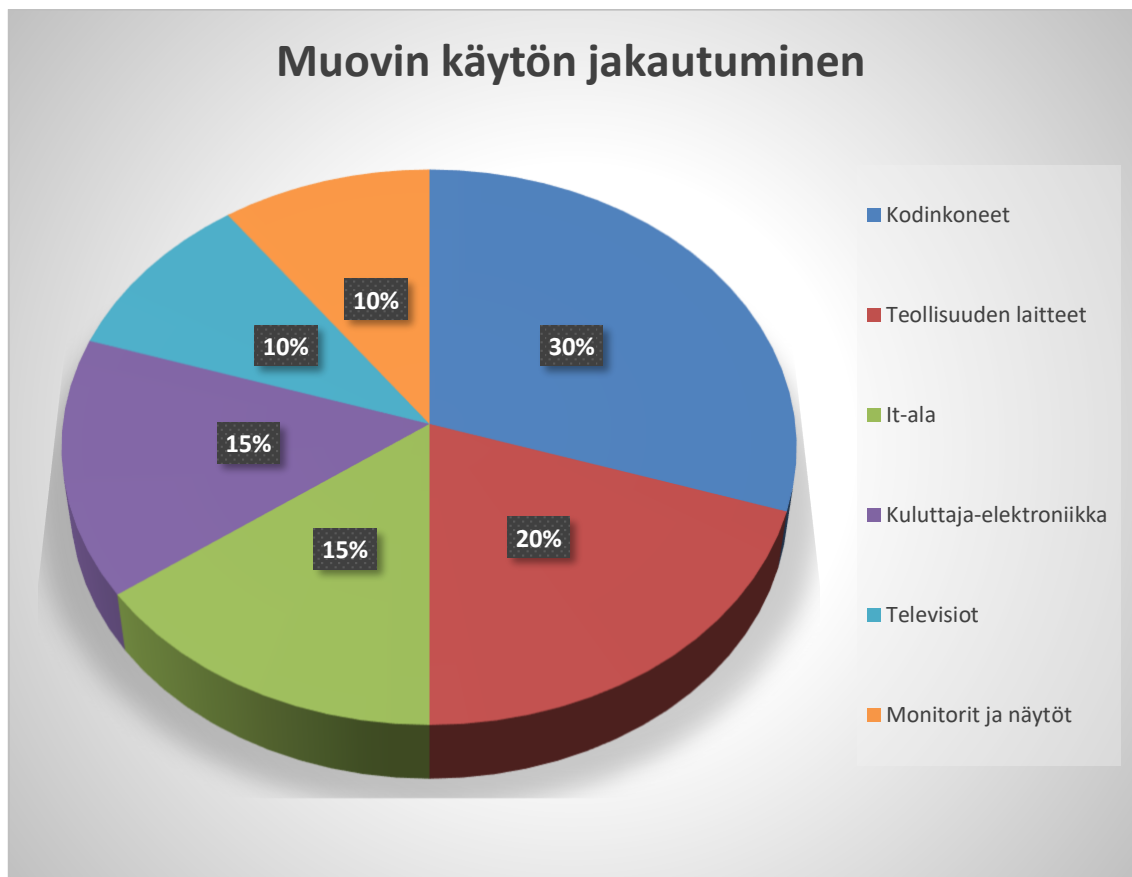
SER-muoveissa käytetään monia erilaisia polymeerejä ja niistä yleisimpiä on akryylinitriilibutadienistyreeni (ABS), iskunkestävä polystyreeni (HIPS), polypropeeni (PP), polyuretaani (PUR), polyvinyylikloridi (PVC), polystyreeni (PS), polyfenyylioksidi (PPO), polyamidi (PA), polykarbonaatti (PC), polyeteeni (PE), polymetyylimetakrylaatti (PMMA) eli pleksilasi, polysteriinimuovi (EPS) eli styrox, styreeniakryylinitriili (SAN), polyeteenitereftalaatti (PET), tyydyttämätön polyesteri (UP) ja polybutyleenitereftalaatti (PBT). Monesti SER-muoveissa käytetään myös polymeerisekoitteita. Esimerkiksi autojen puskureissa käytetty PC+ABS on varsin yleinen sekoite, jota käytetään myös SE-laitteissa.

Taulukko 2. SER-laitteiden sisältämät polymeerit. (Buekens & Yang 2014).

Tulostimet ja faksit	PS (80%), HIPS (10%), SAN (5%), ABS, PP
Telekommunikaatio laitteet	ABS (80%), PC/ABS (13%), HIPS, POM
Televisiot	PPE/PS (63%), PC/ABS (32%), PET (5%)
Lelut	ABS (70%), HIPS (10%), PP (10%), PA (5%), PVC (5%)
Monitorit ja näytöt	PC/ABS (90%), ABS (5%), HIPS (5%)
Tietokoneet	ABS (50%), PC/ABS (35%), HIPS (15%)
Pienet kodinkoneet	PP (43%), PA (19%), ABS-SAN (17%), PC (10%), PBT, POM
Jäähdytyslaitteet	PS&EPS (31%), ABS (26%), PU (22%), UP (9%), PVC (6%)
Astianpesukoneet	PP (69%), PS (8%), ABS (7%), PVC (5%)

Erilaisten polymeerien jakautuminen käytetyimmissä SER-laitteissa ja voidaan huomata, että ABS-muovia esiintyy kaikissa SER-luokissa jossain määrin (Taulukko 2).

SE-muoveja käytetään paljon niiden ominaisuuksien, muovattavuuden ja valmistushinnan vuoksi. Muovien valmistus on kehittynyt paljon ja lisäaineita käyttämällä muoveista saadaan todella laajasti erilaisia ominaisuuksia. SER määrät kasvavat jatkuvasti ja muovin käyttö SE-laitteissa kasvaa myöskin jatkuvasti. Tulevaisuudessa SER-muovit tulevat olemaan suuri ongelma jätteiden lajittelussa- ja uudelleenkäyttämässä. SE-muovien käyttämisen hurjaan kasvuun suurin tekijä on jatkuva teknologian kehittyminen ja ihmisten mukavuushaluisuus. SER-muovien käyttäminen yleisesti jakautuu pääosin Kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. SER-muovien käytön jakautuminen erilaisissa laitteissa (SYH 2015).

Eniten SER-muoveja esiintyy yleisissä kodinkoneissa, kuten jääkaapit, imurit, pesukoneet, ilmastointilaitteet, sekä puhelimet. Toiseksi suurimpana SER-muoviluokkana voidaan pitää teollisuudessa käytettyjä elektroniikkalaitteita. Kolmannes SER-muoveista syntyy tietokoneista, fakseista, tulostimista, sekä kulutuselektronikkatuotteista. Loput SER-muoveista syntyy televisioista, näytöistä ja monitoreista (Kuva 4).

3.4 SER-muovien kierrätys

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun sisältämät muovit tuottavat haasteita kierrätyksessä. Erityisesti vanhoissa laitteissa käytetyt muoviyhdisteet ja niissä olevat haitalliset aineet aiheuttavat haasteita jatkojalostuksessa ja erottelussa. SER-muovien kierrätysmenetelmät kaipaavat kehitystä, koska onnistuneella lajittelulla ja kierrättämisellä muovit saataisiin uudelleen käyttöön sähkö- ja elektronisissa laitteissa. (SER-kierrätys 2012).

Taulukko 3. SER-muovin keräämis- ja kierrättämisprosentit (Buekens & Yang 2014).

LUOKKA	LAITTEET	KERÄÄMINEN (%)	UUELLEEN KÄYTTÖ- JA KIERRÄTYS (%)
1	Suuret kodinkoneet	33.2 %	20.3 %
2	Pienet kodinkoneet	24 %	15.8 %
3	Tieto- ja teletekniset laitteet	48 %	27.1 %
4	Kuluttajaelektronikka	65.7 %	45.8 %
5	Valaistuslaitteet	35.9 %	27.8 %
6	Sähkö- ja elektroniikkatyökalut	14.7 %	9.5 %
7	Lelut ja urheiluvälineet	5.7 %	3.8 %
8	Terveystieteiden laitteet ja tarvikkeet	10.2 %	6.7 %
9	Tarkkailu- ja valvontalaitteet	8.1 %	5.4 %
10	Automaatit	20.7 %	14.6 %

Kerätyn SER-muovin tavoiteprosentit kierrätyksen, uudelleenkäytön ja keräämisen suhteen luokittain on tällä hetkellä kasvussa ja sitä pyritään jatkuvasti kasvattamaan kierrätyksen- ja laitteiden valmistuksen kehittymisen avulla (Taulukko 3). Muovien kierrätyksessä käytetään lajittelutekniikoita, jotka jakautuvat manuaalisiin, sekä automatisoituihin lajittelutekniikoihin.

Muoviosien manuaalinen lajittelu perustuu koulutettujen henkilöiden käsin tekemään muoviosien lajitteluun. Muoviosat lajitellaan yleensä säiliöihin tai kuljetinhihnoille. Manuaalinen muoviosien lajittelu on hidasta ja suhteellisen kallista työvoimakustannuksista johtuen. (Maisel et al. 2020).

Muoviosien automaattinen lajittelu perustuu muovien polymeerien, lisäaineiden ja komponenttien erilaisien ominaisuuksien ja seoksien käyttäytymisen eroavaisuuksiin erilaisilla menetelmillä. Muovien automaattisia erottelu menetelmiä on useita ja yleensä niissä hyödynnetään optiikkaa, kuten esimerkiksi plasm-spektroskopiassa (LIPS, laser induced plasma spectroscopy). (Grigorescu et al. 2019). LIPS perustuu atomiemissiospektroskopiaan. LIPS-menetelmässä höyrystetään kappaleen, tässä tapauksessa muoviosan pintaa laserpulssin energiaa hyödyntäen, jolloin siitä taltioituu pieni määrä ainetta, joka muuttuu plasmaksi. Plasmasta voidaan tunnistaa taltioidun aineen sisältämät polymeerimateriaalit. (Niilahti 2017).

4 HAITALLISET AINEET JA NIIDEN TUNNISTUSMENETELMÄT

4.1 SER-muovien haitalliset aineet

SER-muoveissa esiintyy erilaisia haitallisia aineita, jotka saattavat olla haitallisia ihmisen terveydelle, sekä ympäristölle. SE-laitteiden muoveissa käytetyt haitalliset aineet ovat välttämättömiä laitteilta vaadittavien ominaisuuksien vuoksi. Haitallisten aineiden käyttöä pyritään vähentämään jatkuvasti ja niistä on asetettu erilaisia säännöksiä ja määrärajoituksia. Haitalliset aineet SER-muoveissa muodostuvat pääosin niissä käytetyistä palonestoaineista, sekä joistakin pehmentimistä- ja lisäaineista. Muoveissa esiintyy usein haitallisia pysyviä orgaanisia yhdisteitä (POP). POP-yhdisteet ovat pysyviä, eliöihin kertyviä ja päästöjen mukana kauaksi kulkeutuvia yhdisteitä, jotka ovat haitallisia ihmisen terveydelle ja ympäristölle. POP-yhdisteiden tuotantoa, kauppaa, käyttöä ja päästöjä on rajattu EU:n toimesta Tukholman sopimuksessa POP-asetuksella (EY) 850/2004. Asetukselle on säädetty lisäasetus POP-yhdisteiden jäteraja-arvoista ja se on astunut voimaan 18.6.2015 alkaen. POP-yhdisteistä asetettu sopimus kattaa 23 erilaista haitallista ainetta. (Eskelinen et al. 2016).

4.1.1 RoHS

Sähkö- ja elektroniikkalaitteista on rajoitettu RoHS-direktiivillä (Restriction of Hazardous Substances) haitalliseksi todettujen metallien, muovien pehmentimien ja palonestoaineiden käyttöä. Tällä direktiivillä pyritään vähentämään ja kontrolloimaan haitallisten aineiden käyttöä, vähentämään jätteiden haitallisuutta ja suojelemaan ihmisen terveyttä, sekä ympäristöä. Erityisesti SER-muovien kierrätystä haittaavat raskasmetallit kadmium, lyijy ja elohopea. Raskasmetalleja voi tulla muoveihin aikeisemmasta muovin käsittelystä.

Taulukko 4. Haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet homogeenisessä materiaalissa. (Tukes 2019).

Aine	Lyhenne	Suurin sallittu pitoisuus (%)
Kadmium	Cd	0.01 %
Lyijy	Pb	0.1 %
Elohopea	Hg	0.1 %
Kromi (kuudenarvoinen)	Cr6+	0.1 %
Bifenyylit (polybromatut)	PBB	0.1 %
Difenyylieetterit (polybromatut)	PBDE	0.1 %
Butyylibentsyyliftalaatti	BBP	0.1 %
Bis ftalaatti (2-etyyliheksyyli)	DEHP	0.1 %
Dibutyyliftalaatti	DBP	0.1 %
Di-isobutyyliftalaatti	DIBP	0.1 %

RoHS:n soveltamisalueeseen kuuluvat kaikki sähkö- ja elektroniset laitteet 22.7.2019 alkaen. Rajaukset koskevat Taulukossa 4 esitettyjen aineiden käyttöä, sekä aineiden enimmäispitoisuuksia homogeenisessä eli kauttaaltaan tasakoosteisissa materiaalissa, esimerkiksi tietokoneen kuorissa. (Tukes 2019).

4.1.2 Palonestoaineet

SE-laitteissa käytetyissä muoveissa esiintyy paljon palonestoaineita. Palonestoaineita käytetään ehkäisemään syttymistä, sekä hidastamaan palamista. Palonestoaineet ovat pääosin bromia tai fosforia, mutta esimerkiksi PPO-muovissa esiintyvää polyfeniiliä käytetään palonestoaineena. SE-laitteista noin 30% sisältää palonestoaineita, joista 41% on halogenoituja palonestoaineita. Halogenoidut palonestoaineet ovat pääosin bromia ja klooria sisältäviä yhdisteitä (Retkin 2012).

Fosforia sisältävät palonestoaineet koostuvat kolmesta eri alkyyliryhmästä, jotka ovat liittyneet fosforihappoon. Nämä kolme alkyyliryhmää ovat aryylili, alkyylili ja halogenoitu fosforihappo. Fosforoiduista palonestoaineista terveydelle haitallisia ovat muun muassa fosfaatit TDCIPP (tris-1-klooripropaani-2-yl) ja TCEP (tris-2-kloorietyyli). Niiden todettiin eläinkokeissa aiheuttavan kasvaimia ainakin eläimille, mutta syöväntutkimuslaitos (IARC) on asettanut ne syöpävaarallisuus kategoriaan 3 (Syöpävaarallisuus ei luokiteltavissa). Fosforoidut palonestoaineet eivät ole ympäristössä yhtä haitallisia ja pysyviä kuin bromatut

palonestoaineet, mutta niiden pitoisuus huonepölyssä ja sisäilmassa on korkeampi. (Rantakokko et al. 2016).

Bromia sisältävät palonestoaineet ovat bromattuja difenyylieettereitä, joita kutsutaan pääosin PBDE-yhdisteiksi. Eniten bromattuja palonestoaineita esiintyy SE-laitteissa, joissa on käytetty ABS-, HIPS- ja PC-muoveja, kuten esimerkiksi tietokoneet ja televisiot. PBDE-yhdisteet ovat haitallisia, sillä ne voivat varastoitua elimistön rasvakudokseen ja ne hajoavat ympäristössä hitaasti. Ympäristöön joutuessaan ne imeytyvät maaperän kautta vesistöön, jossa sitoutuvat eliöihin esimerkiksi kaloihin ja näin päätyvät ihmisen elimistöön ravinnon kautta. PBDE-yhdisteitä on yhteensä 209 ja ne sisältävät vaihtelevan määrän bromia. PBDE-yhdisteiden terveysvaikutukset ovat vielä karkeita arvioita, koska niiden haitoista on olemassa vähän näyttöä. Niiden silti epäillään nostavan riskiä erilaisiin sairauksiin, kuten imusolmukesyöpään. (THL 2019a).

Nykyään PBDE-yhdisteet ovat kiellettyjä ja niiden tilalla käytetään muita bromattuja palonestoaineita, kuten tetrabromibisfenoli-A (TBBPA) ja heksabromisykloodekaani (HBCB). (THL 2019a). PBDE-yhdisteiden käyttö lopetettiin ennen 2000-luvun taitetta, mutta ne ovat edelleen iso ongelma, koska niin monet vanhat sähkö- ja elektronisetlaiteromut niitä sisältävät. PBDE-yhdisteiden sisältämien muovien erottelu muista muoveista on säädetty EU:ssa lailla, mutta todellisuudessa vain murto-osa täysimittaisista SER-romun kierrätyslaitoksista tätä asetusta noudattaa. (Euroopan komissio 2019).

4.1.3 Muoveissa esiintyvät liuottimet

SER-muoveissa esiintyy myös erilaisia haitallisia liuottimia. SER-muovien liuottimena käytetään esimerkiksi kloroformia, jota esiintyy ABS-, PS- ja PC-muoveissa. Toinen yleinen SER-muoveissa käytetty liuotin on erilaiset bentseenit. Triklooribentseeniä käytetään PP-, HDPE- ja LDPE-muovien liuottimena. Myös muita liuottimia esiintyy pieninä määrinä SER-muoveissa, kuten erilaisia happoja. (Zhou & Breyen 2013).

Kloroformi luetaan trihalometaaniksi ja se luetaan terveydelle haitalliseksi aineeksi. Kloroformi voi päästä ihmisen elimistöön hengitysteitse tai ihon läpi. Pitkäaikainen altistuminen kloroformille voi aiheuttaa maksa- ja munuaiskasvaimia sekä lisätä syöpäriskiä.

Kloroformi on asetettu syöpäluokkaan 2B eli se on mahdollisesti syöpää aiheuttava aine. (THL 2019c).

Bentseeni on ihmisen terveydelle haitallinen aine. Se luetaan syöpäsairauksia aiheuttavaksi aineeksi. Bentseeni voi olla tappava joutuessaan hengitysteihin sekä nieltynä. Bentseenille altistuminen voi joissain tapauksissa myös aiheuttaa leukemiaa. Bentseeniä ei enää nykyisin saa käyttää liuottimena. (Liukkonen & Veijalainen 2018).

4.1.4 Muovien pehmentimet

SER-muoveissa käytetään paljon erilaisia pehmentimiä muokkaamaan muoville haluttuja ominaisuuksia. Pehmentimet sisältävät paljon erilaisia lisäaineita. Pehmentimet lisätään muoveihin nesteinä ja se liukenee polymeeriin ja alentaa sen lasittumislämpötilaa. Pehmentimiä voidaan vertailla ja arvioida vääntöpunosanalyysillä (TBA, torsion braid analysis), jossa esitetään kuvaajan avulla arvioitavan pehmentimen suhteellista jäykkyyttä ja lämpötilan funktion logaritmista pienenemistä. Haitallisina pehmentiminä pidetään esimerkiksi organofosfaatteja (OPE, organophosphates) ja erilaisia ftalaatteja. (Wilkinson et al. 2017).

Organofosfaatteja pidetään myrkyllisinä ja niitä käytetään asetyylikoliiniesteraasin sideaineena. Ne sisältävät yhdisteitä kuten malationi, etyyliparationi ja diatsinoni. Malationi voi aiheuttaa ihottumaa, etyyliparationi lamauttaa hermostoa ja diatsoni aiheuttaa hengitysvaikeuksia. (Greer & Donofrio 2009).

Polyvinyylidikloridi-muovien (PVC) pehmentiminä käytetään ftalaatteja, jotka ovat ftaalihapon estereitä. Ftalaatteja käytetään muovin lisäaineena, kun sille halutaan tietynlaisia ominaisuuksia esimerkiksi taipuisuutta, läpinäkyvyyttä ja kestävyyttä. PVC-muovista syntyy usein haitallisia palamisyhdisteitä. Ftalaattien liiallisella altistumisella uskotaan olevan yhteys hormonitoiminnan häiriintymiseen ja muun muassa syöpä riskiin. Varsinaista yhteyttä altistumisen ja haittavaikutuksien välille ei ole vielä onnistuttu tutkimuksissa varmentamaan. Ftalaatit eivät sitoudu muoveihin kemiallisesti, joten ne voivat vapautua ympäristöön. Ympäristöön vapautuessaan ne eivät kerry eliöihin tai maaperään ja ne hajoavat nopeasti. (THL 2019b).

4.1.5 Muovien muut lisäaineet

Ennen SER-muovien prosessointia niihin sekoitetaan erilaisia lisäaineita pehmentimien, raskasmetallien ja palonestoaineiden lisäksi. Lisäaineet voidaan jakaa apu- ja täyteaineiseen, joista apuaineilla parannetaan polymeerien ominaisuuksia, sekä edesautetaan niiden prosessointia. Yleisinä apuaineina pehmentimien lisäksi voidaan pitää stabilointiaineita ja väriaineita. Stabilointiaineet voidaan jakaa antioksidantteihin ja valostabilointiaineisiin. Apuaineita korvaavat hyvin pienen osan polymeerien materiaalista. Polymeerin täyteaineina käytetään lujuutta parantavia aineita, jolla pyritään korvaamaan osa polymeerin materiaaliasta. Täyteaineet voivat sisältää jopa 60% polymeerimateriaalista. (Buekens & Yang 2014).

Polystyreeni-muovien (PS) valmistukseen käytetään styreeniä eli vinyylibentseeniä. Styreeni polymerisoi ja hapettuu helposti ja sitä käytetään PS-muovin valmistuksessa monomeerina. Polystyreeniin lisätessä lisäaineina butadieenikopolymeeriä tai kumia saadaan iskunkestävää polystyreeniä (HIPS). Butadieeniä pidetään syöpävaarallisena aineena. Styreeni on aromaattinen hiilivety. Styreenin liialliselle altistumiselle on todettu useita terveyshaittoja. Se aiheuttaa muun muassa ärsytystä silmille ja iholle, kuulon heikkenemistä, sikiön vaurioitumista, päänsärkyä, huimausta ja aivosairaustapauksia. Lisäksi styreeni on asetettu vuonna 2018 kansainvälisen syöväntutkimuslaitoksen (IARC) toimesta syöpäluokitus 2A-ryhmään. Se on siis todennäköisesti karsinogeeninen ihmiselle. (Säämänen & Veijalainen 2018).

Akrylibutadieenistyreeni (ABS) valmistetaan butadieenin, styreenin ja akrylinitriilin polymeroinnilla. Butadieeni tuo muoville iskunkestävyyttä ja samalla se on merkittävän syöpävaarallinen aine. Akrylinitriili on syöpävaarallinen aine ja se on luokiteltu EU:ssa syöpävaarallisuusluokkaan 2. (TTL 2005). Styreenin haitallisuudesta on kerrottu edellisessä kappaleessa polystyreeni-muovin yhteydessä.

Polypropeeni (PP) ja polyuretaani (PUR) ovat kovettuneina varsin harmittomia ja helposti kierrätettäviä muoveja, mutta niitäkin muokataan todella paljon erilaisilla lisäaineilla. Polypropeenia muokataan usein polypropeeniadipaattilla, joka luetaan pehmittimeksi. Polyuretaaniin lisätään isosyanaatteja, jotka voivat aiheuttaa erilaisia allergioita, ihoärsytystä ja astmaa. Lisäksi polyuretaanin lämpöhajoaminen synnyttää häkääsuja sen

hiilipitoisuudesta johtuen. Häkäkaasut voivat aiheuttaa monia terveyshaittoja hengitysteihin ja pahimmillaan häkämyrkytyksen, joka usein johtaa kuolemaan. (TTL 2016).

4.2 Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät

SER-muoveista pyritään tunnistamaan ja erottelemaan yhä enemmän haitallisia, sekä vaarallisia aineita. Tunnistusmenetelmillä pyritään sujuvaan, sekä ympäristöystävälliseen muovien uudelleenprosessointiin. Lisäksi haitallisten aineiden tunnistusmenetelmillä pyritään tunnistamaan uusia haitallisia aineita, tarvittaessa rajoittamaan niiden käyttöä lakiasetuksilla ja ehkäisemään ihmisten liiallista altistumista haitallisille aineille. Esimerkiksi tunnistusmenetelmillä pystytään poistamaan haitallisia pysyviä orgaanisia yhdisteitä (POP-yhdisteet) tunnistettavasta materiaalista (Kauppi 2017). Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät kehittyvät jatkuvasti ja niitä on jo nyt olemassa huomattava määrä.

4.2.1 Liukeneminen

Liukenemista käytetään SER-muovien haitallisten aineiden, kuten bentseenin tunnistamiseen ja erottelemiseen. Liukenemismenetelmä perustuu materiaalin kemiallisen rakenteen eroihin, sekä moolimassaan. Sitä käytetään muovimateriaalin liukenemattomien ja liukenevien polymeerien välisen eron tunnistamiseen hyödyntämällä tunnistettavan materiaalin liukenevuutta. Liukenemismenetelmässä hyödynnetään kemiallisia menetelmiä pääosin näiden kahden edellä mainitun ryhmän tutkimiseen. Menetelmällä pystyy tunnistamaan muoveista lisäaineita kuten pehmentimiä. Liukenemismenetelmällä pystytään tunnistamaan SER-muoveista haitallisia liuottimia, kuten tolueeni, aseton, muurahais happo, tetrahydrofuraani, etanoli ja kloorietyleeni. Liukenemismenetelmää pystytään käyttämään ainakin muutamille SER-muoveille. (Grigorescu et al. 2019).

Taulukko 5. Liukenemismenetelmällä SER-muoveista tunnistettavia liuottimia. (Grigorescu et al. 2019).

POLYMEERI	LIUOTIN
ABS	Kloroformi, muurahaishappo
PS	Kloroformi, tolueeni, hiilidisulfidi
PC	Kloroformi, Dimetyyliformamidi, 1,4-dioksaani
PVC	Dimetyyliformamidi, tetrahydrofuraani, sykloheksanoni
PP	Dekaliini, ksyleeni, triklooribentseeni, dekaani
PET	Trikloorietikkahappo, nitrobentseeni, m-kresoli
HDPE, LDPE	Dekaliini, ksyleeni, triklooribentseeni, dekaani

SE- laitteista pystytään tunnistamaan liukenemismenetelmällä edellisessä taulukossa (Taulukko 5) ilmenevistä polymeereistä erilaisia liuottimia.

4.2.2 Palaminen

SER-muovien tunnistamismenetelmänä voidaan käyttää palamismenetelmää. Muovia siis poltetaan ja sitä pyritään tunnistamaan liekin värin ja voimakkuuden, sekä savun värin ja voimakkuuden avulla. Menetelmä on lähtökohtaisesti huono etenkin haitallisten aineiden tunnistamiseen, koska se ei ole kovinkaan tarkka. Lisäksi palamisessa syntyy tahattomasti epäpuhtauksia muoveissa käytetyistä palonestoaineista ja POP-yhdisteistä. Esimerkiksi polyoksimeteeni (POM) palaa lähes näkymättömällä liekillä. (Grigorescu et al. 2019).

Taulukko 6. Palamismenetelmällä tunnistettavien polymeerien palamiskäyttäytyminen. (Grigorescu et al. 2019).

LIEKIN VÄRI	SAVUN HAJU	POLYMEERI
Keltainen-oranssi	Makea/aromaattinen	PET
Keltainen-oranssi	Palanut kumi	HDPE
Keltainen-oranssi	Palanut kumi	LDPE
Keltainen-oranssi	Palanut kumi	ABS
Keltainen-oranssi	Fenoli	PC
Keltainen	Makea	PP
Kellertävän sininen	Palanut kumi (miesto)	PE/PP
Vihreä reunainen	Suolahappo	PVC
Kimmeltävä, nokinen	Makeahko, maakaasu	PS
Kirkas liekki	Miedosti styreeni ja palanut kumi	ABS/PC
Kirkas liekki	Makea, pistävä	PBT/PET
Kirkas liekki	Makea, kirvelevä/pistävä	PBT/PC

SE-laitteista pystytään tunnistamaan palamismenetelmällä pääpiirteisesti edellisessä taulukossa (Taulukko 6) esiintyvät muovityypit.

4.2.3 Lämpöanalyysitekniikka

SER-muovien tunnistusmenetelmänä käytetään myös lämpöanalyysitekniikkaa. Tekniikalla pystyy tunnistamaan erilaisia aineita SE-laitteissa käytetyistä muoveista. Lämpöanalyysitekniikka perustuu muovin lämpötilan muutoksen analysointiin, perustuen kemiallisiin reaktioihin. Lämpötilan muutosta muoveista mitataan ajanfunktiona. SER-muovien tunnistamisessa käytettäviä lämpöanalyysitekniikoita ovat lämpögravimetrinen analyysi (TGA), differentiaalinen lämpöanalyysi (DTA) ja differentiaalinen skannauskalorimetria (DSC). (Schindler et al. 2017).

1 TGA

Lämpögravimetrinen analyysi (TGA) on analyttinen tekniikka, joka perustuu massan ja lämpötilan muutokseen. SER-muoveille tehdyssä TGA analyysissä tutkitaan materiaalin lämpöstabiiliuden ja haihtuvien komponenttien osuutta seuraamalla massassa tapahtuvia

muutoksia suhteessa lämpötilaan ja aikaan. Analyysissä syntyneet tulokset esitetään lämpöanalyysikäyränä, jossa näytteen massan prosenttiosuus esitetään lämpötilan ja ajan suhteen.

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromussa eri polymeerien ja niiden haitallisten aineiden tunnistamiseen lämpögravimetrisellä analyysillä tutkitaan esimerkiksi puhelinten, näppäimistöjen, piirilevyjen ja näyttönohjaamien massahäviöitä tietyissä lämpötiloissa. SER-muoveissa esiintyvillä muoveilla on erilaiset hajoamiskäyrät, kuten ABS-muovilla on lähes kolme hajoamisvaihetta 182 °C, 377 °C ja 540 °C kun taas HIPS ja PC muoveilla on vain yksi hajoamisvaihe. HIPS-muovin hajoamisvaihe on 378 °C ja PC-muovin 438 °C. Kyseisellä menetelmällä pystytään tunnistamaan SER-laitteiden erilaiset muovit toisistaan, mutta suoranaisesti sillä ei pysty tunnistamaan tietyn muovin erilaisia haitallisia aineita. (Grigorescu et al. 2019).

2 DTA

Lämpöanalyysitekniikkana SER-muovien tunnistamisessa käytetään differentiaalista lämpöanalyysia (DTA). Differentiaalinen lämpöanalyysi perustuu näytteen vertailuyhdisteen ja näytteen välisen lämpötilaeron mittaamisen samanlaisella lämpökäsittelyllä. Näyte ja vertailu materiaalilla tulee olla samanlaisen lämpökäsittelyn lisäksi samanlaiset olosuhteet analyysin onnistumisen vuoksi. DTA-tekniikkaa käytetään erittäin korkeissa lämpötiloissa ja se on myös erittäin herkkä. Menetelmällä pystytään tutkimaan polymeerien sisältämiä epäorgaanisia aineita. DTA-tekniikkaa käytetään myös SER-muovien polymeerien karakterisoimiseksi, joten menetelmällä pystytään tunnistamaan polymeerissä olevia haitallisia aineita. (Schindler et al. 2017).

3 DSC

Differentiaalinen skannauskalorimetrialla (DSC) tunnistetaan SER-muoveista erilaisia polymeerejä ja niiden yhdisteitä. DSC perustuu materiaalin rakenteellisten muutoksien tunnistamiseen jäähtymisen tai lämmityksen aikana lineaarisella lämpögradientilla. Eli myös tämä menetelmä perustuu lämpötilan muutokseen tietyn ajan funktiona. Menetelmässä käytetään kalorimetriä mittauslaitteena. Mittauslaitteessa on vertailukammio ja näytekammio. Vertailukammio täytetään liuottimella ja näytekammio täytetään

näyteaineella, joka on myös liuotettu samaan liuottimeen kuin vertailuaine. Menetelmästä saadaan lämpögrammi, josta nähdään näytteen lämpöenergian poikkeama referenssiin nähden. Tällä menetelmällä voidaan määrittää materiaalien lasittumislämpötila (T_g), sulamislämpötila (T_m), kiteytymislämpötila (T_c) sekä sulamisentalpia (ΔH_m). DSC-menetelmällä voidaan tutkia myös polymeerien puhtausastetta tunnistamalla polymeerien apumateriaalit. Menetelmällä pystytään siis tunnistamaan polymeerien haitallisia aineita, kuten erilaisia pehmittimiä, palonestoaineita ja stabilisaattoreita. (Grigorescu et al. 2019).

4.2.4 Spektrometrinen lajittelu

Spektrometrinen lajittelu perustuu spektroskopiaan sekä spektroskooppien hyödyntämiseen. Spektrometrisessä lajittelussa SER-muoveissa hyödynnetään muoveihin heijastettua infrapunavaloa, säteilyä ja muodostuvia spektrejä. Spektrometrinen lajittelu painottuu muoveilla infrapuna-menetelmiin (IR). IR-spektroskopia toimii käytännössä niin, että se mittaa muoviin absorboituneen säteilyn määrää aallonpituuden funktiona. (Söderholm 2014).

4 FTIR-kartoitus

Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia (FTIR) on mikroskopinen metodi, jota käytetään erityisesti todella pienien SER-muovikomponenttien ja mikromuovien tunnistamiseen. Menetelmässä selvitetään partikkeleiden kemiallista koostumusta. Jokaisella polymeerillä on omanlainen infrapunaspektri. (Grigorescu et al. 2019). Menetelmässä näytteeseen kohdistetaan infrapunavaloa, joka absorboituu säteilyn vaikutuksesta erilaisilla aallonpituuksilla. FTIR mittauksien tekemiseen on kaksi erilaista tapaa. Transmissio, jossa infrapunavaloo läpäisee näyttemateriaalin ja tutkitaan erityisesti mikromuovien spektrejä. Toinen tapa on heijastusmoodi, jossa käytetään peiliheijastusta ja vaimennettua kokonaisheijastusta (ATR). Heijastusmoodia käytetään epätasaisille ja suurille partikkeleille ja siinä hyödynnetään partikkelin pintaan vietyä infrapunasäteen heijastumisen kidettä.

Kyseinen menetelmä on hyvä SER-muovien kemiallisen koostumuksen tutkimiseen, sillä pystyy siis tunnistamaan haitallisia aineita tarkasti. Menetelmä on tarkka ja nopea, mutta se on kallis ja sillä ei pystytä kerralla tutkimaan isoja määriä SER-muoveja. Lisäksi menetelmä vaatii SER:n esieroittelua menetelmän toimimiseksi. Lisäksi menetelmä ei anna oikeita

tuloksia, jos tutkitut muovit ovat liian isoja tai pinnaltaan liian epätasaisia sekä huonosti heijastavia. (Kolari 2019).

5 NIR-erottelu

SER-muovien tunnistusmenetelmänä käytetään Infrapunaspektroskopiaa NIR (*Near Infrared Spectroscopy*). Menetelmässä määritetään polymeerien spektrejä, jotka ovat jokaisella polymeerillä omanlaisensa. NIR-menetelmän huonot puolet ovat sen toimimattomuus, jos SER-muoveihin on kertynyt likaa sekä niissä on mahdollisesti etikettejä tai tarroja. Lisäksi menetelmällä ei pysty tunnistamaan tummia muoveja. Tummia muoveja pystytään tunnistamaan MIR:lla (*Mid Infrared Spectroscopy*). Edellä mainituille menetelmille on ympäristöolosuhteet todella tärkeässä roolissa menetelmien toimivuuden kannalta, sillä ne ovat hyvin kosteusherkkiä. NIR-menetelmän lisäksi käytetään myös RAMAN spektroskopiaa, joka myös perustuu polymeerien molekyyliarakenteiden tunnistamiseen. RAMAN menetelmä ei ole yhtä tarkka näytteen ominaisuuksien muutoksista. NIR- ja RAMAN-menetelmät ovat tarkkoja tunnistamaan SER-muoveista molekyyliä ja molemmilla pystytään saavuttamaan n. 90% erottelutarkkuus. (Eskelinen et al. 2016).

6 Röntgen

Röntgenin käyttäminen SER-muovien tunnistusmenetelmänä perustuu muovin kemiallisen koostumuksen tutkimiseen. Röntgenillä saadaan tarkka tunnistusjälki, mutta laitteisto on kallis. Puhuessa muovien tunnistamisesta röntgenillä, tarkoitetaan yleensä röntgenfluoresenssispektroskopiaa (XRF). XRF-menetelmällä määritellään alkuainekoostumusta. Muovien tunnistusmenetelmänä käytetään myös röntgendiffraktiota (XRD). Näillä molemmilla menetelmillä pystytään tunnistamaan muoveista haitallisia täyte- ja apuaineita. XRF-menetelmiä hyödynnetään esimerkiksi palonestoaineiden tunnistamisessa muoveista, sekä vaarallisten aineiden tunnistamisessa (RoHS). XRF-menetelmä on tehokas etenkin bromin tunnistamiseen. (Retkin 2012). XRF-menetelmiä voidaan automatisoida muovien tunnistamisessa. Ennen röntgenlaitetta muovit voidaan murskata esimerkiksi hydraulikkapressillä ja kuljettaa Röntgenvalaisulaitteen lävitse. Röntgenmenetelmä on hyvä SER-muovien haitallisten aineiden tunnistamisessa, vaikka laitteisto onkin kallis.

7 UV-fluoresenssi

SER-muovien tunnistusmenetelmänä käytetään ultravioletti-fluoresenssia (*UV fluorescence*). Fluoresenssi perustuu reaktioon, jossa fotonit absorboituu ja samanaikaisesti syntyy emissio. UV-fluorisenssia käytetään infrapunaspektroskopian apuna muovien tunnistamisessa. Muovien kierrätyksen jauhamisvaiheessa muodostuu hankalia yhdisteitä, joiden tunnistamiseen hyödynnetään infrapunaspektroskopiaan perustuvia automatisoituja linjastoja. Näiden linjastojen ongelmana on muovin lajitteluprosessin rajoittuminen väriltään tummiin partikkeleihin. Tällöin hyödynnetään UV-fluorisenssispektroskopiaa lisäämällä jäljittäjäaineita neitsytmateriaaleihin, jotka pystytään kyseisellä spektroskopiamenetelmällä tunnistamaan. (Maris et al. 2012).

4.2.5 Tiheyteen perustuvat menetelmät

SER-muoveja pystytään tunnistamaan ja erottelamaan tiheyteen perustuvilla menetelmillä. Pääsääntöisesti muovien tiheyserottelu jaetaan märkiin ja kuiviin käsittelymenetelmiin. Kuivamenetelmiä pidetään halvempina sekä ympäristöystävällisempinä (Eskelinen et al. 2016). Jokainen SE-laitteissa käytetty muovi omaa tietyn tiheyden, jota pystytään hyödyntämään muovien tunnistamisessa esimerkiksi kelluvuuskokeilla. (Taulukko 7). Muovien tiheyteen vaikuttaa lisäaineiden, kuten palonestoaineiden käyttö sekä muovin puhtaus. Tiheyteen perustuvia erottelumenetelmiä ovat esimerkiksi kelluvuuskokeet ja magneettitiheyserottelu, sekä muovien pesemismenetelmien yhteydessä (4.2.7) esiteltävät ilmavirtaerottelu ja hydrosyklonointi.

Taulukko 7. SE-laitteissa esiintyvien muovien ominaisia tiheyksiä (Järvinen 2002).

MUOVITYYPPI	TIHEYS g/cm ³
PP	0,91
LDPE	0,92
PE	0,94
HDPE	0,96
PS	1,05
ABS	1,06
SAN	1,08
PA	1,14
PMMA	1,19
PC	1,2
PUR	1,22
PBT	1,33
PET	1,35
POM	1,41
PVC	1,69

Yleisesti muovien tiheydet vaihtelevat 0,9 - 1,7 g/cm³ (Taulukko 7). Tiheyteen perustavassa erottelussa pystytään tunnistamaan tiheydeltään perusmateriaalista poikkeavat materiaalit ja täten haitalliset aineet (Poropudas 2011). Toisaalta tiheyteen perustava erottelu ei ole täysin toimivaa, koska joidenkin muovien tiheys on hyvin lähellä veden tiheyttä (1 g/cm³) (Järvelä & Järvelä 2015). Lisäksi käyttäen märkäkäsittelyä syntyy haitallista jätevettä, joka tarvitsee vielä erikseen jälkikäsittellä. Märkäkäsittelyn yhteydessä joudutaan käyttämään reagensseja ja kuivattamaan muovi, mistä johtuen menetelmästä tulee kallis. (Eskelinen et al. 2016).

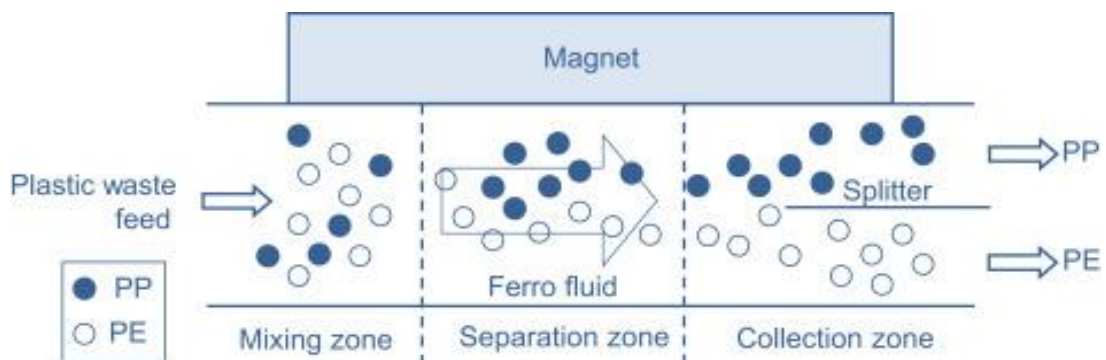
8 Kelluvuuskokeet

SER-muovien tunnistusmenetelmänä voidaan käyttää kellumis-uppoamis-erottelua (*float-sink-separation*). Kyseinen menetelmä luetaan tiheyteen perustuvaksi märkäerottelumenetelmäksi. Kyseisessä menetelmässä muovit upotetaan väliaineeseen. Väliaineina käytetään esimerkiksi vettä tai veden ja etanolin sekoitusta. Menetelmässä

muovit upotetaan väliaineeseen ja jos se on tiheydeltään raskaampaa kuin käytetty väliaine niin se uppoaa. Upotettu muovi jää kellumaan ollessaan tiheydeltään kevyempää kuin käytetty väliaine. (Eskelinen et al. 2016). Kyseisestä menetelmästä ei ole erityisesti hyötyä sekoitetuille ja rakeistetuille muoveille. Kyseinen tekniikka on havaittu hyväksi esimerkiksi polyolefiinien tunnistamisessa. Toisaalta kellumis-uppoamis-erottelu on hidas menetelmä ja siitä syntyy haitallista jätevettä, joka pitäisi jälkikäsitellä. Lisäksi menetelmällä ei suoranaisesti pysty tunnistamaan muoviseokseen lisättyjä haitallisia aineita. (Niaounakis 2015).

9 MDS

Magneettitiheuserottelu (*MDS, Magnetic density separation*) on lajittelu prosessi, joka perustuu tiheyteen. Menetelmässä käytetään magnetisoitua nestettä. Neste on usein vettä, johon on lisätty rautaoksidipartikkeleja. Nesteeseen muodostetaan magneettikenttä, jossa hyödynnetään painovoimaa magneettisena voimana. Magneettikentän ansiosta voima sekä nesteen tiheys vaihtelevat eksponentiaalisesti. Menetelmän tunnistaminen perustuu siihen, että lopulta muovin palaset asettuvat kellumaan eri tasoille nestettä, riippuen muovien ominaisesta tiheydestä. Neste toimii ikään kuin tiheyden mittarina. Menetelmä on havainnollistettu Kuvassa 5, jossa tunnistetaan PP- ja PE-muovi.



Kuva 5. MDS menetelmän toimintaperiaate havainnollistettuna (Serranti & Bonifazi 2019).

Menetelmä on hyvä muovien tunnistamiseksi ja menetelmä toimii myös epäpuhtailla muoveilla. Menetelmä ei ole kovin yksinkertainen ja sillä yleensä pystytään tunnistamaan vain pieniä paloja muovia. (Serranti & Bonifazi 2019).

4.2.6 Mekaaninen analyysi

SER-muovien tunnistusmenetelmänä voidaan käyttää mekaanista analyysia. Mekaaninen analysointi perustuu muovien mekaanisten ominaisuuksien vertailemiseen ja niiden käyttäytymiseen tietyissä olosuhteissa. Mekaanisessa analyysissa vertaillaan muovien ominaisuuksia erilaisilla kokeilla, kuten vetokokeella, iskukokeella, tiheyden mittaamisella ja kovuuskokeella. (Gricorescu et al. 2019).

Vetokokeessa koekappaletta venytetään vakionopeudella ja siitä saadaan mitattua tapahtuva venymä ja siihen tarvittava voima, josta saadaan tulokseksi jännitysvenymäkäyrä. Jännitysvenymäkäyrästä pystytään tunnistamaan muoveja mekaanisia ominaisuuksia vertaillen, kuten myötölujuutta (σ_m), myötövenymää (ϵ_m), murtolujuutta (σ_b), murtovenymää (ϵ_b) ja vetokimmomoduulia (E). Iskukokeessa kappale isketään keskeltä poikki ja tarkastellaan sen murtumiseen tarvittua voimaa. Iskulujuudessa suhteutetaan tarvittua energiaa ja materiaalin poikkipinta-alaa, sen yksikkö on (J/m^2). Kovuutta mitatessa materiaalin pintaan painetaan D-kärjelle tai A-kärjellä tietyllä voimalla tietyn ajan. Tätä menetelmää kutsutaan nimellä Shore D-kovuus. Siitä selviää muovin ominaisuus vastustaa sen pinnan muodonmuutosta. (Söderholm 2014). Tiheyden mittausta suoritetaan aiemmin luvussa 4.2.5 esitetyillä menetelmällä, käyttäen yleensä vertailuliuosta.

Muovien mekaaniset ominaisuudet ovat muovien tunnistamisessa olennaisessa asemassa kierrättämisen kannalta. Esimerkiksi mitä suurempi muovin sitkeys on, sitä huonommin muovin pystyy tunnistamaan UV-menetelmillä. (Gricorescu et al. 2019). Mekaaniset ominaisuudet luokittelevat polymeerit erilaisiin luokkiin muun muassa jäykkyyden, haurauden ja taipuisuuden perusteella. Mekaanisella analysoinnilla ei voi suoranaisesti tunnistaa haitallisia aineita muoveista ja muovien tunnistettavuus on hieman haastavaa, koska ne menettävät käytön aikana paljon ominaisuuksistaan. Jätteistä lajiteltujen eri polymeerien fysikaalimekaaniset ominaisuudet ovat kokeiden mukaan pudonneet radikaalisti. Esimerkiksi lajiteltujen polymeerien iskulujuuden alentuma vaihteli erilaisilla polymeereillä aina 6% - 50% asti. Lisäksi materiaalin tiheys voi muuttua käytön tai ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta siihen syntyneen lian johdosta. (Florea et al. 2011).

4.2.7 Pesemismenetelmät

Pesemismenetelmiä käytetään SER-muovien tunnistamiseen ja haitallisten aineiden poistamiseen. SER-muoveihin syntyy käytöstä sekä käyttöympäristöstä johtuen erilaisia haitallisia epäpuhtauksia, jotka vaikuttavat sen kierrättämiseen sekä fyysisiin- ja kemiallisiin ominaisuuksiin. SER-muovit pestään esikäsittelyn jälkeen haitallisten aineiden ja muiden ylimääräisten aineiden, kuten tarrojen poistamiseksi. Muovien pesemisessä käytetään yleensä vettä tai erilaisia pesunesteitä. Muovi yleensä pienennetään esikäsittelyssä ennen pesemistä. Peseminen tapahtuu yleensä kuumalla vedellä (n. 90 °C) ja pesu kestää 5-20 minuuttia, riippuen muovin likaisuudesta sekä tarroista aiheutuvan liiman määrästä. Pesemisellä ei pysty suoraan tunnistamaan haitallisia aineita, mutta niitä pystyy sillä poistamaan. Toisaalta peseminen kuluttaa paljon vettä ja lisäkustannuksia syntyy jäteveden seurauksena. Muovien pesemiseen käytetään myös kuivapesumenetelmiä, jossa vettä ei käytetä. Normaalin pesemisen jälkeen voidaan toimenpidettä tehostaa pesemällä muovit uudestaan esimerkiksi natriumhydroksidi-liuoksella (NaOH). Tällaista toimenpidettä kutsutaan kemialliseksi pesuksi, joka tuo hieman lisäkustannuksia ja hidastaa prosessia, mutta muovin puhtaustaso paranee huomattavasti. (Eskelinen et al. 2016).

10 Ilmavirtaerottelu

SER-muovien tunnistusmenetelmänä käytetty ilmavirtaerottelu luetaan kuivaerottelumenetelmiin. Ilmavirtaerottelulla pyritään erottamaan eri painoisia muovilaatuja toisistaan hyödyntämällä ilmavirtaa. (Eskelinen et al. 2016). Ilmavirtaerottelua kutsutaan usein ilmaseulonnaksi. Menetelmässä käytetään ilmavirtana imu- ja puhallusilmaa. Menetelmä vaatii toimiakseen selvän ominaispainoeron muoveissa. Muovien ominaispaino saattaa vaihdella lisäaineistuksen ansiosta, joten tämä seulontamenetelmä on virhealtis. Ilmavirtaerottelu on muovien tunnistusmenetelmänä yksinkertainen ja halpa, mutta sillä ei pysty suoraan tunnistamaan esimerkiksi muovissa käytettyjä haitallisia lisäaineita, mutta menetelmä halpa ja ympäristöystävällinen. (Poropudas 2011).

11 Hydrosyklonointi

Hydrosyklonointi on märkäerottelumenetelmä, jota voidaan käyttää myös SER-muovien tunnistamiseen. Menetelmässä muovipartikkeli ohjataan pyörivään liikkeeseen paineistettuun nesteeseen. Keskipakovoiman sekä painovoiman ansiosta erotusnestettä suuremman tiheyden omaavat partikkelit ohjautuvat pyörteen ulkoreunoille. Nestettä kevyemmät partikkelit liikkuvat syklonin keskellä olevaan ilmatilaan. Menetelmä on hyvin tarkka muovien tunnistamiseen. Menetelmällä pystytään tunnistamaan muoveja, joiden tiheysero poikkeaa ainoastaan $0,01 \text{ g/cm}^3$. (Eskelinen et al. 2016). Hydrosyklonoinnissa on saavutettu PS/PVC-muovin tunnistamisprosentiksi jopa 99,5% käyttäessä erotusnesteenä vettä. Hydrosyklonointi on monipuolista, suhteellisen edullista ja se omaa kohtalaisen suuren käsittelykapasiteetin. (Poropudas 2011). Hydrosyklonoinnilla ei suoranaisesti pysty tunnistamaan SER-muoveista esimerkiksi niihin lisättyjä palonestoaineta, mutta se on hyvä tunnistusmenetelmä muoveille ja niiden ominaisille haitallisille aineille. (Niaounakis 2015).

5 TEHOKKUUS

5.1 SER keräys

SER-muovien keräys on tehokasta etenkin Suomessa ja sitä pyritään kehittämään jatkuvasti. Suomessa kuluttaja saa palauttaa alle 25cm kokoiset SE-laitteet veloituksetta SE-laitteita myyviin tavarataloihin, ilman uuden laitteen ostopakkoa (yli 1000 m² päivittäistavarakaupat ja yli 200m² erikoiskaupat). Isommat SE-laitteet kuluttaja saa palauttaa veloituksetta ostaessaan uuden vastaavan tuotteen. Lisäksi SER:a voi palauttaa ilmaiseksi palautuspisteisiin, josta valmistajien ja maahantuojien toimesta perustetut tuottajayhteisöt noutavat ne. Tuottajayhteisöt vievät SER:n uusiokäyttöön, energian hyödyntämiseen, materiaalinhyödyntämiseen tai jatkolajitteluun. Jatkolajittelussa SE-laite puretaan ja siitä erotellaan vaaralliset aineet, jotka toimitetaan jatkokäsittelyyn. Myös erilaiset materiaalit erotellaan toisistaan, kuten muovit ja metallit. Metallit toimitetaan yleensä metalliteollisuuden raaka-aineiksi ja muovit toimitetaan energiahyötykäyttöön tunnistamisen jälkeen. (Kiertokapula 2020).

SER-keräys Suomessa edesauttaa paljon SER-muovien haitallisten aineiden tunnistamisen tehokkuutta, hyvällä järjestelmällisyydellä ja pienellä kierrättämisen kynnyksellä. Kuluttajan on helppo viedä SE-laite kierrätykseen, koska paikkoja on monia ja se ei maksa mitään. SER-muovien jatkokäsittely ja tunnistaminen helpottuu ja nopeutuu alkulajittelun ansiosta. SER-keräys siis helpottaa SER-muovien jatkokäsittelyä ja sen myötä haitallisten aineiden tunnistamista.








5.2 SER-muovien yhdisteet

SER-muoveissa käytetään todella paljon erilaisia aineita ja yhdisteitä, jotka vaikeuttavat muovien tunnistamista ja jatkokäsittelyä. SER-muovin yhdisteistä ja haitallisista aineista kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Haitallisten aineiden tunnistamisen tehokkuus riippuu todella paljon käytettävästä muovista ja siinä esiintyvistä lisäaineista, kuten palonestoaineet. Monet muovit sisältävät niille tyypillisiä haitallisia aineita ja taas moniin muoveihin lisätään erilaisia yhdisteitä tavoitellessa haluttuja ominaisuuksia sekä tiettyjen ympäristöolosuhteiden kestävyyttä. Suurin osa tunnistamismenetelmistä pystyy tunnistamaan vain eri muovityypit ja näin ollen muoville tyypilliset haitalliset aineet. Muovien tyypillisinä haitallisina aineina voidaan pitää niissä todella usein esiintyviä aineita,

kuten PVC-muovin ftalaatit. Ongelmana on myös muoveihin käytön yhteydessä syntyneet haitalliset aineet, kuten lika, rasvat, maalit ja tarrat. SER-muoveissa käytettyjä yhdisteitä ja lisäaineita voidaan pitää tunnistusmenetelmien tehokkuuden heikentäjinä. Lisäksi muovin mekaanisessa kierrättämisessä lisäaineiden erottaminen muovista ei ole teknisesti mahdollista sekä taloudellisesti kannattavaa. Toisaalta ekstruusion aikana mahdollisesti syntyneet epäpuhtaudet ja lisäaineiden jäännökset pyritään poistamaan kierrätyksen puhdistusvaiheessa esimerkiksi pesumenetelmällä. (Eskelinen et al. 2016).

5.3 Symbolikoodit

SER-muoveissa saattaa esiintyä myös symbolikoodeja. Symbolikoodit ovat tarkoitettu erilaisiin muovipakkauksiin kertomaan mistä materiaalista muovi on valmistettu. Symbolikoodit tunnetaan myös nimellä materiaalimerkit. Kyseiset merkit ohjaavat kuluttajaa laittamaan muovipakkaukset muovikeräykseen pois lukien PVC-muovin. Materiaalimerkkejä on seitsemän. (Suomen Uusiomuovi 2019).

MATERIAALI-MERKINTÄ	NIMI	YLEISET OMINAISUUDET	ESIMERKKEJÄ KÄYTTÖKOhteista JA LAJITTELUSTA
	Polyeteeni-tereftalaatti	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä	Virvoitusjuoma- ym. pullot. Pantilliset pullot kauppojen automaatteihin. Muut muovipakkauskeräykseen.
	Polyeteeni high-density	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta	Mehupullot, virvoitusjuomakorit. Muovipakkauskeräykseen.
	Polyvinyyli-kloridi	Erittäin monimuotoinen ja -piirteinen	Harvoin pakkausmateriaalia. Ei muovipakkauskeräykseen
	Polyeteeni low-density	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta	Muovikassit, pussit, kalvot. Muovipakkauskeräykseen
	Poly-propeeni	Jäykkä, sitkeä, hyvin monikäyttöinen	Narut, rasiat, kalvot, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen
	Poly-styreeni	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)	Rasiat, purkit, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen
	Muut	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät	Rasiat, kannet, pussit. Muovipakkauskeräykseen

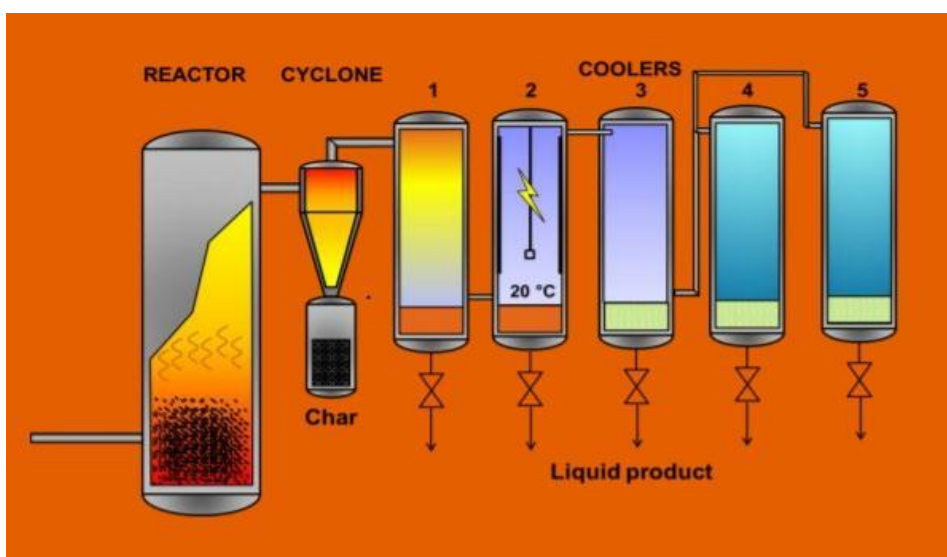
Kuva 6. Muovien materiaalimerkinnät (Suomen Uusiomuovi 2019).

Kuvassa 6 esitelty muovien materiaalimerkinnot, yleiset ominaisuudet kyseiselle muoville sekä käyttökohde ja lajittelu esimerkkejä. Materiaalimerkintä 07 kuuluu muille yleisille muoveille tai muovin yhdistelmämuoveille, kuten PC-, PE/PP-muoveille. Materiaalimerkinnot edistävät muovien jatkokäsittelyä. Muovien tunnistamisen tehokkuus paranee materiaalimerkintöjen ansiosta. Muovien jatkokäsittely nopeutuu ja muovi saadaan nopeammin esimerkiksi tarkempaan jatkokäsittelyyn haitallisten aineiden tunnistamiseksi kuten FTIR-kartoitukseen (Grigorescu et al. 2019).

5.4 Kemiallinen lajittelu

SER-muoveja pystytään kierrättämään myös kemiallisin menetelmin. Kemiallisen kierrättämisen menetelmistä tunnetuimpia ovat pyrolyysi ja kaasutus. Näitä edellä mainittuja termokemiallisia menetelmiä voidaan käyttää kaikille muoveille. Kemiallisen kierrättämisen ideana on muuttaa muovit takaisin peruskemikaaleiksi. Muoveista synnytetään termokemian avulla öljyä tai kaasua, jota voidaan käyttää kemikaalien tuotantoon ja saavuttaa jopa täysin samantyyppisiä tuotteita kuin neitseellisestä raaka-aineesta. (Mikkola et al. 2019).

Pyrolyysi perustuu muovien nesteytykseen. Pyrolyysissä muovista tehdään polttoainetta tai kemikaaleja, hajottamalla muovi hapettomassa ympäristössä. Muovi voidaan myös höyrystää nestemäiseksi aineeksi. Prosessista saadaan yleensä lopputuotteeksi 70-80% pyrolyysiöljyä, 10-15% hiiltä ja 10-15% kaasua. (Mikkola et al. 2019).



Kuva 7. Pyrolyysi-menetelmä. (Mikkola et al. 2019).

Kuvassa 7 havainnollistettua pyrolyysi-menetelmää voidaan pitää tehokkaana muovien kierrättämismenetelmänä. Toisaalta pyrolyysi tarvitsee muovin esilajittelun sekä puhdistamisen, jos tavoitellaan erinomaisia laatustandardeja lopulliselle tuotteelle. (Mikkola et al. 2019).

Kaasutuksessa muovi muutetaan synteesikaasuksi, josta pystytään rakentamaan uusia polymeereja. Prosessista saadaan myös muiden kemikaalien rakennusosia, joista voidaan tehdä monia erilaisia tuotteita. Prosessista voidaan saada n-butanolia, metanolia, n-propanolia ja akryylihappoa. Kaasutus on tehokas muovin kierrätys- ja jatkojalostus menetelmä. Kaasutuksen etuna voidaan pitää muovijätteen esikäsittelyn ja puhdistamisen tarpeettomuutta. Muovijäte pystytään siis käsittelemään likaisena ja lajittelemattomana. (Mikkola et al. 2019).

Tulevaisuutta ajatellen SER-muovien kemiallisesti lajittelumenetelmäksi saattaa saapua markkinoille menetelmä, jota kutsutaan depolymerisoinniksi. Depolymerisointi on kehitteillä parhaillaan ja se perustuu muovien hajottamiseen mikrobeilla sekä entsyymeillä. Tällä hetkellä menetelmän ongelmana on muovilaatujen sekä niissä käytettyjen lisä- ja täyteaineiden eroavaisuudet. Depolymerointiin ei ole olemassa yksittäistä entsyymiä tai mikrobia, joka kävisi kaikkien muovilaatujen hajottamiseen. (Mikkola et al. 2019).

5.5 Haastattelu SER-muovien käsittelystä Suomessa

Tässä kappaleessa käydään läpi SER-muovien tilannetta Suomessa. Kappale on kirjoitettu asiantuntijahaastattelun pohjalta. Haastateltavina olivat Kuusakoski Oy:n Tutkimus- ja kehitysosaston päällikkö Tiina Malin ja Liiketoiminnan kehitysjohtaja Tapio Kuusakoski. Kuusakoski Group Oy on suomalainen kansainvälisesti toimiva yritys konserni, joka tarjoaa kierrätyspalveluita sekä ympäristöteknologian ratkaisuja. Seuraaviin kysymyksiin ovat asiantuntijat vastanneet Kuusakoski Oy:n näkökulmasta, perustuen käytännön kokemuksiin sekä yritystoimintaan.

5.5.1 SER:n- ja SER-muovin kierrättäminen Suomessa yleisesti

Haastateltavat kertoivat, että SER-muovia ei oikeastaan kierrätetä Suomessa, vaan siitä tunnustetaan tietyt muovilaadut ja ne myydään eteenpäin. Kuusakoski Oy:ssa prosessi kulkee seuraavasti: Kunnat keräävät SER:n ja toimittavat yleensä sen eteenpäin tuottajayhteisöjen kautta, Kuusakoski Oy toimii SER:n vastaanottajana. Lisäksi Kuusakoski Oy ostaa valmiiksi lajitellun materiaalin niin sanotuilta spot-markkinoilta. Kuusakoski Oy:lle päätynyt SER lajitellaan manuaalisesti sekä esikäsitellään linjastolla. SER:n laadusta riippuen se puretaan manuaalisesti tai erotellaan mekaanisesti. Yleensä SER rikotaan ja magneettinen materiaali poistetaan. Esimerkiksi vanhoista telkkareista tarkistetaan sisältääkö se alkuaine bromia, joka yleensä esiintyy haitallisena palonestoaineena. Lopulta puhdas muovijae on seulottu 10-60mm kokoisiksi kappaleiksi, joka on optimi erottelulaitteille. Murskauksen jälkeisen puhdistetun muovijakeen erottelussa linjastolla hyödynnetään röntgensäteilyyn perustuvaa käsittelyä (XRF). Seuraavaksi SER-muoville tehdään tiheyserottelu tai optinen erottelu mekaanisesti XRF-käsipistoolin avulla.

SER:sta tunnistetuista muoveista ABS on arvokkain, sitten PS ja PE. Lisäksi näytöissä käytettyä pleksiä (PMMA) pidetään myös arvokkaana. Loput tunnistetut muovilaadut ovat niin sanottuja non-target muoveja epäpuhtauksien tai muovilaadun vuoksi. Puhtaat muovit myydään ulkomaille, mutta markkinat ovat haastavat. Tunnistetut non-target muovit jatkokäsitellään POP-asetusten mukaisesti ja yleensä poltetaan. Polttolaitosten kapasiteetit ovat tällä hetkellä kortilla varsinkin EU:n alueella.

5.5.2 Toimintatapoja SER-muovin sisältämille haitallisille aineille

Haastateltavien mukaan haitallisten aineiden kanssa toimiminen lähtee SER-asetuksen toimintaohjeista. Haitalliset aineet tulee poistaa tietyssä vaiheessa prosessia ja tämä tapahtuu yleensä manuaalisesti. Sekalaisesta SER:sta voidaan erotella Kuusakoski Oy:lla 42 erilaista jaetta, johon he pyrkivät esikäsitelyssä aina kun puitteet sen mahdollistavat. Lisäksi haitallisten aineiden kanssa toimimista ohjaa POP-asetus sekä ympäristöministeriön asettama ohjeistus. Ison ongelman SER-muovien haitallisissa aineissa muodostavat vanhat ja nykyään jo kielletyt PBDE-yhdisteet sekä markkinoilla koko ajan uudelleen kehittyvät bromatut palonestoaineet. Kuusakoski Oy pyrkii tutkimaan POP-yhdisteitä yhteistyökumppaneiden kanssa laboratoriossa. Tämän hetkinen tilanne on se, ettei Suomessa

ole riittävän hyvää analytiikkaa ja mahdollisten tuloksien saamisessa kestää yleensä todella kauan. Lisäksi tällä hetkellä ei ole olemassa laitetta, joka pystyisi erottelemaan POP-yhdisteet sekä haitallisten aineiden suuren kirjon.

5.5.3 SER-muovien haitallisten aineiden tunnistamisen tehostaminen

Haastateltavien mukaan optista erottelua voisi vielä kehittää eteenpäin. Optisen erottelun ongelma on tällä hetkellä erilaisille aineille tietty parhaiten sopiva metodi. Laitteeseen on toki vaikea ottaa kantaa, koska tunnistaminen on aina resursseista riippuvaa. Heidän mukaansa maailmalla on osattu jopa kierrättää sekä jatkojalostaa uudelleen palonestoaineita. SER-muovien markkinoita voisi helpottaa esimerkiksi asettamalla kierrätysraaka-aineen käyttövelvollisuuksia valmistajille. Lisäksi fysikaalis-kemiallista käsittelyä voisi kehittää tehokkaammaksi.

6 POHDINTA

SER on tällä hetkellä voimakkaasti kasvava ja ongelmallinen jätevirta globaalilla tasolla. SE-laitteissa käytetään yhä enemmän muovia sen ominaisuuksien ja valmistuskustannusten johdosta. SE-laitteista syntyy koko ajan enemmän jätettä kasvavan kysynnän vuoksi. SE-laitteiden kasvava kysynnän syynä on teknologia kehittyminen sekä uusien valmistajien ilmaantuminen markkinoille. Lisäksi ihmiset ovat mukavuudenhaluisempia. Nykyään elektroniikkalaitteista ei tehdä kovinkaan pitkäikäisiä, jotta saataisiin myytyä enemmän laitteita ja etenkin uusia malleja. Sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta syntyvää jätettä pyritään kontrolloimaan lainsäädännön avulla, erilaisilla asetuksilla ja direktiiveillä. Tulevaisuudessa tulisi kehittää uusia säädöksiä SER:n kierrättämisestä ja valmistamisesta sekä tiedottaa enemmän kuluttajaa SER-lajittelun tärkeydestä.

SER-muovien kierrättämisen- ja tunnistamisen suurimmat haasteet muodostavat muoveissa esiintyvät haitalliset aineet. Muoveissa käytetään haitallisia aineita, jotta muoveihin saadaan haluttuja ominaisuuksia. Haitallisia aineita joudutaan käyttämään esimerkiksi, kun muovin pitää kestää tiettyjä olosuhteita ja lämpötilan muutoksia. Haitalliset aineet voivat olla esimerkiksi muoveissa käytettyjä pehmentimiä tai palonestoaineita.

Tällä hetkellä markkinoilla ei ole olemassa muovien tunnistusmenetelmää, jolla pystyisi tunnistamaan POP-yhdisteet, palonestoaineet, pehmentimet sekä kaikki muut muoveissa esiintyvät haitalliset aineet. Kaikkien haitallisten aineiden tunnistamiseen, joudutaan tällä hetkellä käyttämään useita menetelmiä yhdessä. Haitallisten aineiden käyttöä muoveissa on pyritty rajoittamaan esimerkiksi RoHS-direktiivillä. Lisäksi bromatuista palonestoaineista on kielletty PBDE-yhdisteet, mutta SE-laitteita, jossa sitä esiintyy käytetään edelleen. SER-muovien haitallisten aineiden käyttöä pitäisi tiukentaa entisestään, esimerkiksi asettamalla valmistajille lisää vastuuta muovien kierrättämisestä, tunnistamisesta ja ympäristöystävällisempien raaka-aineiden käyttämisestä. SER-muovien kierrättämisen helpottamista voitaisiin edistää esimerkiksi PVC-muovin korvaamisella, sekä kieltämällä isosyanaattien lisääminen PUR-muoveihin.

Tällä hetkellä käytössä olevat muovien tunnistusmenetelmät voidaan karkeasti jakaa liukeneviin, spektroskopisiin, lämpöanalysointiin, mekaanisiin, tiheyteen ja palamiseen perustuviin menetelmiin. Liukenemismenetelmällä pystytään tunnistamaan muoveissa käytettyjä liuottimia, joista osaa voidaan pitää haitallisina. Optisia menetelmiä käytetään tällä hetkellä paljon SER-muovien tunnistamisessa. Lämpöanalyysiin perustuvia menetelmiä on useita ja esimerkiksi DSC menetelmällä pystytään tunnistamaan muoveista palonestoaineita ja pehmittimiä. Optiset laitteet, joita lämpöanalysoinnissa tarvitaan ovat hankintahinnaltaan kalliita ja niillä tunnistaminen on hieman hidasta. Lisäksi muovin tarvitsee olla pienessä koossa ja yleensä esikäsitelty menetelmän toimivuuden varmistamiseksi. Spektrometrisiä menetelmiä käytetään myös usein SER-muovien tunnistamisessa ja esimerkiksi Suomessa käytetään paljon röntgenfluoresenssispektroskopiaa (XRF). Röntgen menetelmää pidetään tehokkaana menetelmänä esimerkiksi bromin tunnistamiseen SER-muoveista. Toisaalta röntgenmenetelmää käyttäessä syntyy yleensä työntekijäkustannuksia, koska menetelmää on vaikea automatisoida ja laitteisto on hankintahinnaltaan kallis. Muovin tiheyteen perustuvissa menetelmissä märkäerottelumenetelmät ovat hieman epätarkkoja johtuen erilaisien muovien pienistä tiheyseroista sekä lisäaineiden ja lian tuomista tiheyden muutoksista. Lisäksi märkäerottelussa syntyy haitallista jätevettä ja muovit joudutaan kuivaamaan prosessin jälkeen. Kuivaerottelumenetelmät ovat puolestaan halpoja sekä ympäristöystävällisiä, mutta niillä ei suoranaisesti pysty tunnistamaan muoveissa käytettyjä haitallisia lisäaineita.

Tunnistusmenetelmien kehittämisessä tulisi keskittyä nimenomaan optisiin menetelmiin, muovien tarpeellisen esikäsittelyn jälkeen voitaisiin rakentaa automatisoitu linjasto muovien erilaisten haitallisten aineiden tunnistamiseen, jossa olisi esimerkiksi röntgen menetelmä ja lämpöanalyysimenetelmä yhdistettynä. Linjastolla voitaisiin hyödyntää esimerkiksi pneumaatiikkaa muovien lajitteluun erilaisen tunnistusmenetelmän jälkeen.

SER-muovien tunnistusmenetelmien tehokkuuden edistäjänä voidaan pitää muovien esikäsittelyä. SER-muovit pystytään lajittelemaan esimerkiksi mekaanisesti symbolikoodeja hyödyntäen. SER-muovin tunnistamisprosessia tehostaa varsinkin Suomessa hyvin toimiva SER-keräys. SER-keräystä voisi silti mainostaa enemmän kuluttajille. Tulevaisuutta silmällä muovi kierrättämisessä tullaan varmasti hyödyntämään fysikaalis-kemiallista lajittelua sekä kemiallista kierrättämistä. Muoveja yritetään nykyisin hajottaa entsyymeillä ja mikrobeilla. Myös muovien kemiallisessa hajottamisessa haitalliset lisäaineet muodostavat suuria ongelmia yhden ja kaikille muovilaaduille toimivan menetelmän löytämiseksi.

LÄHTEET

Buekens, A. & Yang, J. 2014. Recycling of WEEE plastics: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 16, pp. 415–434. [Viitattu: 10.2.2020]. Saatavissa: [https://doi.org/ 10.1007/s10163-014-0241-2](https://doi.org/10.1007/s10163-014-0241-2)

Czajczynka, D., Anguilano., L., Ghazal, H., Krzyzyska, R. Reynolds, A., Spencer, N & Jouhara, H. 2017. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 3, pp 171-197 Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>

Dimitris, S., Achilias & Eleni V. Antonakou E. 2015. Chemical and thermochemical recycling of polymers from waste electrical and electronic equipment. [Raportti]. *Recycling materials based on environmentally friendly techniques*. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/books/recycling-materials-based-on-environmentally-friendly-techniques/chemical-and-thermochemical-recycling-of-polymers-from-waste-electrical-and-electronic-equipment>

Eskelinen, H., Haavisto, T., Salmenperä, H., Dahlbo, H. 2016. Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet. [Raportti]. *Arvi Material Value Chains*. [Viitattu 23.3.2020] Saatavilla: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B5903968F-2B4E-4BEA-BC45-099C7D210D36%7D/117935>

European Commission. 2016. Analysis of the WEEE value chain. [Verkkajulkaisu]. *RESEARCH & INNOVATION Participant Portal*. [Viitattu 9.3.2020]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ac195926&appId=PPGMS>

Euroopan komissio. 2019. Toisen Euroopan unionin täytäntöönpanosuunnitelman tarkistamisesta ja päivittämisestä pysyviä orgaanisia yhdisteitä koskevan asetuksen (EY) N:o 850/2004 8 artiklan 4 kohdan mukaisesti. [Verkkajulkaisu]. Komission kertomus Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden

komitealle. [Viitattu 30.3.2020]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2018:0848:FIN:FI:PDF>

Finlex. 2014. Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 9.2.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140519#Pidp448278816>

Florea, D., Paven, H., Vuluga, Z., Vuluga, D. 2011. Materiale plastice. Identification, Sorting and Characterization of Plastics from WEEE, Vol. 48, pp 176-182. [Viitattu 8.5.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/288371478_Identification_Sorting_and_Characterization_of_Plastics_from_WEEE

Greer, David G & Donofrio, Peter D. 2009. Clinical Neurotoxicology, In: Dobbs, Michael R. (ed.) Electrophysiological Evaluations. Elsevier Ltd., pp. 201-212. [Viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-032305260-3.50022-8>

Grigorescu, R.M., Grigore, M.E., Iancu, L., Ghioca, P., Ion, R.-M. 2019. Waste electrical and electronic equipment: A review on the identification methods for polymeric materials. [Artikkeli]. National institute for Research and Development in Chemistry and Petrochemistry-ICECHIM, Bucharest. [Viitattu 11.3.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/recycling4030032>

Järvinen, P. 2002. Muovifakta. [Verkojulkaisu]. Muovietopankki. [Viitattu 14.4.2020]. Saatavissa: http://muovifakta.fi/sites/default/files/Muovipankki_light.pdf

Järvelä, Pe & Järvelä, Pi. 2015. Teknisten muovien kierrätys ja uusiokäyttö. [Raportti]. [Viitattu 19.2.2020]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/25734661-Teknisten-muovien-kierratys-ja-uusiokaytto.html>

Kauppi, S. 2017. Kemikaalien hallinta kiertotaloudessa. [Raportti]. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 29/2017. [Viitattu 13.4.2020]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/225178>

Kiertokapula. 2020. [Verkkosivut]. SER, sähkö- ja elektroniikkaromu. [Viitattu 10.5.2020].
 Saatavissa: <https://www.kiertokapula.fi/kiertokapula/vuosikatsaus-2017/jatteiden-vastaanotto-ja-kasittely/vaaralliset-jatteet-seka-sahko-ja-elektroniikkalaiteromu-ser/>

Kolari, H. 2019. Menetelmän kehittäminen talousvesien mikromuovianalyysiin. [Tutkielma]. Itä-Suomen yliopisto, Ympäristö- ja biotieteiden laitos. [Viitattu 28.4.2020].
 Saatavissa: https://epublications.uef.fi/pub/urn_nbn_fi_uef-20190481/urn_nbn_fi_uef-20190481.pdf

Koppa. 2019. Kirjallisuuskatsaus [Verkkojulkaisu]. Jyväskylän yliopiston digipalvelut. [Viitattu 2.3.2020]. Saatavissa:
<https://koppa.jyu.fi/avoimet/kirjasto/kirjastotuutori/aihehaku-tutkimusprosessissa/aihe-avainkasitteiksi/kirjallisuuskatsaus>

Liukkonen, T & Veijalainen, H. 2018. Työterveyslaitos (TTL). [Verkkojulkaisu]. Organiset liuottimet. [Viitattu 21.4.2020]. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/kemikaalit-ja-tyo/orgaaniset-liuottimet/>

Luhtala, M. 2018. Mistä muovit valmistetaan ja miten biomuovit siihen liittyy. [Artikkeli]. Plasthouse developing the future plastics. [Viitattu 11.2.2020]. Saatavissa:
<https://plasthouse.fi/mista-muovit-valmistetaan-ja-miten-biomuovit-siihen-liittyy/>

Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N., Schneider-Ramelow, M. 2020. Preparing WEEE plastics for recycling – How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 154. [Viitattu 10.3.2020]. Saatavissa:
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104619>

Malin, T & Tuominen L. 2017. Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). [Artikkeli]. Arvi Material Value Chains. [Viitattu 2.2.2020]. Saatavissa:
[http://arvifinalreport.fi/files/Plastics_poster_Kuusakoski_Plastics%20from%20Waste%20Electrical%20and%20Electronic%20Equipment%20\(WEEE\).pdf](http://arvifinalreport.fi/files/Plastics_poster_Kuusakoski_Plastics%20from%20Waste%20Electrical%20and%20Electronic%20Equipment%20(WEEE).pdf)

Maris, E., Aoussat, A., Naffrechoux, E. & Froelich, D. 2012. Polymer tracer detection systems with UV fluorescence spectrometry to improve product recyclability. *Minerals Engineering*, Vol. 29, pp. 77-88. [Viitattu: 27.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.016>

Mikkola, J., Roschier, S., Saario, M., Värre, U. 2019. Muovijätteen kemialliset hyödyntämiskäytännöt ja -markkinat kiertotaloudessa. [Raportti]. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 19.5.2020]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161993/TEM_2019_64.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Niaounakis, M. 2015. *Biopolymers: Processing and Products. Recycling*. Elsevier Ltd., Vol. 16, pp. 481-530. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26698-7.00016-7>

Niilahti, T. 2017. Laser-indusoitu plasm-spektroskopia mineraalikoostumuksen määrittämisessä sulfidimineraalipitoisista kivistä. [Tutkielma]. Jyväskylän yliopisto julkaisuarkisto. [Viitattu 12.3.2020]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/53642>

Poropudas, M. 2011. Polyvinyylidikloridin (PVC) kierrätys ja uusiokäyttö. [Tutkielma]. Tampereen teknillinen yliopisto. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21281/Poropudas.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Rantakokko, R., Kumar, E., Kiviranta, H. 2016. Suomalaisen väestön altistuminen bromatuille ja fosforoiduille palonestoaineille. [Raportti]. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. [Viitattu 27.3.2020]. Saatavissa: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131629/Rantakokko_Kumar_Kiviranta_Suomalaisen%20altistuminen_et_Ymp%C3%A4rist%C3%B6%20ja%20terveys_lehti.pdf?sequence=1

Retkin, R. 2012. Bromattujen palonestoaineiden rajoitusten vaikutus jätteiden hyödyntämiseen ja käsittelyyn. [Raportti]. Suomen ympäristökeskus. [Viitattu: 1.4.2020]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38714/SY29_2012_Bromattujen_palonestoaineiden_rajoitusten_vaikutus__jatteiden_hyodyntamiseen_ja_kasittelyyn.pdf?sequence=1

Schindler, A., Doedt, M., Gezgin, S., Menzel, J., Schmölder, S. 2017. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Identification of polymers by means of DSC, TG, STA and computer assisted database search, Vol. 129, pp. 833-842 [Viitattu 26.4.2020]. Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/article/10.1007/s10973-017-6208-5>

Serranti, S. & Bonifazi, G. 2019. Techniques for separation of plastic wastes, In: Pacheco-Torgal et al. (ed.) Use of Recycled Plastics in Eco efficient Concrete. Elsevier Ltd., pp. 9-37. [Viitattu 30.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00002-5>

SER-kierrätys. 2012. Tietoa SE-laitteiden keräyksestä. [Verkkajulkaisu]. SER-kierrätys verkkosivut. [Viitattu 9.2.2020]. Saatavissa: <http://www.serkierratys.fi/fi/kuluttajille>

Suomen Uusiomuovi. 2019. Muovi on ympäristötehokas pakkausmateriaali. [Verkkosivut]. Muovin materiaalimerkit. [Viitattu 14.5.2020]. Saatavissa: http://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus_kierrtaa/muovien_kierratys/muovien_materiaalimerkit/

SYH TRADING PTE LTD. 2015. [Verkkosivut]. Secure data destruction electronic waste recycling. [Viitattu 22.2.2020]. Saatavissa: <https://seahyongheng.com.sg/electronics-waste-recycling/>

Säämänen, A & Veijalainen, H. 2018. Styreeni. [Artikkeli]. Työterveyslaitos. [Viitattu 4.4.2020]. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/kemikaalit-ja-tyo/styreeni/>

Söderholm, I. 2014. Teknisten muovien kierrätys. [Opinnäytetyö]. Lahden ammattikorkeakoulu, muovitekniikka. [Viitattu 28.4.2020]. Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76367/Soderholm_Iris.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). 2019a. [Verkkajulkaisu]. Palonestoaineet. [Viitattu 1.4.2020]. Saatavissa:

<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/palonestoaineet>

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). 2019b. [Verkkajulkaisu]. Ftalaatit. [Viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/ftalaatit>

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). 2019c. [Verkkajulkaisu]. Trihalometaanit. [Viitattu 21.4.2020]. Saatavissa:

<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/talousvesi/talousveden-desinfiointin-sivutuotteet/trihalometaanit>

Turvallisuus ja kemikaalivirasto (Tukes). 2019. [Verkkosivut]. Vaaralliset aineet sähkö- ja elektroniikkalaitteissa – RoHS. [Viitattu 29.3.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkolaitteiden-vaatimuksia/vaaralliset-aineet-sahko-ja-elektroniikkalaitteissa-rohs>

Työterveyslaitos (TTL). 2005. Kemikaalit ja työ. [E-kirja]. Selvitys työympäristön kemikaaliriskeistä. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa:

<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131976/kemikaalit-ja-tyo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Työterveyslaitos. 2016 (TTL). Ureetaani. [Verkkajulkaisu]. Ureetaanityö – vaatetus ja käsineet. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa:

https://www.ttl.fi/fi/tyoturvallisuus_ ja_riskien_hallinta/henkilonsuojaimet/suojainratkaisuj a/uretaani/sivut/default.aspx

Vegliò, F & Birloga, I. 2018. Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling, Current WEEE recycling solutions. Elsevier Ltd., Vol. 3, pp. 33-93. [Viitattu 28.2.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102057-9.00003-2>

Wilkinson, J., Hooda, P., Barker J., Barton, S., Swinden, J. 2017. Environmental Pollution. Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field, Vol. 231, pp. 954-970. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.032>

Zhou, Y & Breyen, Mark D. 2013. Joining and Assembly of Medical Materials and Devices. Overview of welding methods for medical plastics, Vol. 10, pp. 291-294. [Viitattu 19.4.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1533/9780857096425.3.261>