

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKALAITEROMUN SISÄLTÄ-
MÄN MUOVIN KIERRÄTYSMAHDOLLISUUDET**
**Recycling possibilities for plastics contained in waste electrical
and electronic equipment**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Mika Horttanainen
Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Miia Liikanen

Lappeenrannassa 29.5.2018

Lauri Leppäkoski

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Lauri Leppäkoski

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun sisältämän muovin kierrätysmahdollisuudet

Kandidaatintyö

2018

40 sivua, 5 taulukkoa ja 4 kuvaa

Työn tarkastaja: Professori, TkT Mika Horttanainen

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Miia Liikanen

Hakusanat: sähkö- ja elektroniikkalaiteromu, bromatut palonestoaineet, kierrätys
Keywords: waste electrical and electronic equipment, brominated flame retardants, recycling

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on löytää sähkö- ja elektroniikkalaiteromun (SER:n) sisältämälle muoville muita hyötykäyttötarkoituksia kuin energiahyödyntäminen. Aihetta lähestytään kirjallisuuskatsauksen avulla selvittämällä SER-muovien määrä, sen materiaalikoostumus, muovien ja niiden lisäaineiden ominaisuudet ja lopulta muovien kierrätysmahdollisuudet. Vuonna 2015 Suomessa kerättiin SER:a yhteensä 62 544 tonnia, jonka koostuksesta 22 % oli muoveja. Muovit koostuvat pääasiassa valtamuoveista ja teknisistä muoveista, ja niiden palonestoaineina käytetään useimmiten bromattuja palonestoaineita. Bromatut palonestoaineet on poistettava muoveista ennen muovien kierrätystä uusiksi tuotteiksi. Haasteita SER-muovien kierrättämiseen aiheuttavat myös muovilaatujen suuri määrä ja yhteensopimattomuus sekä muovien mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen. Muoveja voidaan erotella lähi-infrapuna-analyysillä (NIR) ja bromattuja palonestoaineita tunnistaa röntgenfluoresenssi (XRF)- tai sliding spark (SS)-menetelmillä. Muovien hyötykäyttämättömyyksiä ovat mekaaninen ja kemiallinen kierrätys sekä energiahyödyntäminen. SER-muovien kierrätyksen haastavuuden takia suositaan niiden energiahyödyntämistä, jolla saadaan tuhottua bromatut palonestoaineet oikeissa palamisolosuhteissa. Bromattujen palonestoaineiden jatkuva vähentäminen ja materiaalien ja erottelutekniikoiden kehittäminen tulee helpottamaan SER-muovien hyödyntämistä tulevaisuudessa.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO	6
2 SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKALAITEROMU	8
2.1 SER:n maailmanlaajuinen tilanne	8
2.2 SER:n tilanne Suomessa	11
2.3 Tuottajavastuu ja lainsäädäntö	11
2.4 SER:n materiaalikoostumus	13
2.4.1 Metallit	14
2.4.2 Piirilevyt	15
2.4.3 Muovit	15
3 SER:N SISÄLTÄMÄN MUOVIN OMINAISUUDET.....	17
3.1 Akryylinitriilibutadienistyreeni (ABS).....	17
3.2 Polystyreeni (PS).....	18
3.3 Polypropeeni (PP)	19
3.4 Polykarbonaatti (PC).....	19
3.5 Bromatut palonestoaineet (BFR).....	20
3.5.1 Polybromidifenyylieetterit (PBDE).....	21
3.5.2 Heksabromidisyklododekaani (HBCD).....	21
3.5.3 Tetrabromibisfenoli A (TBBPA).....	22
3.5.4 Bromattujen palonestoaineiden rajoitus	22
4 MUOVIEEN HYÖDYNTÄMINEN JA LOPPUKÄSITTELY	24
4.1 Esikäsittely	24
4.2 Muovien tunnistaminen.....	24
4.3 Bromattujen palonestoaineiden tunnistaminen	25
4.4 Mekaaninen kierrätys	27
4.5 Kemiallinen kierrätys	29
4.6 Energiahyödyntäminen	30
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	31
6 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

ABS	Akrylinitriilibutadieenistyreeni
BFR	Brominated flame retardant, Bromattu palonestoaine
DBDE	Dekabromidifenyylieetteri
EPS	Expanded polystyrene, Solupolystyreeni
EU	Euroopan unioni
FR	Flame retardant, Palonestoaine
HBCD	Heksabromidisykloheksaani
HIPS	High Impact Polystyrene, Iskunkestävä polystyreeni
JL	Jätelaki
LCD	Liquid Crystal Display, Nestekidenäyttö
NFR	Non-fire retardant, Palonestoaainetta sisältämätön
NIR	Near-infrared spectroscopy, Lähi-infrapuna-analyysi
OBDE	Oktabromidifenyylieetteri
PA	Polyamidi
PBB	Polybromibifenyyli
PBDD/F	Polybromattu dioksiini/furaani
PBDE	Polybromidifenyylieetteri
PBT	Polybutyleenitereftalaatti
PC	Polykarbonaatti
PE	Polyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PeBDE	Pentabromidifenyylieetteri
PFR	Phosphorus flame retardant, Fosforoitu palonestoaine
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
POM	Polyasettaali
POP	Persistent Organic Pollutant, Pysyvä orgaaninen yhdiste
PPE	Polyfenyylieetteri
PPO	Polyfenyleenioksidi

PU	Polyuretaani
PVC	Polyvinyylikloridi
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista
RoHS	Restriction of Hazardous Substances, Direktiivi vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa
SAN	Styreeni-akrylinitriili
SER	Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu
SS	Sliding Spark -menetelmä
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UP	Unsaturated polyester, Tyydyttymätön polyesteri
Valvira	Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto
WEEE	Waste electrical and electronic equipment, Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu
WRAP	Waste and Resources Action Programme
XRF	X-ray fluorescence, Röntgenfluoresenssi-menetelmä
XRT	X-ray transmission, Röntgentransmissio-menetelmä

1 JOHDANTO

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu eli SER on Euroopan unionin nopeimmin kasvava jätevirta, jonka kasvuvauhti on noin 3–5 % vuodessa. Vuonna 2012 EU:n alueella mukaan lukien Norja ja Sveitsi, SER:a muodostui yhteensä 9,45 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä 35 % (3,3 miljoonaa tonnia) päätyi viralliseen keräykseen ja kierrätykseen. Loput 65 % (6,15 miljoonaa tonnia) vietiin maasta, kierrätettiin vaatimusten vastaisesti, purettiin arvokkaiden osien saamiseksi tai vain heitettiin muun jätteen sekaan. (Spasojevic & Swalens 2016, 16.)

Tekniikan vanheneminen aiheuttaa nopeaa vaihduntaa SER:n materiaaleissa. Esimerkiksi vanhat putkinäytöt vaihtuivat nopeasti LCD-näyttöihin ja väritelevisiot korvasivat mustavalkotelevisiot. SER:n katsotaankin sisältävän vähintään tuhatta eri materiaalia. Materiaalien sekoittuminen ja niiden pienet määrät laitteessa tekevät niiden erottelusta ja lajittelusta hyvin epäkäytännöllistä. SER:n monimuotoisen koostumuksen takia se myös sisältää vaarallisia epäpuhtauksia mukaan lukien raskasmetalleja, kuten elohopeaa, lyijyä ja kadmiumia. Polykloorattuja bifenyylejä esiintyy kondensaattoreissa ja bromattuja palonestoaineita laitteiden koteloidissa ja piirilevyissä. (Buekens & Yang 2014, 415–416.)

SER:a kierrättämällä voidaan vähentää kaatopaikalle päätyvän jätteen määrää sekä saavuttaa muita etuja, kuten arvokkaiden materiaalien takaisinsaantia sekä ympäristölle vaarallisten aineiden eliminointia. SER-muovien vääränlainen kierrätys tai muu sopimaton käsittely voi lisätä myrkyllisiä päästöjä. Toisaalta muovien talteenotto ja uudelleenkäyttö on hyvin kallista, mikä osaltaan johtaa siihen, että SER:sta kerätään talteen vain arvokkaimmat materiaalit. Arvokkaiden metallien, kuten kullan, hopean ja platinaryhmän metallien talteenotto onkin ollut pääkannustimena piirilevyjen kierrättämiseen. (Buekens & Yang 2014, 416–417.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan SER:n sisältämän muovin eri loppukäsittelyvaihtoehtoja. Työn tavoitteena on löytää SER:n muoveille muita hyötykäyttömahdollisuuksia kuin energiahyödyntäminen. Kirjallisuuskatsauksella tunnistetaan mahdolliset hyötykäyttökohdet ja tarkastellaan niiden käyttökelpoisuutta. Teoriaosassa selvitetään SER:n lähteet ja

koostumus sekä tunnistetaan romun sisältämät muovilaadut sekä niiden ominaisuudet. Tämän jälkeen tutkitaan muovien eri hyödyntämistapoja. Lopuksi vertaillaan saatuja tuloksia.

2 SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKALAITEROMU

Euroopan Unionin SER-direktiivissä (2012/19/EU) SER:lla tarkoitetaan laitteita, jotka toimiakseen tarvitsevat sähkövirtaa tai sähkömagneettisia kenttiä. Mukaan luetaan myös laitteet, joilla tuotetaan, siirretään ja mitataan kyseisiä kenttiä ja virtoja ja jotka on suunniteltu siten, että ne käyttävät korkeintaan 1 000 voltin vaihtojännitettä tai enintään 1 500 voltin tasajännitettä. Jätteen eli SER:ksi ne luokitellaan jätedirektiivin 2008/98/EY mukaan, kun sen haltija poistaa tai aikoo poistaa laitteen käytöstä tai on velvollinen poistamaan sen käytöstä. SER-direktiivin mukaan romuun lasketaan kuuluvaksi kaikki komponentit, kulutusosat ja osakokoonpanot, jotka ovat osa tuotetta käytöstä poistettaessa. 15. elokuuta 2018 lähtien direktiiviin kuuluvat SE-laitteet jaetaan kuuteen luokkaan:

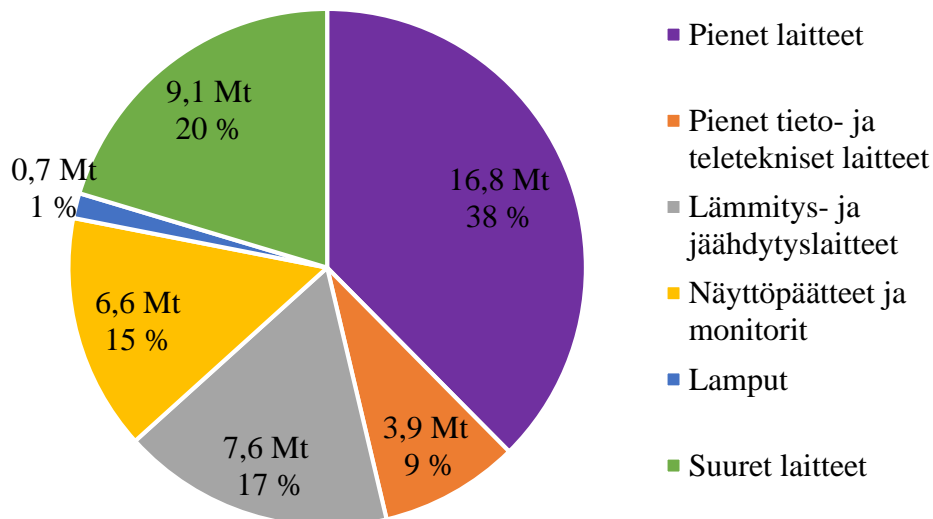
1. Lämmitys- ja jäähdytyslaitteet
Tyypillisiä laitteita: jääkaapit, pakastimet, ilmastointilaitteet, lämpöpumput
2. Näyttöpäätteet ja monitorit
Tyypillisiä laitteita: televisiot, monitorit, kannettavat tietokoneet, tabletit
3. Lamput
Tyypillisiä laitteita: loisteputkivalaisimet, pienloistelamput, korkeatehoiset purkauslamput
4. Suuret laitteet
Tyypillisiä laitteita: pesu- ja tiskikoneet, sähköliedet, musiikkilaitteet
5. Pienet laitteet
Tyypillisiä laitteita: pölynimurit, mikroaaltouunit, leivänpaahtimet, radiot
6. Pienet tieto- ja teletekniset laitteet
Tyypillisiä laitteita: puhelimet, GPS-laitteet, taskulaskimet, reitittimet

2.1 SER:n maailmanlaajuinen tilanne

SER:a muodostui maailmanlaajuisesti vuonna 2016 44,7 miljoonaa tonnia, joka asukasta kohden on 6,1 kg/as. Määrän odotetaan kasvavan vuoteen 2021 mennessä 52,2 miljoonaan tonniin eli 6,8 kg:aan asukasta kohden. Vuonna 2014 maapallon ihmisistä vain 44 % oli kansallisen elektroniikkaromulainsäädännön alaisuudessa. Vuoteen 2017 osuus on kuitenkin

kasvanut 66 %:iin, johtuen Intian siirtymisestä näiden lakien piiriin vuonna 2016. Maailmanlaajuisesti lainsäädännön valvomana 8,9 miljoonaa tonnia SER:a on kerätty, raportoitu ja käsitelty virallisesti, joka on noin 20 % kaikesta muodostuneesta SER:sta. Euroopan alueella SER:n keräysaste on 35 %, mikä on huomattavasti keskiarvoa suurempi ja suurin verrattuna muihin maanosiin. (Baldé et al. 2017, 5–6, 41.)

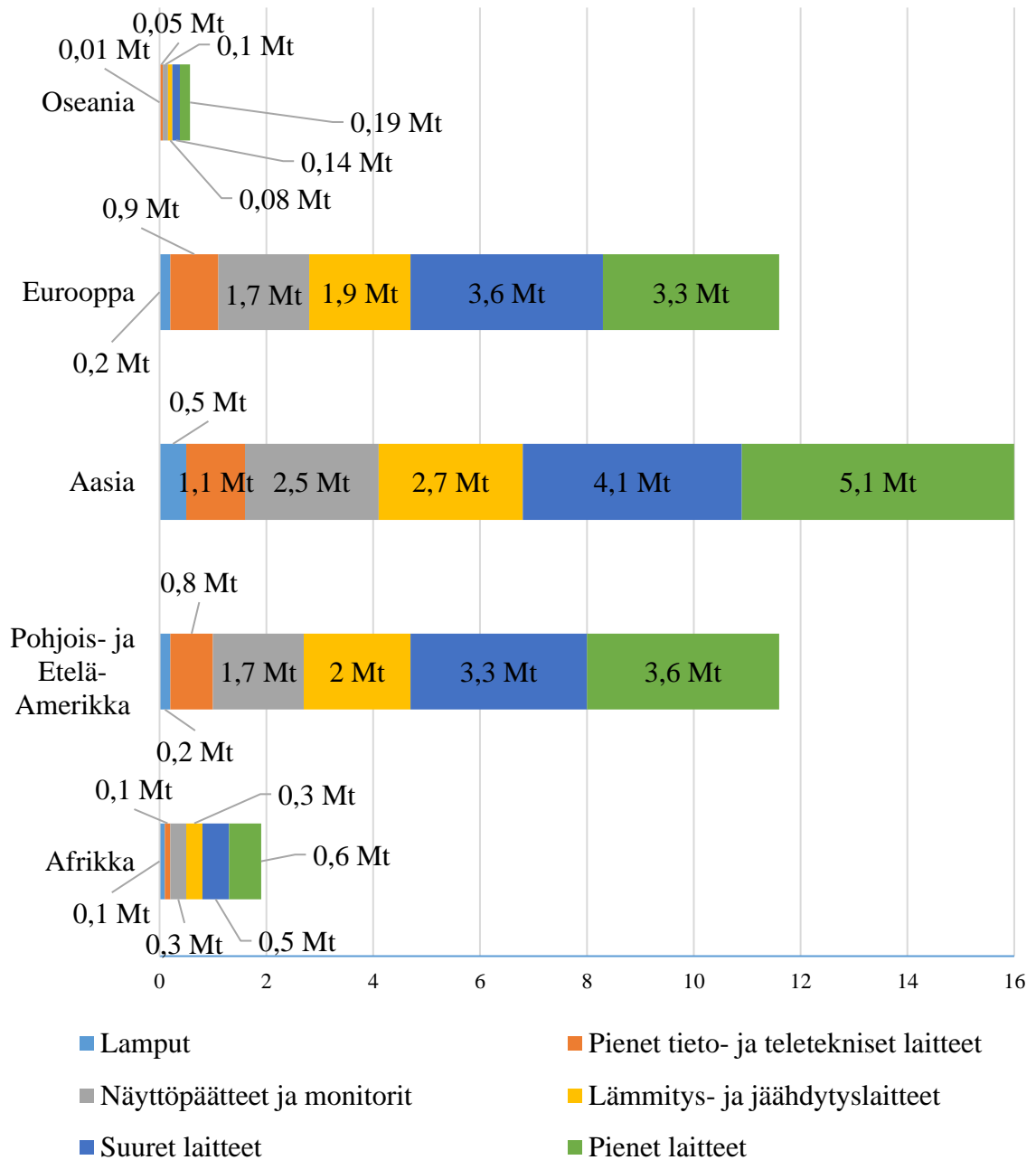
Edellä mainituista SER:n kuudesta kategoriasta eniten vuonna 2014 muodostui pieniä laitteita yhteensä 16,8 Mt, jotka muodostivat 38 % kerätystä SER:sta. Suuria laitteita muodostui 9,1 Mt eli 20 % kaikesta SER:sta. Huomattavia määriä muodostui myös lämmitys- ja jäähdytyslaitteista (17 %) ja näyttöpäätteistä ja monitoreista (15 %). Loput 10 % SER:sta muodostui pienistä tieto- ja teleteknisistä laitteista (9%) ja lamput (1 %). (Baldé et al. 2017, 40.) Muodostuneet SER-jakeet ja niiden osuudet esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. SER:n maailmanlaajuinen muodostuminen kategorioittain (Baldé et al. 2017, 40)

Maailmanlaajuisesti eniten SER:a vuonna 2014 muodostui Aasiassa, joka oli 16 Mt eli 3,7 kg/asukas. Eniten SER:a per asukas (15,6 kg/as.) kerättiin Euroopassa. Koko Euroopan alueella mukaan lukien Venäjä, SER:a muodostui 11,6 Mt. Vähiten SER:a muodostui Oseanian alueella (0,6 Mt.), mutta asukasta kohden SER:n määrä oli melkein Euroopan luokkaa (15,2 kg/as.). Afrikassa SER:a muodostui vähiten asukasta kohden (1,7 kg/as.) ja koko maanosassa 1,9 Mt SER:a. Pohjois- ja Etelä-Amerikassa SER:a muodostui yhteensä 11,7 Mt, joka asukasta kohden on 12,2 kg/as. (Baldé et al. 2015, 25.) Teollisuusmaissa SER:a muodostuu

huomattavasti enemmän kuin kehitysmaissa. SER-jakeiden jakautuminen maanosittain esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. SER-jakeiden muodostuminen maanosittain (Baldé et al. 2015, 25)

2.2 SER:n tilanne Suomessa

Suomessa vuonna 2015 eniten SER-jakeista kerättiin suuria kodinkoneita. Niitä kerättiin yli 31 000 tonnia ja ne muodostivat yli puolet (50,4 %) kaikesta kerätystä SER:sta. Toiseksi suurimman osuuden muodostivat kuluttajaelektronikka ja aurinkosähköpaneelit (24,2 %) ja kolmanneksi eniten kerättiin tieto- ja teleteknisiä laitteita (15,0 %). Tämän jälkeen eniten kerättiin pieniä kodinkoneita (3,8 %). Loput SER-jakeet muodostivat 6,6 % kerätystä SER:sta ja niitä kerättiin yhteensä 4 123 tonnia. Yhteensä SER:a kerättiin 62 544 tonnia, joka on asukasta kohden 11,41 kg/as, mikä on hieman vähemmän kuin Euroopassa keskimäärin. (Eurostat 2015.) Kerättyjen SER-jakeiden muodostuminen esitetty taulukossa 1. Taulukossa on huomioitava, että jakeet on jaoteltu luvun 2 alussa esiteltyjen kuuden luokan sijasta kymmeneen eri luokkaan. Tämä vaikeuttaa taulukon 1 lukujen vertailu kuvien 1 ja 2 lukuihin.

Taulukko 1. Kerättyjen SER-jakeiden määrät Suomessa vuonna 2015 (Eurostat 2015)

Kategoria	Kerätty [t]	Osuus [%]
1 Suuret kodinkoneet	31 534	50,4
2 Pienet kodinkoneet	2 400	3,8
3 Tieto- ja teletekniset laitteet	9 378	15,0
4 Kuluttajaelektronikka ja aurinkosähköpaneelit	15 109	24,2
5a Valaisulaitteet	1 045	1,7
5b Kaasupurkauslamput	973	1,6
6 Sähkö- ja elektroniikkatyökalut	1 080	1,7
7 Lelut, vapaa-ajan urheiluvälineet	178	0,3
8 Lääkinnälliset laitteet	87	0,1
9 Tarkkailu- ja valvontalaitteet	155	0,2
10 Automaatit	605	1,0
Yhteensä	62 544	100

2.3 Tuottajavastuu ja lainsäädäntö

SE-laitteita koskee tuottajavastuu, joka perustuu jätelakiin (JL 17.6.2011/646) ja valtioneuvoston asetukseen sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta (Vna 3.7.2014/519). Tuottajavastuu

velvoittaa laitteiden valmistajaa, maahantuojaa ja omalla tuotemerkillä laitteita myyvää järjestämään tuotteilleen jätehuollon ja vastaamaan niistä aiheutuvista kustannuksista (JL 2011/646, 46 §). Tuottajan täytyy järjestää käytöstä poistetuille laitteille vastaanottoaika, jonne laitteen voi maksutta ja vaivattomasti tuoda (JL 2011/646, 49 §). Tuotteen jakelija on myös velvoitettu ottamaan vastaan myyntipisteessään kotitalouksista peräisin olevat laitteet, joiden tilalle ostetaan uusi laite (JL 2011/646 56 §). Tuottajavastuun toteutumista Suomessa valvoo Pirkanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (JL 2011/646, 25 §).

Edellä mainitut jätelaki ja valtioneuvoston asetus toteuttavat EU:n SER-direktiiviä (2012/19/EU). Direktiivin tarkoituksena on ennaltaehkäistä SER:n syntymistä ja edistää sen uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Tavoitteena on myös minimoida SER:n hävittämistä lajittelemattomana yhdyskuntajätteenä SER:n erilliskeräyksen avulla. Korkea taso olisi erityisesti saavutettava otsonikerrosta heikentäviä aineita ja fluorattuja kaasuja sisältävien jäähdytys- ja pakastuslaitteiden keräyksessä. Direktiivissä säädetty vähimmäiskeräysaste SER:lle on 45 % vuodesta 2016 lähtien ja se kasvaa asteittain, jolloin vuodesta 2019 eteenpäin tavoiteltava keräysaste on 65 %. (2012/19/EU.)

SER:n sisältämien vaarallisten aineiden käyttöä on pyritty rajoittamaan SER- ja RoHS-direktiiveillä sekä POP- ja REACH-asetuksilla. RoHS-direktiivillä (2011/65/EU) ja sen nojalla annetulla Lailla vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa (387/2013) vähennetään lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuudenarvoisen kromin, polybromibifenyyliden (PBB) ja polybromidifenyyleetterien (PBDE) esiintymistä näissä laitteissa. Asiakirjassa on asetettu kunkin aineen enimmäispitoisuudeksi 0,1 painoprosenttia, pois lukien kadmium, jonka enimmäispitoisuus on 0,01 %. Rajoitukset koskevat uusia laitteita, jotka on saatettu markkinoille 1.7.2016 jälkeen. Suomessa RoHS-lain noudattamista valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), lukuun ottamatta terveydenhuollon laitteita, joiden valvonta kuuluu Sosiaali- ja terveystieteiden lupa- ja valvontavirastolle (Valvira) (Tukes 2016).

EU:n POP-asetuksella (850/2004/EY) ja Tukholman yleissopimuksella (34/2004) rajoitetaan pysyvien orgaanisten yhdisteiden (POP) tuotantoa, kauppaa, käyttöä, ja päästöjä. Ase-

tuksessa säädettiin suurin sallittu pitoisuus 4-, 5-, 6-, ja 7- (tetra-heptaBDE) bromia sisältäville PBDE-kongereeneille. Kongereenit ovat samasta kanta-aineesta johdettuja kemikaaleja. Näiden yhdisteiden pitoisuus saa olla neutseellisessä materiaalissa enintään 0,001 painoprosenttia. Rajoitukset koskevat valmistettavia ja markkinoille tulevia aineita, valmisteita, tavaroita tai tavaroiden palonsuojattuja osia. Vastaavasti pitoisuusraja kierrätysmateriaalista valmistetuille tavaroille ja valmisteille on 0,1 %. (Retkin 2012, 21.)

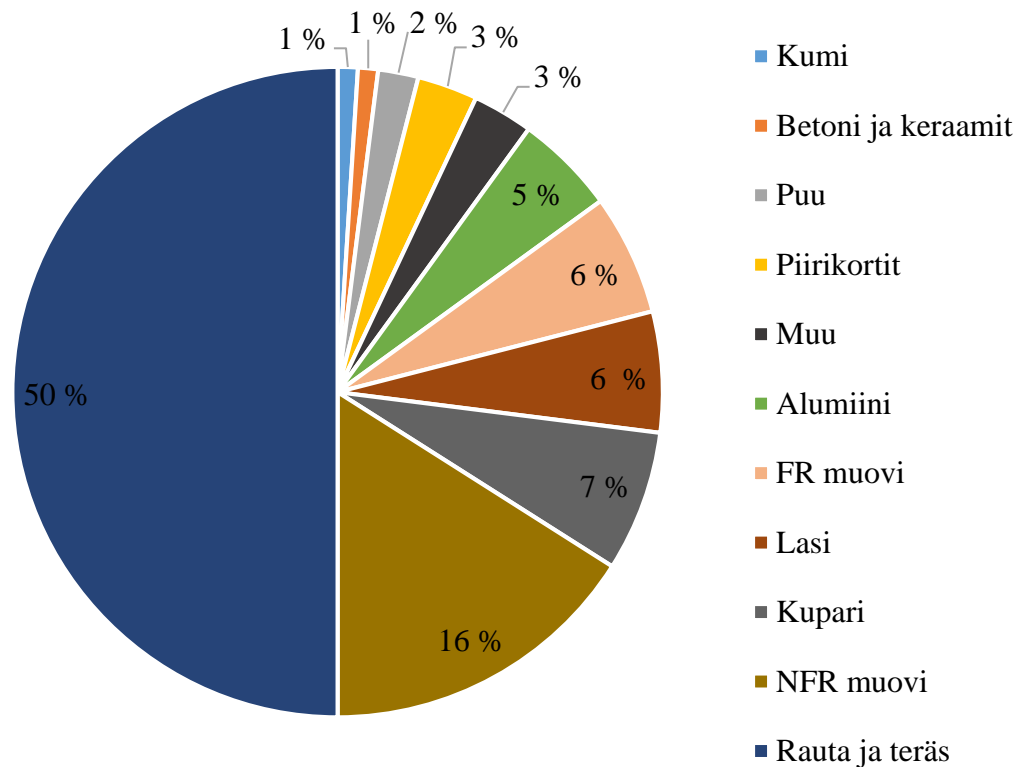
EU:n asetuksella kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista (REACH 1907/2006) on asetettu oktabromidifenyylieetterille (OBDE) rajoituksia. Asetuksen mukaan esineet tai niiden osat, jotka sisältävät yli 0,1 % painostaan OBDE:a, eivät saa päätyä markkinoille. Ennen 15. elokuuta 2004 käytössä olleet esineet ja niiden jätteet eivät ole asetuksen piirissä. Dekabromidifenyylieetterin (DBDE) käyttö kiellettiin 1. huhtikuuta 2008. REACH-asetuksen piirissä oli myös pentabromidifenyylieetteri (PeBDE), mutta yhdiste siirrettiin POP-asetuksen piiriin. REACH:ssa heksabromidisyklododekaani (HBCD) on todettu erittäin suurta huolta aiheuttavaksi yhdisteeksi täyttäen vaatimukset pysyvälle, biokertyvälle ja myrkylliselle PBT-yhdisteelle. HBCD lisättiin vuonna 2011 REACH:n valvottavien yhdisteiden listalle ja vuodesta 2015 lähtien sitä ei saa käyttää ilman lupaa. (Retkin 2012, 22.)

SER luokitellaan pääasiassa vaaralliseksi jätteeksi, mutta joitain poikkeuksia luokittelussa kuitenkin on. Vaarattomaksi jätteeksi luokitellaan vain metalleja ja metalliseoksia sisältävät sähkölaitteiden jätteet sekä elektroniikkaromu (kuten painetut piirilevyt, elektroniset komponentit, johdot jne.) ja talteen otetut elektroniset komponentit, jotka soveltuvat perus- ja jalometallien hyödyntämiseen. (2006/1013/EY.)

2.4 SER:n materiaalikoostumus

Materiaalikoostumukseltaan SER on hyvin vaihtelevaa. Laitteiden käyttötarkoitukset ja koko vaihtelevat laajasti, mikä on otettava huomioon materiaalivalinnoissa laitetta suunniteltaessa. Myös yksittäisen laitteen sisällä on lukuisia eri komponentteja. Materiaalien laajan kirjon takia SER:n käsittely on ongelmallista. Keskimäärin SER:sta yli puolet on erilaisia

metalleja kuten rautaa, terästä, alumiinia ja kuparia. Toiseksi suurimman osan romun koostumuksesta muodostaa muovi, jotka voidaan jakaa vielä palonestoaainetta sisältäviin (FR muovit) ja sisältämättömiin muoveihin (NFR muovit). (Ignatius et al. 2009, 24.) Keskimääräinen materiaalikoostumus esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. SER:n keskimääräinen materiaalikoostumus (Ignatius et al. 2009, 24)

2.4.1 Metallit

Suurin osa SER:n sisältämästä metallista on rautaa ja terästä, jotka muodostavat noin puolet SER:sta. Kuparia on keskimäärin noin 7 % ja alumiinia noin 5 %. (Ignatius et al. 2009, 24.) Arvometalleja SER:ssa on huomattavasti vähemmän, mutta usein sen arvometallipitoisuudet ylittävät kaivoksista saatavan malmin pitoisuudet. Hopeaa SER:n materiaaleista on keskimäärin 21,4 g/t, kultaa 6,5 g/t ja platinaryhmän metalleja 2,1 g/t. Vastaavasti malmin keskimääräinen hopeapitoisuus on 850 g/t, kultapitoisuus 5 g/t ja platinaryhmien metallipitoisuus alle 2 g/t. (Haig et al. 2012, 8.)

2.4.2 Piirilevyt

Piirilevyjä on SER:n painosta vain muutama prosentti, mutta ne sisältävät paljon arvometalleja kuten kultaa, palladiumia, hopeaa ja kuparia, ja suurin osa SER-jakeen arvometalleista keskittyykin juuri piirilevyihin. Arvometallien määrät voivat nousta sadoista jopa tuhansiin grammoihin tonnissa. Tämä on huomattavasti enemmän kuin malmeissa, mikä korostaa piirilevyjen kierrättämisen taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Kokonaismetallipitoisuus piirilevyissä on keskimäärin noin 40 % ja loppuosa koostuu keraameista (30%) ja muoveista (30%). (Kavander 2016, 6.)

2.4.3 Muovit

Sähkön- ja lämmöneristävyytensä takia muovit ovat tärkeä osa SE-laitteita. Lisäksi muovit ovat kevyitä ja helposti muovattavissa. Pienetkin laitteet voivat sisältää kuutta eri muovia. (Buekens & Yang 2014, 417.) Yleisimmät käytetyt muovit ovat akrylinitriilibutadieenistyreeni (ABS), polykarbonaattimuovi (PC), iskunkestävä polystyreeni (HIPS) ja polyfenyleenioksidiseokset (PPO) (Ignatius et al. 2009, 24). Ennen prosessointia muoveihin sekoitetaan tiettyjä lisäaineita kuten stabilointiaineita, antistaattisia aineita, palonestoaineita, väriaineita, pehmentimiä, täyteaineita ja lasi- ja hiilikuitua vahvikkeeksi. Suurin haitta kierrätyksen kannalta on bromatut palonestoaineet ja raskasmetallit kuten elohopea, lyijy ja kadmium, joita on voinut tulla muoveihin SER:n aikaisemmasta käsittelystä. (Buekens & Yang 2014, 416–418.) Eri muovilaatujen määrä SER:ssa esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri muovilaatujen esiintyminen SER:ssa (Baxter et al. 2014, 28)

Muovilaatu	Osuus kerätyistä SER-muoveista
ABS	33,1 %
PP	17,8 %
PS	21,8 %
PC	9,6 %
PVC	4,5 %
PBT	3,3 %
PA	0,1 %
Muut	9,7 %

Kuten taulukosta 2 huomataan muovilaadut ABS, polypropeeni (PP) ja polystyreeni (PS) muodostavat yli 70 % kaikista kerätyistä SER-muoveista. Yleisesti ottaen näitä muoveja pidetään mekaanisesti eroteltavina ja siten kierrätettävissä olevana sekoituksena. Nykyisillä erottelutekniikoilla styreenien (ABS ja PS) erottelu muista polyolefiini-muovijakeista (polyeteeni (PE) ja PP) on suhteellisen rutiini toimenpide. Suurimpana ongelmana kierrätysteknologialle on styreenien erottaminen toisistaan. Kaikkien muovien osalta suurin ongelma kierrätettävyyden kannalta on vaarallisten aineiden mahdollinen sisältyminen niihin. (Baxter et al. 2014, 28.)

Ruotsalaisten SER:n käsittelylaitosten raporttien mukaan SER:n muovijakeesta noin kolmasosa on suojattu bromatuilla palonestoaineilla. Eniten bromattuja palonestoaineita esiintyy laitteiden osissa, jotka on valmistettu ABS:tä, HIPS:stä ja ABS/PC:stä. PP:ssa ainetta esiintyy vähemmän, tosin sen osuus PP:n suojauksessa on kasvanut. Eniten BFR-muovia eli bromattuja palonestoaineita sisältäviä muoveja on tietokoneiden ja televisioiden koteloissa ja konttorikoneissa ja suurimmat BFR-pitoisuudet ovat tieto- ja teleteknisissä laitteissa. Myös pienissä kuumenevissä kodin pienlaitteissa esiintyy hieman palonestoaineita. Harvemmin BFR-muovia havaitaan valkoisissa, isoissa SE-laitteissa. (Myllymaa et al. 2015, 39 – 40.)

Palonestoaineiden tarvetta laitteissa on vähennetty lisäämällä tulenarkuudeltaan alhaisempien muovien osuutta. Palonestoaineella suojattua ABS-muovia on 2000-luvulta lähtien korvattu suojaamattomalla HIPS-muovilla televisioiden valmistuksessa. Alhaisemman tulenarkuuden omaavia polymeerejä on käytetty myös muiden polymeerien korvaamiseen. Eräät laitevalmistajat kuten Apple ovat lopettaneet kokonaan bromattujen palonestoaineiden käyttämisen valmistamissaan laitteissa. Laitetta voidaan pitää BFR-vapaana, jos bromin kokonaispitoisuus on alle 900 mg/kg. (Myllymaa et al. 2015, 40.)

3 SER:N SISÄLTÄMÄN MUOVIN OMINAISUUDET

Muovit jaotellaan niiden valmistusprosessien ja uudelleenprosessoitavuuden perusteella kerta- ja kestopuoveihin. Kestomuoveja toisin kuin kertamuoveja voidaan muovata uudelleen lämmön ja paineen avulla. Kestomuovit jaetaan edelleen valtamuoveihin, teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin. Erikoismuovien ominaisuudet ovat parempia kuin teknisten- ja valtamuovien ja nimensä mukaan niillä erikoisominaisuuksia, kuten erittäin hyvä lämmönkesto. Teknisten muovien ominaisuudet sijoittuvat valta- ja erikoismuovien välille ja laajan ominaisuusjakaumansa takia niitä käytetään monissa eri sovelluksissa. Teknisiä muoveja ovat muun muassa HIPS, ABS ja PC. (Aaltonen 2014, 2.) Valtamuoveihin kuuluu muun muassa PS, PVC, PE ja PP (Muoviteollisuus ry 2018). SER-muovit koostuvat pääasiassa valtamuoveista ja teknisistä muoveista. Joidenkin SE-laitteiden muovilaatujen osuuksia on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. SE-laitteiden sisältämiä muovilaatuja (European Commission DG ENV 2011, 49)

SER-laite	Muoviosuudet
Tulostimet/faksit	PS (80%), HIPS (10%), SAN (5%), ABS, PP
Matkapuhelimet	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%)
Näytöt ja monitorit	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
Jääkaapit	PS&EPS (31%), ABS (26%), PU (22%), UP (9%), PVC (6%)
Astianpesukoneet	PP (69%), PS (8%), ABS (7%), PVC (5%)

3.1 Akrylinitriilibutadieenistyreeni (ABS)

Akrylinitriilibutadieenistyreeni eli ABS on tekninen kolmikomponenttinen styreenimuovi. Sitä valmistetaan kopolymerisoimalla polystyreeniä, butadieenia ja akrylinitriiliä. Komponenttien suhteellisten osuuksien vaihtelun takia kaupallisen ABS:n ominaisuudet voivat vaihdella suuresti. Tyypillisesti ABS sisältää 20–30 % akrylinitriiliä, 20–30 % butadieenia

ja 40–60 % styreeniä. (Nykänen 2018a, 3.) Butadieenin ansiosta muovilla on hyvä iskulujuus myös alhaisissa lämpötiloissa. Ominaisuuksiltaan ABS on sitkeää, ja sillä on hyvä pinnanlaatu ja –kovuus sekä se on helposti pinnoitettavissa. ABS:lla on huono sään- ja liuotinkesto ja se pehmenee alhaisissa lämpötiloissa. Tyypillisesti ABS:a seostetaan muihin muoveihin, erityisesti polykarbonaattiin, joka parantaa tuotteiden lämmönkestoja, iskulujuutta ja työstettävyyttä. Hinnaltaan ABS on melko edullinen. Luonnonvärinen ABS on maksanut halvimmillaan 1,4 €/kg ja kalleimmillaan 2 €/kg. Värjätty ABS on väristä riippuen 0,5–0,1 euroa kalliimpaa. ABS:a käytetään muun muassa elektroniikkalaitteiden koteloissa ja kuorissa. (Aaltonen 2014, 3–4.)

ABS-muoville tehtyjen kierrätyskokeiden perusteella eniten muovin ominaisuuksista kierrätyksen aikana muuttuu iskunkestävyys ja kutistuvuus. Kierrätyskertojen lisääntyessä muovin iskunkestävyys huononee lineaarisesti ja kutistuvuus vähenee. Kierrätyskokeissa havaittiin viidennen kierrätyksen jälkeen 17 % vähemmän kutistumista, jonka arvellaan johtuvan muovin laadun heikkenemisestä. Heikkenemisen katsotaan johtuvan ABS-muovissa olevien butadieenin sidosten hajoamisesta. Lisäksi lisäaineet, jotka lisäävät muovin kestävyyttä, haihtuvat helposti kierrätystilanteissa. (Eskelinen et al. 2016, 37–38.) Kierrätys voi aiheuttaa myös ulkonäkömuutoksia kuten muovin kellastumista (Aaltonen 2014, 45).

3.2 Polystyreeni (PS)

Polystyreeni luokitellaan valtamuoveihin, mutta kun siihen lisätään kumia tai butadieenikopolymeeriä voidaan puhua iskunkestävästä polystyreenistä (HIPS), joka kuuluu teknisiin muoveihin (Aaltonen 2014, 3). Edellä mainittujen aineiden sekoittaminen polystyreeniin lisää muovin sitkeyttä ja iskulujuutta. Polystyreeni on amorfinen ja lasimainen polymeeri, joka ominaisuuksiltaan on jäykkää ja haurasta. Sitä voidaan käyttää läpinäkyvissä tuotteissa kuten CD-levyjen koteloissa tai sitä voidaan värjätä ja käyttää leluissa tai putkien osissa. Polystyreeni on kaksi kertaa halvempaa kuin ABS-muovi. HIPS on myös edullinen muovi, jolla on hyvä mittapysyvyys ja mekaaniset ominaisuudet ja sitä käytetään usein kohteissa, jossa tarvitaan iskunkestävyyttä. Lisäksi HIPS:n sähkön läpilyöntikestävyys on hyvä, joten sitä käytetään esimerkiksi sähköeristeissä. (Nykänen 2018a, 1–6.)

Tutkimusten mukaan HIPS:n muokattavuus heikkenee merkittävästi kierrätettäessä. Tämä johtuu materiaalien heikentymisestä termomekaanisen prosessoinnin aikana. Tämän lisäksi kyseisen muovin iskutkeys heikkeni, mikä todennäköisesti johtui polymeerien heikkeneemisestä ja pigmenttinä käytetystä titaanioksidista, aiheuttaen epähomogeenisyyttä. Tutkimuksissa huomattiin myös, että sekoittamalla pieniä määriä ABS-muovia HIPS-muoviin tai HIPS-muovia ABS-muoviin, seoksen mekaaniset ominaisuudet paranivat lukuun ottamatta iskunsieto-ominaisuuksia. Kierrätyksen aikana tapahtuvaa muovien heikkenemistä voidaan siis vähentää sekoittamalla muoveja keskenään. (Brennan et al. 2001, 578.)

3.3 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni on kiteinen muovi ja se voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: homopolymeeri, blokkipolymeeri ja satunnais- tai randomkopolymeeri. Polypropeenin erikoisuus on hyvä saranaominaisuus eli se kestää hyvin taivuttamista ja siitä valmistettuja ohuita filmisaranoita voidaan taivuttaa kymmeniätuhansia kertoja. Lisäksi se on iskun- ja lämmönkestävää. Käyttökohteiltaan polypropeenia pidetään monipuolisimpana muovina ja siitä voidaan valmistaa muun muassa kuituja, kalvoja, levyjä, ruiskuvalettuja pakkauksia, putkia ja auton osia. (Järvinen 2008, 41, 135.)

Polypropeenin edullisuus ja monipuolisuus aiheuttavat kuitenkin joitain ongelmia kierrätyksen kannalta. Jos halutaan säilyttää kierrätetyn PP:n ominaisuudet, täytyy se erottaa muista polymeereistä kuten PS ja ABS. Lisäksi se on eroteltava muista PP-polymeereistä kuten PP:n homopolymeerit PP:n randomkopolymeereistä. Kierrätyksen aikana voi tapahtua suuri häviöitä mekaanisissa ominaisuuksissa. Korkeissa lämpötiloissa ja useiden prosessointikierrosten aikana PP:n viskositeetti vähenee ja kimmoisuus heikkenee. (da Costa et al. 2004, 87,93.)

3.4 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatti on polystyreenin tapaan amorfinen ja lasinkirkas polymeeri. Se on jäykkä ja kova muovi ja sitkeämpää kuin polystyreeni. Polykarbonaattia voidaan käyttää laajalla lämpötila-alueella, sillä se ei syty helposti ja on itsestään sammuva ja se kestää jatkuvaa 130

°C lämpötilaa. Se on kemiallisesti kestävä, sähköä eristävä ja kestää hyvin naarmuja. Ilman stabilointia sillä on kuitenkin huono UV-valonkesto ja se kestää huonosti vettä korkeissa lämpötiloissa. (Aaltonen 2014, 4.) Polykarbonaattia käytetään muun muassa luodinkestävisissä laseissa, tietokonekomponenteissa sekä konttori- ja kirjoitustarvikkeissa (Nykänen 2018b, 3). Polykarbonaatin hinta oli vuoden 2008 alussa hieman alle 3 €/kg. Sitä pidetään suosituimpana teknisenä seosmuovina ja sitä seostetaan usein ABS:n kanssa. (Aaltonen 2014, 4.)

Kuten edellä mainituilla muoveilla, myös polykarbonaatilla tapahtuu ominaisuuksien heikkenemistä sitä kierrätettäessä. Pérez et al.:n (2010) tutkimuksessa polykarbonaattia uudelleen prosessoitiin ruiskuvalukoneella. Polykarbonaatin elastisuus ei juurikaan muuttunut prosessien aikana. Myöskään muovin vetolujuus ei muuttunut ensimmäisen viiden prosessikierron aikana, mutta osoitti pientä heikkenemistä kuudennen kierron jälkeen ja kahdeksannen kierron jälkeen vetolujuus oli 40 % alhaisempi kuin alkuperäisellä materiaalilla. Iskusitkeyttä mitattaessa onnistuttiin mittaamaan vain ensimmäiset neljä kierrosta, minkä jälkeen polykarbonaatin iskusitkeys oli laskenut alle mittaustilauksen rajan. (Pérez et al. 2010, 730–731.)

3.5 Bromatut palonestoaineet (BFR)

Bromatut palonestoaineet ovat halogenoituja palonestoaineita. Halogenoidut palonestoaineet ovat olleet taloudellisesti tärkeimpiä palonestoaineita eikä bromattuja palonestoaineita, tarvita niin suuria määriä verrattuna muihin palonestoaineisiin. Ne toimivat kaasufaasissa estäen polymeerien hajoamista ja muodostaen raskaita kaasumaisia yhdisteitä materiaalin pinnalle, estäen hapen pääsyn palavalle alueelle. Halogenoituja palonestoaineita käytetään usein erilaisten antimoniseosten kanssa, jolloin palonesto-ominaisuudet paranevat. Näiden palonestoaineiden käyttöä on kielletty ja rajoitettu viime vuosien aikana runsaasti, sillä ne aiheuttavat haitallisia ympäristövaikutuksia ja terveysongelmia. (Aaltonen 2014, 31.) SELaitteiden muoveista noin 30 % on käsitelty palonestoaineilla ja niistä 41 % on halogenoiduilla palonestoaineilla käsitelty. Bromattujen palonestoaineiden osuus halogenoiduista on noin 75 %. (Retkin 2012, 12.) Eri bromattujen palonestoaineiden vuosittainen käyttö esitetty taulukossa 5.

3.5.1 Polybromidifenyylieetterit (PBDE)

Polybromidifenyylieettereitä on yhteensä 209 eri seosta. Kaupallisesti saatavilla olevat PBDE:t ovat polybromidifenyylieetterien seoksia. Seokset nimetään sen mukaan, mitä kongereeniä niissä on eniten (taulukko 4), pois lukien oktabromidifenyylieetteri (OBDE). (Retkin 2012, 10.)

Taulukko 4. Kaupallisten PBDE-seosten BDE-kongereeni koostumus (Retkin 2012, 9)

Kaupallinen seos	Kongereeni (%)						
	Tetra-BDE	Penta-BDE	Heksa-BDE	Hepta-BDE	Okta-BDE	Nona-BDE	Deka-BDE
PeBDE	24–38	50–60	4–8				
OBDE			10–12	44	31–35	10–11	
DBDE						<3	97–98

PBDE:t voivat aiheuttaa monia haittoja ihmisen elintoiminnalle. Ne voivat muun muassa heikentää kilpirauhasen hormonitoimintaa sekä vaikuttaa maksan toimintaan. Pentabromidifenyylieetteri (PeBDE) voi vahingoittaa elimiä toistuvassa tai pitkäaikaisessa altistuksessa. Lisäksi sillä voi olla haitallisia vaikutuksia rintaruokinnassa oleville lapsille. Vesiliöille kyseinen yhdiste on erittäin myrkyllinen ja voi vaikuttaa pitkäaikaisesti vesiympäristössä. Oktabromidifenyylieetterin (OBDE) epäillään heikentävän hedelmällisyyttä ja se voi vahingoittaa sikiöitä. Dekabromidifenyylieetteri (DBDE) on luokiteltu ympäristölle ja terveydelle vaarattomaksi. Bromattujen palonestoaineiden kanssa käytettävän tehoaineen antimoniin epäillään aiheuttavan syöpää. (Retkin 2012, 10.)

3.5.2 Heksabromidisyklododekaani (HBCD)

HBCD on voimakkaasti hiukkasiin sitoutuva ja rasvahakuinen, mutta vesiliukoisuudeltaan pieni yhdiste. Sillä on POP-yhdisteen ominaisuudet ja se täyttää pysyvän, myrkyllisen ja biokertyvän yhdisteen määritelmän. Kuten edellä mainitut PBDE-yhdisteet myös HBCD vaikuttaa maksan ja kilpirauhasen toimintaan sekä on vesiliöille erittäin myrkyllinen vaikuttaen pitkäaikaisesti vesiympäristössä. HBCD:ä voidaan käyttää joko muiden palonestoaineiden kuten DBDE:n ja antimonitrioksidiseoksen kanssa tai yksinään. (Retkin 2012, 11.)

3.5.3 Tetrabromibisfenoli A (TBBPA)

TBBPA:n myrkyllisyyttä ihmiselle ei ole vielä osoitettu, mutta se on luokiteltu ympäristölle vaaralliseksi. Se on erittäin myrkyllistä vesieliöille ja voi vaikuttaa pitkäänkin vesiympäristössä. TBBPA:ta käytetään erityisesti piirikorteissa, johon se on lisätty useimmiten reaktiivisesti eli sitomalla se kemiallisesti polymeereihin. Tämä takaa sen, ettei yhdiste irtoa muovista yhtä helposti kuin difenyylietterit, joita käytetään additiivisesti. Additiivisesti käytetyt palonestoaineet vapautuvat tuotteesta helpommin, koska ne on vain sekoitettu polymeereihin. TBBPA:ta on toki käytetty additiivisesti, mutta esimerkiksi Saksassa sen additiivista käyttöä on pyritty vähentämään. (Myllymaa et al. 2015, 10.)

3.5.4 Bromattujen palonestoaineiden rajoitus

Bromattujen palonestoaineiden käyttöä rajoitetaan WEEE- ja RoHS-direktiiveillä sekä POP- ja REACH-asetuksilla. Paljon käytössä olleet PBDE:n seokset PeBDE ja OBDE ovat olleet kiellettyjä EU:ssa vuodesta 2004 eikä niitä ole saanut tuoda EU:n alueelle vuoden 2005 jälkeen (Aaltonen 2014, 31.) Kaupallisen PeBDE:n ja OBDE:n on arvioitu poistuvan merkittävästi vuonna 2016 SE-laitteista, kun laitteiden eliniäksi on arvioitu 10 vuotta (Retkin 2012, 13). DBDE synnyttää hajotessaan ihmisen terveydelle haitallisia yhdisteitä, joten sen käyttöä on rajoitettu EU:ssa. Sitä on kuitenkin saanut vuoteen 2008 asti käyttää SE-laitteissa. DBDE:lle on ollut vaikea löytää korvaava aine, joten maailmanlaajuisesti sitä ei ole kielletty kaikkialla. (Aaltonen 2014, 32.) Rasvahakuista HBCD:a ollaan kieltämässä maailmanlaajuisesti. Rakennusten polystyreenieristeiden suojaukseen ainetta saa kuitenkin käyttää vielä noin viiden vuoden ajan, kunnes korvaava palonestoaine saadaan markkinoille. (Ympäristöministeriö 2013.)

Taulukko 5. Bromattujen palonestoaineiden arvioidut vuosittaiset käyttömäärät, 1000 t/a (Retkin 2012, 8)

Vuosi	PeBDE	OBDE	DBDE	TBBPA	HBCD
Eurooppa 2001	150	610	7 600	11 600	2 800
Pohjois- ja Etelä-Amerikka 2001	7 100	1 500	34 500	18 000	9 500
Aasia 2001	150	1 500	23 000	89 400	3 900
Gloaali käyttö 2001	7 500	3 790	56 100	119 700	16 700
Gloaali käyttö 2002	-	-	65 700	150 600	21 400
Gloaali käyttö 2003	-	-	56 400	145 100	22 000

4 MUOVIEN HYÖDYNTÄMINEN JA LOPPUKÄSITTELY

Ennen SER-muovien varsinaista hyötykäyttöä on tälle jakeelle tehtävä tiettyjä toimenpiteitä, riippuen hieman valitusta hyödyntämistavasta. Jae voi vaatia muun muassa esikäsitteilyä ja tiettyjen aineiden poistoa ennen varsinaista käsittelyä. SER-muovien hyödyntämismahdollisuudet voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: mekaaniseen kierrättämiseen, kemialliseen kierrättämiseen ja energiahyödyntämiseen.

4.1 Esikäsitteily

Ennen SER-muovien kemiallista tai mekaanista kierrättämistä on muovijae homogenisoitava. Muovijakeen homogenisointi alkaa metallien, puun, kumin, kivien, lasin sekä hienon pölyn poistamisella. Nämä kappaleet saadaan poistettua muovien seasta käyttämällä kuivia tai märkiä prosesseja tai niiden yhdistelmiä. Erotteluprosessin tehokkuuden parantamiseksi on materiaali murskattava ennen erottelua. (Retkin 2012, 24.) Märkäprosessissa muovijaetta voidaan pestä kylmällä tai kuumalla vedellä, laimealla pesunesteellä tai alkalilla. Kuivaprozessissa lika irrotetaan muoveista nopeasti pyörivillä potkureilla. Suuri pyörimisvoima irrottaa lian muoveista. (Eskelinen et al. 2016, 21.) Märkäprosessien ongelmana on suuri jäteveviesien määrä sekä erillisen lajittelukeskuksen tarve. Kuivaprozessissa syntyy usein vähemmän jätettä ja se vie vähemmän tilaa. Haitta-aineiden väheneminen materiaaleissa saattaa tulevaisuudessa vähentää syntyviä jätemääriä. (Retkin 2012, 24.)

4.2 Muovien tunnistaminen

Muovilaatuja voidaan erotella polymeerityyppjä tunnistavalla tekniikalla kuten lähi-infrapuna-analyysillä (NIR). NIR:ssä jokaiselle polymeerille on määritetty tunnusomainen spektri, joilla muovit voidaan tunnistaa. Menetelmä ei kuitenkaan pysyt erottelemaan tummia muoveja toisistaan. Kun muovikappale on tunnistettu jätevirrasta, voidaan se erottaa esimerkiksi tietokoneohjatulla ilmapirralla jatkamaan eteenpäin linjastolla. (Eskelinen et al. 2016, 24–25.) Muovityyppjä erottelemalla on mahdollista myös saada osa bromatuista palonestoaineista pois materiaalikierrasta, sillä eniten kiellettyjä aineita sisältävät muovityypit ovat tiedossa. Tämä ei kuitenkaan takaa riittävän tarkkaa bromattujen palonestoaineiden

erottelua, sillä jakeeseen saattaa jäädä vielä muoveja joissa on palonestoaineita. Lisäksi vaarana on bromia sisältämättömien muovien erottelu. (Myllymaa et al. 2015, 59–60.)

Muoveja voidaan erotella myös käyttämällä sopivia liuottimia. Liukenevat muovit saadaan täten pois seoksesta. Tällä tavalla saadaan myös joitain lisäaineita kerättyä kuten muovin pehennysaineita. Tämänkaltainen valikoiva liuotinerottelu on kehitetty ja patentoitu Fraunhoferin prosessitekniikka- ja pakkausinstituutissa. CreaSolv® -nimellä patentoitu menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta: tietyn muovin liuottaminen, liukenemattomien aineiden erottaminen polymeeriliuoksesta ja muovin saostaminen puhdistetusta polymeeriliuoksesta. Menetelmää on kokeiltu ja optimoitu laboratoriomittakaavassa ja se on saanut positiivisia arvioita mm. WRAP:n (Waste and Resources Action Programme) ja Sicon:n yhteisprojekteissa. (Buekens & Yang 2014, 428–429.)

4.3 Bromattujen palonestoaineiden tunnistaminen

Bromatut palonestoaineet on poistettava SER:sta, jotta muovit voidaan kierrättää. Näiden aineiden tunnistamiseksi onkin kehitetty standardisoituja menetelmiä kuten kaasukromatografia/massaspektrometri. Lisäksi eri menetelmiä voidaan yhdistää muihin tunnistuslaitteistoihin. Nämä menetelmät ovat kuitenkin hitaita eivätkä sovi kierrätysyrityksien linjastoille. Bromia sisältävät muovit ovat myös eroteltavissa röntgenfluoresenssi (XRF) tai sliding spark (SS) –menetelmien avulla. Nämä menetelmät mittaavat kappaleista bromipitoisuuden, jolloin bromia sisältävät kappaleet voidaan kerätä erilleen muista. Laitteiden heikkoutena on kuitenkin se, että ne tunnistavat vain bromin eivätkä bromattuja palonestoaineita. (Retkin 2012, 25.)

Suomessa ei ole tällä hetkellä käytössä SER-muovien käsittelylinjoja, jotka koneellisesti tunnistavat ja erottelevat bromatut palonestoaineet. SER:n esikäsittelyssä erotellaan ja lajitellaan irralliset ja isot muoviosat kuten kuvaputkimonitorien kotelot värin, tuotetyypin ja polymeerilaadun perusteella. Suurin osa muoveista jää erottelematta ja erotellut muovit myydään jatkokäsittelijöille Euroopassa ja pääosin Aasiassa. (Myllymaa et al. 2015, 37.) Bromatut palonestoaineet voidaan myös erotella ennen laitteiden murskausta käyttämällä

apuna käsikäyttöistä XRF-analysaattorina. Tällainen työntekijöiden tekemä erottelu on käytössä Ruotsissa. (Retkin 2012, 25.) Tämänkaltaisessa manuaalisessa lajittelussa voi kuitenkin esiintyä inhimillisiä virheitä, jolloin palonestoaineita sisältäviä muoveja voi joutua kierätyskelpoisten muovien sekaan (Myllymaa et al. 2015, 59). Lisäksi menetelmän ongelmana on työntekijöiden riski altistua palonestoaineita sisältävälle pölylle ja polybromatuille dioksiineille ja furaaneille (PBDD/F-yhdisteille). PBDD/F-yhdisteitä muodostuu, kun kappaleet altistuvat kohonneille lämpötiloille ja korkealle paineelle. (Retkin 2012, 25.) Työntekijöiden altistumista haitallisille aineille on kuitenkin pystytty merkittävästi alentamaan kehittyneillä työnsuojelumenetelmillä (Myllymaa et al. 2015, 59).

Käsikäyttöistä XRF-analysaattoria on käytetty yleisesti bromattujen palonestoaineiden tunnistamiseen, sillä se on laboratorioanalyysijä halvempi, suhteellisen helppokäyttöinen ja sitä voidaan käyttää ilman että tutkittavaa näytettä tarvitsee esikäsitellä. Määritysrajat ovat alhaiset ja ne voidaan asettaa muun muassa tasoille 10 tai 1000 mg/kg. Eri bromiyhdisteiden tunnistaminen on kuitenkin ongelmana, sillä laite ei erota PBDE-yhdisteitä muista bromiyhdisteistä tai POP-asetuksessa kiellettyjä PBDE-yhdisteitä sallituista yhdisteistä. Muovit sisältävät bromia myös alkuainemuodossa, joten laite yliarvioi bromattujen palonestoaineiden määrän mitattavassa muovissa. Kierrätysalan toimijoiden mukaan XRF-mittauksia ei voi tehdä kuin satunnaisesti tai valituille laitteille kustannussyistä. (Myllymaa et al. 2015, 59.) Retkinin (2012, 26) tutkimuksen mukaan yhden SE-laitteen mittausaika laitteella on 40-60 sekuntia.

XRF:lle vaihtoehtoisena menetelmänä voidaan käyttää automaattisesti linjastossa toimivaa röntgentransmissiota (engl. X-ray transmission, XRT). Jätejakeiden tunnistaminen tapahtuu kokonaisbromipitoisuuteen perustuen ja tunnistetut esineet erotellaan linjastosta automaattisesti. Vuonna 2010 laitteen hankintahinta oli noin 400 000 dollaria. (Myllymaa et al. 2015, 60.)

XRF:n tavoin manuaalisesti toimii myös SS-menetelmä, joka tunnistaa kappaleen bromi- ja/tai klooripitoisuuden. Menetelmän määritysraja on 1 000 mg/kg, joka on korkeampi kuin XRF:llä. Määritysrajaksi menetelmää käyttäneet ovat kuitenkin laittaneet 10 000 mg/kg, jol-

loin muoviosat joihin on tarkoituksella lisätty bromattuja palonestoaineita, tulevat erotel-
luiksi. XRF:ään verrattuna laite on edullisempi ja sen mittausaika on muutama sekunti. Mit-
taustulosten saamiseksi maalattujen ja päällystettyjen kappaleiden pinta pitää kuitenkin rik-
koa. Laitteeseen voidaan myös yhdistää lähi-infrapuna-analyysin (NIR), jolla voidaan tun-
nistaa myös eri polymeerejä. (Myllymaa et al. 2015, 60.)

Tarkimmat menetelmät bromattujen palonestoaineiden tunnistamiseen ovat laboratoriossa
suoritettavat analyysit. Menetelminä laboratorioissa käytetään kromatografisia menetelmiä
yhdistettynä massaspektrometriin. Näin analysoituna saadaan hyvin tarkasti selville mitä
BDE-kongereeneja ja mitä pitoisuuksia näytteessä on. Laboratoriossa tehtyjä analyysieja on
kuitenkin hyvin vaikea hyödyntää erotteluprosessien aikana, sillä se sopii parhaiten piste-
koemaiseen ja ajoittaiseen tarkkailuun. (Myllymaa et al. 2015, 59.)

4.4 Mekaaninen kierrätys

Arvioiden mukaan mekaanisesti kierrätettyjen SER-muovien osuus kaikesta mekaanisesti
kierrätetystä muovista on alle 2 %. Mekaanisella kierrätyksellä tarkoitetaan SER-muovien
jälleenkäsittelyä uusiksi muovituotteiksi, joilla on samankaltaiset tai huonommat ominaisuu-
det kuin alkuperäisellä tuotteella. (Buekens & Yang 2014, 427.) Mekaanisessa kierrätyk-
sessä muovi yleensä joko silputaan tai sulatetaan. SER-muovit erotellaan tarkasti muista ma-
teriaaleista ja lajitellaan muovilaaduittain ennen muuta prosessointia. Ideaalisessa tapauk-
sessa aineet saadaan eroteltua siten, että erotellussa jakeessa on vain yhtä muovilaatua ja
tiedettyjä lisäaineita. Lähemmäs tätä ideaalista tilannetta päästään, kun tiettyjä laitteita pu-
retaan yhdellä linjastolla, jolloin talteen otetut muovit noudattavat samoja laatuvaatimuksia.
Toisaalta laitteiden koteloiden kierrätysmahdollisuudet ovat rajalliset, sillä niissä käytetään
useita eri muovilaatuja. Lajittelua hankaloittaa entisestään se, että muoviosissa ei ole mer-
kintöjä niiden sisältämistä muovilaaduista. (Buekens & Yang 2014, 427.)

Useimmat muovit ja muutamat lisäaineet ovat keskenään yhteensopimattomia. Kuvassa 4
on esitetty muovien yhteensopivuus sekä ilman että bromattujen palonestoaineiden kanssa.
Koska muovien erottelu ei ole koskaan täydellistä, erotellun muovijakeen sekaan voi jäädä
muoveja, jotka eivät sekoitukaan toisten polymeerien kanssa. Tällöin kierrätetty muovi ei

saavuta neitseellisen muovin ominaisuuksia. Laadun parantamiseksi kierrätysmuovin sekaan usein sekoitetaan neitseellistä muovia. (Tange et al. 2012, 5.)

	ABS	ABS+BFR	HIPS	HIPS+BFR	PMMA	PC/ABS	SAN	PC/ABS+BFR	HIPS/PPE	HIPS/PPE+PFR
ABS										
ABS+BFR										
HIPS										
HIPS+BFR										
PMMA										
PC/ABS										
SAN										
PC/ABS+BFR										
HIPS/PPE										
HIPS/PPE+PFR										

Kuva 4. Eri muovien ja palonestoaineiden sekoitettavuus. Vihreä, hyvä sekoittuminen; keltainen ja oranssi, sekoitettavuus pienillä määrillä (Tange et al. 2012, 4.)

Kuvasta 4 on huomattavissa esimerkiksi PC ja ABS-muovin hyvä sekoitettavuus. MBA Polymers on valmistanut PC/ABS-pellettejä SER:n silppurijäännöksestä (engl. electronics shredder residue, ESR), josta on ruiskuvalettu erilaisia tuotteita. Näitä tuotteita voidaan käyttää erilaisissa kohteissa kuten rakentamisessa, elektroniikassa, kotitalouksissa ja autoteollisuudessa. Silppurijäännöksestä valmistettaville tuotteille on kuitenkin tiettyjä rajoituksia. Tuotteen mekaaniset ominaisuudet ovat usein huonompia kuin neitseellisellä tuotteella, joten niiden käyttäminen on ongelmallista vaativimmissa käyttökohteissa. Kierrätetyn tuotteen ominaisuuksia voi kuitenkin jonkin verran parantaa lisäaineilla. Tuotteen väri on riippuvainen silppurijäännöksessä olevista väripigmenteistä. Jäännöstä on mahdollista erotella tummempiin ja vaaleampiin väreihin, mutta erottelulaitteisto tuottaa lisäkustannuksia. Pienien muutoksien tekeminen väriin onnistuu lisäämällä hiilimustaa tai titaanidioksidia. Täysin mustan värin aikaansaaminen on kuitenkin hyvin vaikeaa, jos titaanidioksidia on vähänkin seoksessa

mukana. Valkoisten tuotteiden valmistaminen on käytännössä mahdotonta silppurijäännöksestä. (Schwesig & Riise 2016, 4–5.)

Silppurijäännöksestä valmistetut tuotteet voivat sisältää jäännöksiä sulamattomista materiaaleista kuten puu ja kumi. Nämä partikkelit ovat kooltaan 100 mikrometriä tai pienempiä, mutta ne voivat vaikuttaa jonkin verran tuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäksi ne voivat aiheuttaa ulkonäöllisiä haittoja tuotteisiin. Tuotteet voivat sisältää myös pieniä määriä haitallisia aineita kierrätetyistä laitteista kuten raskasmetalleja ja palonestoaineita. Tämä johtuu muun muassa siitä, että osa kierrätettävistä laitteista on valmistettu ennen kuin näiden aineiden käyttöä on rajoitettu. Näiden aineiden olemassa takia MBA Polymers ei myy tuotteitaan leluihin, lääketieteellisiin tarkoituksiin tai tuotteisiin jotka ovat kosketuksissa elintarvikkeisiin. MBA Polymers kuitenkin huomauttaa tuotteidensa noudattavan RoHS-direktiivejä ja REACH-asetusta. (Schwesig & Riise 2016, 5.)

4.5 Kemiallinen kierrätys

Muovien kemiallisella kierrätyksellä (engl. feedstock recycling) tarkoitetaan muovipolymerien hajottamista niiden monomeeri-ainesosiin. Näitä monomeerejä voidaan käyttää uudestaan jalostamoissa tai petrokemiallisessa tuotannossa. Käytännöllisesti katsoen tuotejakauma on kuitenkin niin monitahoinen, että harvoin löytyy järkeviä kaupallisia ratkaisuja. Ainoastaan kun saadaan arvokkaita monomeereja hyvällä saannolla, ovat kaupalliset operaatiot harkittavissa. (Buekens & Yang 2014, 424.)

Kemiallisessa kierrätyksessä SER-muovit muutetaan polttoaineiksi, monomeereiksi tai muiksi kemikaaleiksi pyrolyysin avulla. Pyrolyysin aikana SER-muovien energiasisällöstä häviää noin 10 %. Käsittelyn aikana voi kuitenkin muodostua polybromattuja dioksiineja ja furaaneja. Sekalaisista raaka-aineista saatavat pyrolyysin tuotteet eivät kuitenkaan todennäköisesti käy kaupaksi, tuotteissa esiintyvien epäpuhtauksien takia. Pyrolyysin ohella on suoritettava myös dehalogenointi, sillä pyrolyysiöljyt sisältävät halogenoituja orgaanisia yhdisteitä. Dehalogenointi voidaan suorittaa ennen tai jälkeen pyrolyysin tai sen aikana. Pyrolyysin käyttöä heikentävät muun muassa raaka-aineiden monimuotoisuus sekä muovien sisältämät palonestoaineet ja katalyyttiset metallit. (Buekens & Yang 2014, 429.)

4.6 Energiahyödyntäminen

Energiahyödyntämisessä SER-muovien kemiallinen energia voidaan vapauttaa ja hyödyntää lämpönä ja sähköntuotannossa. Suurimpana ongelmana energiahyödyntämisessä on muovien sisältämät bromatut palonestoaineet. Palonestoaineet voivat pienentää liekin lämpötilaa, minkä takia palaminen on epätäydellisempää, jolloin voi muodostua polybromattuja/kloorattuja dioksiineja ja furaaneja (PBCDD/F -yhdisteitä). Tiettyjen bromattujen palonestoaineiden lämpöhajoamisessa on huomattu dioksiini- ja furaani-päästöjä. Kyseisiä dioksiineja ja furaaneja havaittiin suuria konsentraatioita simuloitaessa elektroniikkalaitteiden palamista. Kontrolloiduissa palamisolosuhteissa bromatut palonestoaineet voidaan kuitenkin tuhota tehokkaasti niin, ettei PBDD/F yhdisteitä juurikaan muodostu. Täydellinen tuhoaminen vaatii korkean lämpötilan (>850 °C) ja pitkän viipymän (>2 s). (Buekens & Yang 2014, 429–430.)

Maailmanlaajuisesti käytetyin energiantalteenottojärjestelmä jätteelle on kiinteän yhdyskuntajätteen polttolaitokset (engl. municipal solid waste incinerator, MSWI). Näissä laitoksissa poltetaan yhdyskuntajätettä suuressa mittakaavassa kuuman veden, höyryn tai sähkön tuottamiseksi. Laitoksissa poltettavan muovijätteen lämpöarvo on noin 33 MJ/kg, mikä on suurempi kuin hiilellä. PlasticsEurope on tehnyt useita tutkimuksia yhdyskuntajätteen ja SER-muovien yhteispoltosta. Tutkimuksessa käytettiin TAMARA-koelaitosta Saksassa, joka on suunniteltu mallintamaan suuren mittakaavan kaupallisia polttolaitoksia. Tutkimuksissa havaittiin, että palaminen ei häiriintynyt haitallisesti SER-muovien lisäyksestä. Mittauksissa ei myöskään havaittu bromattuja palonestoaineita ennen savukaasujen puhdistusta. Dioksiinit ja furaanit tuhoutuivat melkein kokonaan poltossa ja savukaasujen puhdistamisen jälkeen niiden pitoisuus oli alle 0,001 ng/m³, mikä on reilusti alle dioksiineille ja furaaneille säädetyn raja-arvon (0,1 ng/m³). Kokeilun aikana koelaitoksen läpi ajettiin suuria määriä SER-muovia, kun todellisuudessa näiden muovien osuus olisi huomattavasti vähemmän. Tulokset ovat hyvin lupaavia SER-muovien polton kannalta. (Fisher et al. 2005, 88–90.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

SE-laitteista saataville muoveille on olemassa energiahyödyntämisen ohella kierrätysvaihtoehtoja. SER-muovit voidaan kierrättää joko mekaanisesti tai kemiallisesti. Muovien kierrätyksessä tulee kuitenkin tiettyjä teknisiä ja taloudellisia ongelmia, minkä takia muovien loppukäsittelyssä suositaankin energiahyödyntämistä.

Ennen kierrättämistä muovit on esikäsiteltävä ja eroteltava. Muovin sekaan kuulumattomat aineet kuten puu, kumi, kivi ja lasi on erotettava muovijakeesta. Erottelu tapahtuu kuiva- tai märkämenetelmällä. Etenkin märkämenetelmässä ongelmana on suuri jätevesien määrä ja tilan tarve, jolloin se todennäköisesti vaatii oman lajittelukeskuksensa. Kuivamenetelmä vie vähemmän tilaa ja tuottaa vähemmän jätettä.

Kun muovijae on puhdistettu, seuraavana ongelmana on muovien erottelu toisistaan. Muovilaatujen määrä itsessään tekee erottelusta haastavaa ja jopa pienissä laitteissa voi olla kuutta eri muovia. Muovien erottelu on kuitenkin tärkeää kierrätyksen kannalta, sillä muovilaatujen sekoittuminen voi aiheuttaa ominaisuuksien heikkenemistä valmiissa tuotteessa. Suurin osa muoveista on keskenään yhteensopimattomia, mutta osa muoveista sekoittuu hyvin toisiinsa ja niitä usein seostetaan haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Kierrätetyn muovin ominaisuudet voivat myös parantua, kun niihin sekoitetaan muita muoveja. Esimerkiksi ABS-muovin sekoittaminen kierrätettyyn HIPS-muoviin parantaa joitain seoksen mekaanisia ominaisuuksia. Lisäksi kierrätysmuovien ominaisuuksien heikkenemistä voidaan vähentää sekoittamalla niiden joukkoon neutseellisiä raaka-aineita.

Bromatuilla palonestoaineilla käsitellyt muovit on poistettava muovijakeesta ennen muovin kierrätystä. Palonestoaineiden tunnistuslaitteet ovat kuitenkin usein kalliita ja vaativat kierrätysyrityksiltä suuria investointeja. Laitteet saattavat myös yliarvioida bromattujen palonestoaineiden määrään, jolloin kierrätettävissä olevia muoveja saattaa joutua hukkaan. Toisaalta nämä muovit voidaan käyttää energiana, jolloin muovi ei mene täysin hukkaan. Käsi-käyttöinen XRF-analysaattori sopii linjastoille, joissa muovia erotellaan manuaalisesti. Näin voidaan samaan aikaan erotella myös muovilaatuja, kun analysaattoriin on yhdistetty lähi-

infrapuna-analyysi (NIR). Manuaalisessa erottelussa voi kuitenkin esiintyä inhimillisiä virheitä, jolloin palonestoaineita sisältäviä muoveja saattaa joutua kierrätettävän muovin joukkoon. Toisaalta POP-asetuksessa PBDE-pitoisuusraja kierrätysmateriaalista valmistetuille tavaroille ja valmisteille on 0,1 % eli jonkin verran bromattuja palonestoaineita sallitaan kierrätysmuoveissa.

Bromatuilla palonestoaineilla käsitellyjä muoveja voidaan erotella jonkin verran myös laitekohtaisesti, sillä laitteet, jotka sisältävät eniten bromatuilla palonestoaineilla suojattua muoveja tunnetaan. Tällaisia laitteita ovat muun muassa tietokoneet, televisiot ja konttorikoneet. Erityisesti näiden laitteiden kotelot ovat palonestosuojattuja. Lisäksi tieto- ja teletekniset laitteet sisältävät paljon bromattuja palonestoaineita. Vastaavasti tunnetaan myös laiteluokkia, joissa harvemmin esiintyy bromattuja palonestoaineita. Tällaisia laitteita ovat isot ja valkoiset kodinkoneet. Muovien erottelu laitekohtaisesti ei välttämättä takaa tarkinta mahdollista muovien lajittelutulosta.

SER-muovien mekaaninen kierrättäminen on jollain tasolla mahdollista, kunhan bromatut palonestoaineet saadaan eroteltua muovista. Kierrätysmuovin heikomman laadun takia sen käyttökohteet on mietittävä tarkkaan, jotta muovin mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet ovat riittävät ja tuote siten palvelee käyttäjänsä. Kierrätysmuovituotteiden ulkonäkökään ei usein vastaa neitseellisestä muovista valmistettua tuotetta, joten myös tältä kannalta on mietittävä tuotteen käyttöä ja kaupallistettavuutta. Kierrätystuotteen väri vaihtelee usein harmaan eri sävyissä ja materiaalin sisältämät epäpuhtaudet aiheuttavat myös ulkonäöllisiä haittoja. Toki kierrätysmateriaaleista valmistettua tuotetta voidaan maalata ja pinnoittaa jonkin verran tai sen käyttökohteet voidaan suunnitella siten, että kierrätysmateriaalit eivät ole näkyvillä.

Tulevaisuudessa bromattujen palonestoaineiden käyttöä tullaan entisestään vähentämään, jolloin muovien kierrättäminen helpottuu. Lisäksi vanhat elektroniikkalaitteet, joiden valmistukseen on saanut käyttää nykyään kiellettyinä pidettyjä aineita, poistuvat vähitellen käytöstä. Näin tarve tunnistaa bromattuja palonestoaineita vähenee tulevaisuudessa. Lisäksi bromattuja palonestoaineita voidaan tulla korvaamaan vähemmän haitallisilla aineilla. Myös materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa palonestoaineiden tarpeeseen. Osa muoveista kuten

PC ovat luonnostaan paremmin kuumuutta kestäviä ja itsestään sammuvia eivätkä syty yhtä helposti kuin muut muovit. Toisaalta tämänkaltaiset muovit eivät kestä kierrätystä yhtä hyvin. Tuote- ja materiaalisuunnittelu vaikuttavat myös muovien määrään ja laatuun. Todennäköisesti materiaalienkäyttöä pyritään yhä vähentämään, jolloin SER-muovien määrä saattaa vähentyä. Jätehuollon ja lainsäädännön yhä kuitenkin kehittyessä suurempi osa maailman ihmisistä saadaan SER-lainsäädännön piiriin, jolloin yhä suurempi osa muoveista on mahdollista kierrättää.

SER-muovien kemiallinen kierrätys on myöskin ongelmallista, sillä näille tuotteille löytyy harvoin kaupallisia hyödyntämismahdollisuuksia. Kun muoveista valmistetaan polttoaineita pyrolyysin avulla, poistuvat kyseiset muovit materiaalikierrasta, joten tämä ei ole ensisijainen ratkaisu etsittäessä SER-muoveille kierrätysvaihtoehtoja. Pyrolyysin aikana muovien energiasisällöstä häviää n. 10 %, joten on todennäköisesti kannattavampaa hyödyntää muovit suoraan energiana riippuen hieman siitä mitä polttoainetta muovilla korvataan energiantuotannossa. SER-muovien energiakäyttö on tällä hetkellä helpoin loppukäsittelytapa, sillä se ei vaadi bromattujen palonestoaineiden poistamista vaan kyseiset yhdisteet tuhoutuvat polton aikana, jos olosuhteet ovat oikeat. Myös energiahyödyntämisen ongelmana on muovien poistuminen materiaalikierrasta.

Tässä työssä etsittiin SER:sta saataville muoveille kierrätysmahdollisuuksia. Jatkotutkimuksissa olisi syytä tarkastella mekaanista kierrätystä ja siitä saatavia tuotteita tarkemmin kuten esimerkiksi minkälaisia tuotteita on mahdollista valmistaa kyseisellä kierrätysmenetelmällä ja minkälaisia ominaisuuksia tuotteella on. Kierrätettävyyden parantamisen kannalta voitaisiin myös tarkastella mahdollisia vaihtoehtoisia palonestoaineita bromatuille palonestoaineille sekä materiaalivalintojen kuten eri muovien vaikutusta laitteiden palonesto-ominaisuuksiin. Lisäksi eri hyödyntämismenetelmien kustannuksia ja ympäristövaikutuksia olisi syytä vertailla.

6 YHTEENVETO

SER on EU:n nopeimmin kasvava jätevirta, jonka kasvuvauhti on 3–5 % vuodessa. Euroopan alueella mukaan lukien Venäjä SER:a muodostui 11,6 miljoonaa tonnia. Suomessa SER:a kerättiin yhteensä 62 544 tonnia, joista eniten kerättiin suuria kodinkoneita. SER:n materiaalikoostumuksesta n. 22 % on muoveja. Muoveista noin kolmasosa eli n. 6 % kaikesta SER:sta on palonestosuojattua muovia ja 16 % SER:n materiaaleista on suojaamatonta muovia. Yleisimmät käytetyt muovit ovat ABS, PP ja PS ja ne muodostavat yli 70 % kaikista kerätyistä SER-muoveista.

SE-laitteita koskee tuottajavastuu. Tuottajavastuu velvoittaa laitteiden valmistajaa, maahantuojaa ja omalla tuotemerkillä laitteita myyvää järjestämään tuotteilleen jätehuollon ja vastattava niistä aiheutuvista kustannuksista. SER-direktiivi pyrkii ennaltaehkäisemään SER:n syntymistä ja edistämään sen uudelleenkäyttöä. RoHS-direktiivillä, POP- ja REACH-asetuksella sekä Tukholman yleissopimuksella pyritään vähentämään vaarallisten aineiden ja etenkin bromattujen paloestoaineiden esiintymistä SE-laitteissa.

SE-laitteet koostuvat pääasiassa valtamuoveista ja teknisistä muoveista. Muovien ominaisuudet vaihtelevat suuresti käyttökohteen mukaan. Yhteistä muoveille oli mekaanisten ominaisuuksien erityisesti iskunkestävyyden heikkeneminen kierrätyksen aikana. Muoveja seostetaan usein toisten muovien kanssa haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Esimerkiksi ABS/PC on yleisesti käytetty muoviseos.

Bromatut palonestoaineet ovat yleisin SER-muoveissa käytetty palonestoaine. Muihin palonestoaineisiin verrattuna bromatut palonestoaineet ovat valmistuskustannuksiltaan alhaisemmat, eikä niitä tarvita niin suuria määriä verrattuna muihin palonestoaineisiin. Monet bromatuista palonestoaineista ovat ympäristölle ja terveydelle vaarallisia ja siksi niiden käyttöä onkin pyritty rajoittamaan. Ennen SER-muovien kierrätystä bromatut palonestoaineet on poistettava.

SER-muovien kierrätys vaatii eri muovien ja palonestoaineiden tunnistamista ja erottelua. Muoveja voidaan tunnistaa lähi-infrapuna-analyysillä (NIR). Bromattujen palonestoaineiden tunnistaminen voi tapahtua röntgenfluoresenssi (XRF) tai sliding spark (SS) -menetelmillä. XRF-analysaattori toimii myös käsikäyttöisenä, jolloin muovien erottelusta tulee manuaalisempaa. Palonestoaineita voidaan tunnistaa myös kaasu-kromatografi/massaspektrometrimenetelmällä ja laboratorioanalyysillä. Mutta nämä menetelmät ovat kuitenkin hitaita eivätkä sovi kierrätysyrityksien linjastoille.

SER-muovien hyötykäyttömahdollisuuksia on mekaaninen ja kemiallinen kierrätys sekä energiahyödyntäminen. Mekaanisessa kierrätyksessä SER-muovit käsitellään uusiksi muovituotteiksi. Kierrätetystä muovista valmistettujen tuotteiden ominaisuudet eivät kuitenkaan vastaa neitseellisistä muoveista valmistettua. Ominaisuuksien heikkenemistä aiheuttaa muovien epätäydellinen erottelu, sillä suurin osa muoveista on keskenään yhteensopimattomia. Kemiallisessa kierrätyksessä muovipolymeerit hajotetaan niiden monomeeri-ainesosiin. Näitä monomeerejä voidaan käyttää uudestaan jalostamoissa tai petrokemiallisessa tuotannossa ja niistä voidaan valmistaa muun muassa polttoaineita. Energiahyödyntämisessä SER-muovien kemiallinen energia voidaan vapauttaa ja hyödyntää lämpönä tai käyttää sähkön tuotantoon. Oikeissa poltto-olosuhteissa bromatut palonestoaineet ja syntyvät dioksiinit ja furaanit saadaan tuhottua melkein täydellisesti. SER-muoveja voidaan polttaa yhdessä yhdyskuntajätteen kanssa.

SER-muovien kierrätyksen haastavuuden takia suositaankin niiden energiahyödyntämistä, sillä silloin muoveja ei tarvitse erotella toisistaan eikä myöskään bromattuja palonestoaineita tarvitse erotella. Lisäksi muovien tunnistus- ja erottelulaitteistot vaatisivat kierrätysyrityksiltä suuria investointeja. Kierrätysmuoveista valmistettavien tuotteita käyttökohteita on mietittävä tarkkaan, sillä niiden ominaisuudet ja ulkonäkö ovat heikkomat kuin neitseellisistä materiaaleista valmistettujen tuotteiden. Tulevaisuudessa SER-muovien kierrätys tulee todennäköisesti yleistymään, sillä bromattuja palonestoaineita käyttöä rajoitetaan yhä enemmän. Myös vanhempien laitteiden poistuttua käytöstä haitallisten aineiden pitoisuudet pienenevät. Lisäksi tekniikan ja materiaalien kehittyessä palonestoaineiden tarve saattaa vähentyä tulevaisuudessa.

LÄHTEET

2006/1013/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 14.6.2006 jätteiden siirrosta. EYVL. N: o 190, 12.7.2006

2008/98/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 19.11.2008 jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta. EYVL N: o 312, 22.11.2008.

2011/65/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 8.8.2011 tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoituksesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. EUVL N: o 174, 1.7.2011.

2012/19/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 4.7.2010 sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta. EUVL N: o 197, 24.7.2012.

Aaltonen Laura-Kaisa. 2014. Teknisten muovien kierrätys. [diplomityö]. Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaalitekniikan koulutusohjelma. [viitattu: 22.2.2018]. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22106/Aaltonen.pdf?sequence=1>

Eurostat. 2015. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). [tietokanta]. European Commission. [viitattu: 9.2.2018]. Saatavissa: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>

Baldé C.P., Wang F., Kuehr R., Huisman J. 2015. The global e-waste – 2014. [verkkojulkaisu]. United Nations University, IAS – SCYCLE. [viitattu: 6.2.2018]. Saatavissa: <http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>

Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P. 2017. The Global E-waste Monitor – 2017. [verkkojulkaisu]. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). [viitattu: 8.3.2018]. Saatavissa: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20.pdf>

Baxter John, Wahlstrom Margareta, Zu Castell-Rüdenhausen Malin, Fråne Anna, Stare Malin, Løkke Søren, Pizzol Massimo. 2014. Plastic value chains, Case: WEEE (Waste Electric and electronic equipment) in the Nordic region. [verkkojulkaisu]. Nordic Council of Ministers. [viitattu: 20.2.2018]. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:721021/FULLTEXT01.pdf>

Brennan L. B., Isaac D. H., Arnold J. C. 2001. Recycling of Acrylonitrile–Butadiene–Styrene and dHigh-Impact Polystyrene from Waste Computer Equipment. [verkkojulkaisu]. Department of Materials Engineering, University of Wales Swansea, Singleton Park, Swansea, SA2 8PP, United Kingdom. [viitattu: 5.4.2018]. Saatavissa: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.cc.lut.fi/doi/epdf/10.1002/app.10833>

Buekens Alfons, Yang Jie. 2014. Recycling of WEEE plastics: a review. [verkkojulkaisu]. Zhejiang University, State Key Laboratory of Clean Energy Utilization. [viitattu: 5.2.2018]. Journal of Material Cycles and Waste Management. Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2Fs10163-014-0241-2.pdf>

da Costa H. M., Ramos V. D., Rocha M. C. G. 2004. Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion. [verkkojulkaisu]. Instituto Politécnico-IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro—UERJ. [viitattu: 6.4.2018]. Saatavissa: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0142941804000923/1-s2.0-S0142941804000923-main.pdf?_tid=3541bbdc-1d76-43b7-9f1a-5a7887404e52&ac-dnat=1523014056_463adc2c2dc1a99c6432bb7e5e083191

Eskelinen Hanna, Haavisto Teija, Salmenperä Hanna, Dahlbo Helena. 2016. Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet. [verkkojulkaisu]. Materiaalien arvovirrat, ARVI-tutkimusohjelma. [viitattu: 5.4.2018]. Saatavissa: <http://www.uusiouutiset.fi/ARVIMuovienKierratys.pdf>

European Commission DG ENV. 2011. Plastic waste in the environment, Revised final report. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 9.4.2018]. Saatavissa: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/plastics.pdf>

Fisher Michael M., Vehlow Jurgen, Mark Frank E., Yamawaki Takashi, Kingsbury Tony. 2005. Energy Recovery in the Sustainable Recycling of Plastics from End-of-Life Electrical and Electronic Products. [verkkojulkaisu]. IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. [viitattu: 7.4.2018]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1436999&tag=1>

Haig Sam, Morrish Liz, Morton Roger, Wilkinson Simon. 2012. Electrical product material composition. [verkkojulkaisu]. The Waste and Resources Action Programme, WRAP. [viitattu: 28.2.2018]. Saatavissa: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Electrical%20product%20material%20composition%20overview.pdf>

Ignatius Sonja-Maria, Myllymaa Tuuli, Dahlbo Helena. 2009. Sähkö- ja elektroniikkaromun käsittely Suomessa. [verkkoraportti]. Suomen ympäristökeskus. [viitattu: 12.2.2018]. Saatavissa: <http://eis.fi/wordpress/wp-content/uploads/2010/04/SER-kierr%C3%A4tys.pdf>

JL 17.6.2011/646. Jätelaki.

Järvinen Pasi. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo, WS Bookwell Oy. Muovifakta Oy. ISBN 978-952-92-3558-2

Kavander Kim Kristian. 2016. Kullan syanidivapaa liuotus piirikorttiromusta. [diplomityö]. Aalto-yliopisto, Kemia tekniikan korkeakoulu, Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma. [viitattu: 28.2.2018]. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/20940/master_Kavander_Kim_2016.pdf?sequence=1

Laki vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa 7.6.2013/387.

Li Ying, Li Jinhui, Wang Lihui. 2013. Recycling of PBDEs containing plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. [verkkoraportti]. 2013 IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering. [viitattu: 1.3.2018]. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/34c0/fbc7727c23efe611812756bad7490bec121f.pdf>

Muoviteollisuus ry. 2018. Muovien luokitus. [verkkosivu]. [viitattu]. Saatavissa: http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/

Myllymaa Tuuli, Moliis Katja, Häkkinen Eevaleena, Seppälä Timo. 2015. Pysyvien orgaanisten yhdisteiden (POP) esiintyvyys, tunnistaminen ja erottaminen muovijätteistä. [verkkoraportti]. Ympäristöministeriö. [viitattu: 13.3.2018]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/157416/YMra_25_2015.pdf?sequence=1

Nykänen Sanna. 2018a. Polystyreeni (PS). [verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu: 5.4.2018]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf

Nykänen Sanna. 2018b. Polystyreeni (PS). [verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu: 13.5.2018]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PC_FI.pdf

Pérez J. M., Vilas J. L., Laza J. M., Arnáiz S., Mijangos F., Bilbao E., Rodríguez M., León L. M. 2010. Effect of recycling on the rheological, mechanical and optical properties of polycarbonate. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 7.4.2018]. Saatavissa: https://ac.els-cdn.com/S0924013609004282/1-s2.0-S0924013609004282-main.pdf?_tid=e9f71ad1-bf3e-44ac-8e1a-fd0ae75dab49&acdnat=1523087263_6ef64ab948ab516987d21cfcabb611f1

Retkin Risto. 2012. Bromattujen palonestoaineiden rajoitusten vaikutus jätteiden hyödyntämiseen ja käsittelyyn. [verkkojulkaisu]. Suomen ympäristökeskus. [viitattu: 23.2.2018]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38714/SY29_2012_Bromattujen_palonestoaineiden_rajoitusten_vaikutus__jatteiden_hyodyntamiseen_ja_kasittelyyn.pdf?sequence=1

Schwesig Arthur, Riise Brian. 2016. PC/ABS Recovered from Shredded Waste Electrical and Electronics Equipment. [verkkojulkaisu]. MBA Polymers. [viitattu: 7.4.2018]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7829840&tag=1>

Spasojevic Dijana, Swalens Eric. 2016. Study on harmonisation of the format for registration and reporting of producers of Electrical and Electronic Equipment (EEE) to the national register and on the frequency of reporting, Final report. [verkkojulkaisu]. European Commission. [viitattu: 5.2.2018]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20Registration%20and%20Reporting_Final%20report.pdf

Tange L., van Houwelingen J.A., Hofland W., Salèmis P. 2012. Recycling of Plastics with Flame Retardants of Electronic Waste, a Technical and Environmental Challenge for a Sustainable Solution. [verkkojulkaisu]. IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. [viitattu: 31.3.2018]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6360470&tag=1>

Tukes 2016. Lisätietoa RoHS-direktiivistä. [verkkosivu]. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Päivitetty: 24.2.2016. [viitattu: 13.2.2018]. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/RoHS---Vaarallisten-aineiden-kayton-rajoittaminen/RoHS-direktiivi-vaarallisten-aineiden-kayton-rajoittamisesta-sahko--ja-elektroniikkalaitteissa-/>

Vna. 3.7.2014/519. Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta.

Ympäristöministeriö. 2013. Palonsuoja-aine HBCD kielletään maailmanlaajuisesti. [verkkosivu]. Valtioneuvosto. Päivitetty: 10.5.2013. [viitattu: 23.2.2018]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Palonsuojaaine_HBCD_kielletaan_maailmanlaajuisesti