

**Selvitys kierrätyspolttoainejakeiden ominaisuuksista ja soveltuvuudesta kaasutus-CHP-  
laitoksen polttoaineeksi**

**Jukka Korri**



Pro gradu -tutkielma  
Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos  
14.11.2011  
Ohjaajat: Jukka Konttinen  
Johanna Haverinen

## **ESIPUHE**

Tässä työssä olen vertaillut eri kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksia, lähinnä alkuainepitoisuuksia sekä niiden sopivuutta Lahti Energian uuden kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineeksi. Työn on tilannut Lahti Energia (LE) ja sen ohjaajina ovat toimineet energia-analyytikko Johanna Haverinen (LE) sekä professori Jukka Konttinen (Jyväskylän yliopisto). Ohjaajien lisäksi haluan kiittää kaikkia työn valmistumista edistäneitä henkilöitä, mm. tutkija Pasi Vainikkaa (VTT).

Jyväskylässä 20.11.2011

Jukka Korri

## KIERRÄTYSPOLTTOAINEISIIN LIITTYVIÄ TERMEJÄ

Energiajäte/-jäte	Yrityksistä tai kotitalouksista erilliskerätty, syntypaikalla lajiteltu polttokelpoinen materiaali/jäte.
Jätepuu	Kierrätyspolttoaineisiin kuuluvalla jätepuulla tarkoitetaan rakennus-, purku- ja korjaustoiminnan jätepuuta tai puunjalostusteollisuuden jätepuuta, joka voi sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita. Paineekyllästetty puu ei kuulu tähän jakeeseen, vaan on ongelmajätettä.
Kierrätyspolttoaine	Kierrätyspolttoaine on yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettu polttoaine.
Kuivajäte/-jäte	Kuivajäte/-jäte on jäljelle jäävä osa yhdyskuntajätteestä, josta on syntypaikkalajiteltu erilleen biojäte, ongelmajäte ja muu kierrätyskelpoinen jäte.
MSW	<b>Municipal Solid Waste</b> ; kiinteä yhdyskuntajäte.
RDF	<b>Refuse Derived Fuel</b> ; Lajittelemattomasta yhdyskuntajätteestä mekaanisella lajittelulla valmistettu polttoaine.
REF	<b>Recovered tai Recycled Fuel</b> ; kierrätyspolttoaine.
SRF	<b>Solid Recovered Fuel</b> ; kierrätyspolttoaine.
WEEE	<b>Waste Electrical and Electronic Equipment</b> ; elektroniikkajäte. [1, 2, 3, 4]

Korri, Jukka. Selvitys kierrätyspolttoainejakeiden ominaisuuksista ja soveltuvuudesta kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineeksi. Pro gradu -tutkielma. Uusiutuvan energian maisteriohjelma, Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto. 2011.

## TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli selvittää kirjallisuudesta eri kierrätyspolttoainejakeiden kemialliset koostumukset ja jakeiden sopivuus Lahti Energian (LE) uuden kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineeksi. Tarkasteltaviksi jakeiksi valikoituivat aiemman kokemuksen perusteella tärkeiksi osoittautuneet kaupan ja teollisuuden jäte, rakennus- ja puujäte, kotitalousjäte sekä mahdollisena tulevaisuuden polttoaineena elektroniikkajäte. Koostumusselvitykset on suoritettu alkuainetasolla.

Jakeiden alkuainepitoisuuksia verrattaessa, havaittiin niiden välillä selviä eroja. Matalimmat haitta-ainepitoisuudet ja suppein vaihtelu oli rakennus- ja puujätteellä. Heikkolaatuisinta polttoainetta muun muassa useiden raskasmetallien korkeiden arvojen takia oli elektroniikkajäte. Väliin sijoittuivat kaupan ja teollisuuden jäte sekä kotitalousjäte, joiden keskinäinen ero alkuainepitoisuuksissa ei ollut suuri.

Polttoainekomponenteista erityistarkasteluun otettiin muovit. Ongelmia jätteenpolton kannalta aiheuttavat PVC:n sisältämä kloori sekä muovien yleisesti sisältämät palonestoaineet, lähinnä bromiyhdisteet. Suurin ongelma jätteenpolton kannalta on, että bromi ja kloori muodostavat kattilaa korrodoivia suoloja. Tietyissä olosuhteissa kloori voi myös muodostaa viime aikoina julkisuutta saaneita dioksiineja ja furaaneja. Muovien suurin käyttäjä, pakkausteollisuus, käyttää PVC:tä melko pienessä osassa tuotteistaan. Toisessa kierrätyspolttoaineiden kannalta merkittävässä lähteessä, rakennusteollisuudessa sen sijaan PVC:n käytöllä on muihin muoveihin verrattuna suuri merkitys. Myös bromia sisältäviä palonestoaineita käytetään yleisesti rakennusmateriaaleiksi tarkoitetuissa muoveissa, kuten eristeissä. Toinen bromattujen palonestoaineiden merkittävä käyttökohde on elektroniikan kotelointi sekä muut osat. Näissä pitoisuudet voivat olla erittäin korkeita. Muovien osalta selvisi myös, että väri- ja lisäaineina niissä käytetään erittäin monia eri alkuaineita, myös raskasmetalleja. Määrä ja laatu riippuvat käyttökohteesta.

Korri, Jukka. A Survey on Properties of Recycled Fuel Fractions and their suitability as fuel for a CHP-gasifier. Master's Thesis. Renewable Energy Program, Department of Physics, University of Jyväskylä. 2011.

## **ABSTRACT**

Goal of this report was to determine chemical compositions of certain recovered fuel fractions and their suitability as fuel in Lahti Energia's (LE) new CHP-gasifier. Information was gathered from literature. Studied fuel fractions were chosen based on prior knowledge. They were commercial and industrial waste, construction and wood waste, household waste and as a possible future fuel waste electrical and electronic equipment (WEEE).

Clear differences in chemical compositions between different fractions were observed. In general construction and wood waste had the lowest levels of harmful elements. The poorest fuel with highest concentrations of many heavy metals and other harmful elements was waste electrical and electronic equipment. In the middle were commercial and industrial waste and household waste whose elemental concentrations didn't differ a lot.

In the survey special attention was paid on plastics. Chloride in PVC and flame retardants (mainly brominated substances) used in many plastics cause problems in plastics incineration. Corrosive salts formed by chloride and bromine in the boiler can cause some serious damage for the equipment. In the boiler chloride can also form dioxins and furans. In the packaging industry PVC does not have a very big role but in construction industry it is used a lot. Also materials with brominated flame retardants (BFRs) are important for construction industry. They are used for example in insulation materials. Another important use for BFRs are electrical equipment housings and components used in electrical equipment. Concentrations in these applications can be very high. Also other additives in plastics were shortly reviewed. It became evident that a large variety of elements are used as additives. Quantities and qualities depend on the use.

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ .....	4
ABSTRACT.....	5
1 JOHDANTO .....	10
1.1 Terminen konversio .....	10
1.1.1 Kiinteän polttoaineen palaminen .....	10
Yleistä .....	10
Syttyminen .....	10
Pyrolyysi .....	11
Jäännöshiilen palaminen ja kaasutus.....	11
2 JÄTTEENPOLTTO .....	14
2.1 Yleistä .....	14
2.2 Kierrätyspolttoaineet .....	14
2.2.1 Yleistä .....	14
2.2.2 SFS 5875 - standardi — Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi .....	16
2.2.3 Kierrätyspuu.....	16
2.2.4 Muovit ja kuitutuotteet.....	17
2.3 Lainsäädäntö .....	18
2.3.1 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi.....	18
2.3.2 Asetus jätteenpolttamisesta.....	18
2.4 Polttotekniikat .....	19
2.4.1 Arinapoltto .....	19
Yleistä .....	19
Toiminta.....	20
2.4.2 Leijupoltto.....	21
Yleistä .....	21
Kupliva leijupoltto .....	22
Kiertoleijupoltto.....	23
2.4.3 Rumpupoltto.....	23
2.5 Kaasutus-CHP.....	24
2.5.1 Yleistä .....	24
2.5.2 Laitosprojektit .....	25
Yleistä .....	25

Skive.....	25
Lahti .....	26
Güssing.....	27
2.6 Jätteenpolton päästöt ja niiden puhdistus.....	28
2.6.1 Yleistä .....	28
2.6.2 Palamisen päästöt.....	28
2.6.3 Savukaasujen puhdistus tavanomaisessa polttolaitoksessa.....	29
2.6.4 Kaasutuskasun puhdistus.....	30
Tuotekaasu .....	30
Kylmäpuhdistus .....	31
Kuumapuhdistus.....	32
Alkaliyhdisteet, raskasmetallit ja muut epäorgaaniset yhdisteet .....	33
Tervat ja typpiyhdisteet.....	33
Rikki.....	34
Kloori .....	34
2.7 Tuhkat .....	36
Pohjatuuhka.....	37
Lentotuuhka .....	38
Polton ja kaasutuksen tuhkien eroja jätepolttoaineilla.....	39
2.8 Likaantuminen ja korroosio .....	40
2.9 Tutkimuksen tavoite.....	41
3 AINEISTO JA MENETELMÄT .....	42
4 KIRJALLISUUSKATSAUS .....	43
4.1 Muovit.....	43
4.1.1 Yleistä .....	43
4.1.2 Palonestoaineet muoveissa.....	43
Yleistä .....	43
Halogenoidut palonestoaineet .....	44
Metallihydraatteja sisältävät palonestoaineet.....	44
Fosforia sisältävät palonestoaineet.....	45
Muita palonestoaineita .....	45
Tehostimet.....	45
4.1.3 Stabilaattorit .....	46
4.2 Kaupan ja teollisuuden erilliskerätty jäte.....	46

4.2.1 Yleistä .....	46
4.2.2 Alkuainepitoisuudet .....	47
4.3 Rakennusjätteestä ja jätetuusta valmistetut kierrätyspolttoaineet .....	50
4.3.1 Yleistä .....	50
4.3.2 Alkuainepitoisuudet .....	50
Rakennusjäte .....	50
Puujäte.....	50
Maalit .....	51
4.4 Kotitalousjäte .....	54
4.4.1 Yleistä .....	54
4.4.2 Erillislajiteltu energiajäte .....	54
4.4.3 Alkuainepitoisuudet .....	55
Kotitalousjätteen yksittäisten komponentit ja materiaalit.....	55
Kotitalousjätteestä valmistettu kierrätyspolttoaine .....	57
4.5 Elektroniikkajäte — waste electrical and electronic equipment (WEEE) .....	60
4.5.1 Yleistä .....	60
4.5.2 Bromia sisältävät palonestoaineet elektroniikassa.....	61
4.5.3 Alkuainepitoisuudet .....	62
4.6 Tulevaisuus .....	66
Elektroniikkajäte .....	66
Muut jakeet .....	66
4.7 Kierrätyspolttoaineet — alkuainelähteet.....	67
4.7.1 Kirjallisuudessa esitettyjä kierrätyspolttoaineisiin liittyviä alkuainelähteitä.....	67
4.7.2 Kaikki kirjallisuudessa esitetyt jätetehjaiset alkuainelähteet.....	70
5 POLTTOAINEANALYYSIT .....	73
5.1 Polttoainejakeiden keskinäinen vertailu.....	73
5.1.1 Yleistä .....	73
5.1.2 Lämpöarvo ja kosteus .....	73
5.1.3 Tuhka ja tuhkaa muodostavat alkuaineet .....	74
5.1.4 Tärkeimmät korroosiota aiheuttavat alkuaineet.....	76
5.1.5 Raskasmetallit ja muut myrkylliset metallit.....	76
5.1.6 Muut alkuaineet.....	79
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	80
LÄHTEET.....	82





# 1 JOHDANTO

## 1.1 Terminen konversio

### 1.1.1 Kiinteän polttoaineen palaminen

#### Yleistä

Pysyäkseen yllä palaminen vaatii kolme tekijää: polttoaineen, riittävä lämpötilan ja happea. Jos joku tekijöistä puuttuu, palamista ei tapahdu. Kiinteän aineen palaminen jaetaan kolmeen eri vaiheeseen. Nämä ovat järjestyksessä kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen tai kaasuuntuminen. Teoreettisesti prosessit ovat peräkkäisiä, mutta suuremmissa kappaleissa ne tapahtuvat myös samanaikaisesti. Esimerkiksi puukappaleen pinta voi palaa, vaikka keskiosa on vielä märkä. [5, 6]

Kiinteän polttoaineen palamisnopeuteen vaikuttavat sen kemialliset ominaisuudet (lämpöarvo, reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö), fysikaaliset ominaisuudet (lämmönjohtavuus, ominaislämpö) ja rakenteelliset ominaisuudet (tiheys, huokoisuus, partikkelikoko). Palamiseen vaikuttavat lisäksi seuraavat osaprosessit: lämmön- ja aineensiirto sekä kemiallinen kinetiikka. Kemiallisella kinetiikalla tarkoitetaan yleisesti reaktionopeuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten olosuhteita, reaktiomekanismeja ja reaktiivisuutta [7]. Mainitut osaprosessit eivät aina etene samaa vauhtia, vaan toisinaan joku niistä on oleellisesti hitaampi kuin muut. Tällöin se voi olla koko palamisprosessia rajoittava tekijä. [6]

Ennen syttymistä tai palamista kappaleen sisältämän kosteuden on alennuttava riittävälle tasolle. Kuivumisen mahdollistava haihtuminen puolestaan alkaa, kun hiukkasen lämpötila on riittävän korkea [6]. Esimerkiksi puun polttoprosessia voidaan pitää yllä, vaikka se sisältäisi painostaan jopa 60 % vettä. Tätä kosteampaa puuta käytettäessä polttoprosessi ei pysy ”käynnissä”, sillä höyrystymisen vaatima energia on niin suuri, että palamisprosessin lämpötila jää liian alhaiseksi [5].

#### Syttyminen

Kiinteän aineen syttyminen tapahtuu, kun sitä ympäröivän ilman lämpötila nousee aineen syttymislämpötilaan. Hiukkanen tai siitä haihtunut pyrolyysikaasu voi syttyä myös apuenergian, eli sen läheisyydessä vaikuttavan liekin tai muun lämmönlähteen avulla. Polttoaineet, joilla haihtuvien aineiden määrä on suuri — kuten biopolttoaineilla [8] — syttyvät yleensä verraten matalassa lämpötilassa. [6]

Kiinteän aineen syttyminen voi tapahtua joko homogeenisesti tai heterogeenisesti. Heterogeenisessa syttymisessä itse hiukkanen syttyy palamaan. Homogeenisessa syttymisessä puolestaan hiukkasesta haihtuvat pyrolyysituotteet syttyvät palamaan hiukkasen ulkopuolella. Heterogeenisen syttymisen jälkeen liekki tosin saattaa voimistuneen pyrolyysin takia irrota hiukkasen pinnasta. Tällöin homogeenisesta syttymisestä aiheutunut liekki sytyttää pyrolyysituotteet palamaan. Homogeenisen syttymisen todennäköisyys on sitä suurempi, mitä suuremmasta hiukkasesta on kyse. [6]

### **Pyrolyysi**

Pyrolyysi tarkoittaa kiinteän aineen hajoamista ulkoisen lämmön vaikutuksesta kaasuksi, nesteeksi ja kiinteäksi aineeksi [9]. Syntyvät hajoamistuotteet ovat lähinnä tervoja, hiiltä ja kaasuja [5, 6]. Pyrolyysin aiheuttaa kappaleeseen tuotu lämpö, joten sitä tapahtuu myös hapettomissa oloissa. Prosessissa polttoaineesta vapautuu hiilivetyjä ja sen molekyylirakeet rikkoutuvat [5, 6, 10]. Pienten hiukkasten kohdalla pyrolyysinopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka. Suurilla partikkeleilla rajoittava tekijä puolestaan on joko lämmön siirtyminen partikkeliin ympäröivästä aineesta tai aineen siirtyminen ulos partikkelista [6].

### **Jäännöshiilen palaminen ja kaasutus**

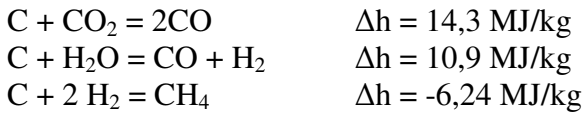
Polttoaineesta jäljelle jäävää osuutta kutsutaan jäännöshiileksi. Lopputuotteiden määrä ja laatu riippuu paitsi polttoaineesta, myös ainakin loppulämpötilasta, kuumennusnopeudesta, hiukkasen koosta, ympäröivän armosfäärin paineesta sekä reaktioajasta [5, 6]. Jäännöshiilen palaminen ja kaasutus johtuvat kaasumolekyylien diffuusiosta polttoaineen pintaan ja sisäosiin, missä ne reagoivat jäännöshiilen kanssa heterogeenisesti. Eksotermisiä, eli lämpöä luovuttavia reaktioita kutsutaan yleisesti palamisreaktioiksi. Endotermisiä, eli lämpöä sitovia reaktioita puolestaan kutsutaan kaasutusreaktioiksi [6]. Toisaalta, myös hapen reaktioita hiilen kanssa saatetaan kutsua yleisesti kaasutusreaktioiksi [5, 6]. Palamisreaktioissa atmosfäärinä on yleensä ilma, savukaasu tai niiden seos. Kaasutuksessa atmosfääri on kaasutuskaasujen ja -tuotteiden seos [6]. Kaasuttavana aineena voidaan käyttää myös hapen ja vesihöyryn seosta, joka johdetaan leijutuskaasuksi reaktorin alaosaan [11].

Kiinteän aineen tärkeimmät reaktiot ovat:

Palamisreaktiot



Kaasutusreaktiot



Reaktioissa  $\Delta h$  viittaa reaktioentalpiaan hiilen massaa kohti 298,15 K (1 bar) olosuhteissa. Negatiivinen entalpia viittaa eksotermiseen reaktioon. [6]

Tärkein ero poltto- ja kaasutusprosessien välillä on se, että tavanomainen poltto suoritetaan reagoivan kaasun (hapen) ylimäärässä, kun taas kaasutusreaktiot suoritetaan kaasun alimäärässä [12, 13]. Kaasutus tapahtuu siis alistoikiometrisesti. Reagoivan kaasun vähydestä johtuen polttoaine ei reagoi loppuun, vaan jää edelleen suurelta osin palaviksi kaasuiksi. Reaktioissa eniten syntyviä kaasuja ovat häkä, vety, metaani, hiilidioksidi [6, 14, 13]. Kaasussa energia esiintyy kolmessa muodossa: kaasuna, lämpönä ja hiilipölynä [15]. Taulukossa 1 on esitelty eri polttoaineista tuotettujen kaasujen koostumuksia ja lämpöarvoja.

**Taulukko 1.** Esimerkkejä puu- ja hiilikaasun sekä jätteestä/biomassasta tuotetun kaasun koostumuksesta ja lämpöarvosta.

Komponentti	Puu [12]	Hiili [12]	RDF [16]	REF/biomassa [17]
	%:a tilavuudesta	%:a tilavuudesta	%:a tilavuudesta	%:a tilavuudesta
CO	17 – 22	28 – 32	8,79	9,6
CO <sub>2</sub>	9 – 15	1 – 3	15,65	12,3
H <sub>2</sub>	12 – 20	4 – 10	8,61	6,7
CH <sub>4</sub>	2 – 3	0 – 2	6,51	3,3
N <sub>2</sub>	50 – 54	55 – 65	45,83 (N <sub>2</sub> + Ar)	jäännös
LHV (MJ/m <sup>3</sup> )	5,0 – 5,9	4,5 – 5,6	7,53	2,48

Palamisen ja kaasutuksen nopeuteen vaikuttavat useat tekijät, joista yksi oleellisimmista on lämpötila. Matalassa lämpötilassa kemiallinen kinetiikka rajoittaa palamisreaktiota. Hiukkasen pinnalla tapahtuvat kemialliset reaktiot kuitenkin nopeutuvat lämpötilan nousun myötä, mistä johtuu, että korkeassa lämpötilassa palamista rajoittaa ensisijaisesti diffuusio [6, 18].

Teoreettisesti tarkasteltuna palaminen tapahtuu seuraavissa tiloissa:

Matala lämpötila (I)	Kinetiikka rajoittaa palamista, reaktiot tasaisesti kaikkialla kappaleessa, koska kaasun pitoisuus kappaleessa tasainen → hiukkasen tiheys pienenee
Keskilämpötila (II)	Kinetiikka ja huokosdiffuusio rajoittavat palamista → tiheys ja halkaisija pienenevät
Korkea lämpötila (III)	Kaasun diffuusio hiukkasen pintaan rajoittaa palamista, reaktiot tapahtuvat heti kappaleen pinnassa → hiukkasen halkaisija pienenee [6, 10]

Kaasutuksessa heterogeeniset reaktiot ovat hitaita, mistä johtuen kaasutus tapahtuu usein vyöhykkeessä I ja II. Nopeampien heterogeenisten reaktioiden takia palaminen tapahtuu usein vyöhykkeessä III. [6]

Pienten hiukkasten kohdalla palamisnopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka. Hiukkaskoon suurentuessa kaasun diffuusio hiukkasen pintaan hidastuu reaktionopeuteen verrattuna. Siksi suuremmilla hiukkasilla palamista rajoittaa kaasun diffuusio rajakerrosten läpi hiukkasen pinnalle. Tällöin palamisnopeus on kääntäen verrannollinen polttoainehiukkasen kokoon nähden. Nopean lämmön- ja aineensiirron ansiosta pienten hiukkasten pyrolyysi, palaminen ja kaasuuntuminen tapahtuvat nopeasti verrattuna suurempiin hiukkasiin. [6, 18]

Polttoprosessin aikana hiukkasten kokoon vaikuttaa niiden hajoaminen ja jauhautuminen pienempiin osiin. Hajoamista tapahtuu useista eri syistä, kuten sisäisistä jännitteistä ja paineesta. Pyrolyysin yhteydessä tapahtuvaa hajoamista kutsutaan primääriseksi hajoamiseksi, joka yleensä johtuu partikkelin sisälle muodostuvasta paineesta. Polttoainepartikkeli hajoaa sitä todennäköisemmin mitä suurempi se on, ja mitä kuumempi on sitä ympäröivä lämpötila. Sekundaarinen hajoaminen puolestaan johtuu ulkoisesta mekaanisesta rasituksesta, kuten törmäilystä toisiin polttoainepartikkeleihin tai petimateriaaliin. Palaminen myös haurastuttaa partikkelin pintakerroksia, mikä edesauttaa sen hajoamista. Hajoamisen merkitys on suuri erityisesti leijukerrosoltossa. [6]

## **2 JÄTTEENPOLTTO**

### **2.1 Yleistä**

Jätteenpolto on jo pitkään käytössä ollut keino hankkiutua eroon jätteistä. Alun perin poltossa tarkoituksena oli nimenomaan jätteiden hävitys ja hygienian parantaminen, ei niinkään energiantuotanto. Jäte-energian alkuvaiheet sijoittuvat 1880-luvulle. Aikanaan savukaasuihin ei kiinnitetty huomiota, eikä puhdistusta välttämättä ollut lainkaan. Jätteenpolto onkin ollut useaan kertaan vastatulessa, sen aiheuttamien negatiivisten ympäristövaikutusten takia [19, 20]. Viimeisin epäsuosion aika koitti 1980-luvun alussa [19], jolloin muun muassa Helsingin Kyläsaarella vuodesta 1961 asti toiminut jätteenpolttolaitos suljettiin [21]. Jätteenpolton huonosta maineesta huolimatta Turussa on edelleen käytössä vuodesta 1975 toiminnassa ollut Orikedon jätteenpolttolaitos [22]. Tekniikan kehittymisen myötä jätteenpolton maine on parantunut, ja myös Suomessa on valmistunut tai valmisteilla useita laitoshankkeita [23]. Polttoainetta uusille laitoksille on vielä runsaasti tarjolla. Tällä hetkellä EU:ssa tuotetaan vuosittain 270 Mt yhdyskuntajätettä, josta yhä puolet päättyy kaatopaikalle [24].

Jätteenpoltoa voidaan harjoittaa paitsi laitoksissa, jotka polttavat yksinomaan jätemateriaalia, myös rinnakkaispolttoaineena muiden polttoaineiden, kuten turpeen, puun tai kivihiilen kanssa. Esimerkiksi leijupetikattiloissa tyypillisesti käytetyt rinnakkaispolttoaineet ovat purkupuu, pakkausjätteet ja erikseen kerätystä, polttoon sopivasta materiaalista valmistetut kierrätyspolttoaineet (luokat REF I ja II). [25]

### **2.2 Kierrätyspolttoaineet**

#### **2.2.1 Yleistä**

Jäteperäisten polttoaineiden käyttö on vakiinnuttanut asemansa suomalaisessa energiantuotannossa viimeisen runsaan kymmenen vuoden aikana. Samalla aikavälillä kierrätyspolttoaineiden valmistus on muuttunut teolliseksi toiminnaksi ja levinnyt liiketoimintana koko Suomeen [26]. Vuonna 2000 voimaan astunut EU:n jätteenpolto direktiivi ja sen pohjalta laadittu jätteenpoltoasetus ovat muokanneet Suomen jätelainsäädäntöä voimakkaasti. Asetus tiukensi jätteitä tai kierrätyspolttoaineita käyttävien polttolaitosten savukaasupäästöjen raja-arvoja ja asetti 28.12.2005 alkaen pakollisiksi jatkuvatoimiset päästökomponenttimittaukset kaikkiin laitoksiin, joissa jätettä

käytetään polttoaineena. Kierrätyspolttoaineiden pienkäyttö ja rinnakkaispoltto pienellä osuudella pääpolttoaineen ohella väheni suurimpien tuotantoyksikkökohtaisten mittauskustannusten takia [26, 1, 27, 28].

Kysynnän heikkenemisen myötä myös hinta romahti alan toimijoiden mukaan kirjaimellisesti yhdessä yössä. Paikoin hinta kääntyi jopa negatiiviseksi, ja osa kierrätyspolttoaineiden valmistajista joutui kuljettamaan valmista polttoainetta kaatopaikalle [29]. Kysynnän lasku on myös havaittavissa taulukossa 2 esitetyissä Tilastokeskuksen ilmoittamissa jätepohjaisten polttoaineiden käyttöluvuissa. Kulutus kääntyi kuitenkin jälleen kasvuun ja oli jo vuonna 2007 yli vuoden 2005 tason [30, 31]. Tilastokeskuksen käyttämä luokitus kierrätyspolttoaineille on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 2.** Eri jätepohjaisten polttoaineiden käyttöä Suomessa 2000-luvulla [30].

Vuosi	Kierrätys- ja muut sekapolttaineet <sup>1)</sup>	Purkupuuhun yms. <sup>2)</sup>	Muut jätepolttoaineet <sup>3)</sup>	Kierrätyspuu <sup>4)</sup>	Kierrätyspolttoaineet yms. <sup>5)</sup>
	TJ	TJ	TJ	TJ	1 000 t
2000	2 775	512	1 785	604	7 118
2001	3 497	793	2 388	903	8 621
2002	3 483	634	2 779	1 855	9 208
2003	4 630	654	2 765	2 688	10 824
2004	5 240	975	2 856	2 340	12 203
2005	5 136	1 733	2 384	2 335	13 066
2006	4 460	1 525	2 279	2 759	12 096
2007	5 354	1 827	2 087	2 132	13 522
2008	7 179	1 607	2 136	4 873	15 639
2009	8 577	1 185	2 107	2 849	16 898

<sup>1)</sup> Kierrätyspolttoaineet ovat syntypaikkalajitellusta yhdyskuntajätteestä tai siihen rinnastettavasta kauppojen ja teollisuuden jätteestä valmistettua polttoainetta. Kierrätyspolttoaineen biohajoavaksi osuudeksi lasketaan 60 prosenttia. Muut sekapolttaineet ovat erilaisia tuotannon jäte- tai sivutuotteita, jotka sisältävät sekä fossiilista (60%) että biohajoavaa (40 %) hiiltä.

<sup>2)</sup> Purkupuuhun sisältyvät käytöstä poistetut ratapölkyt sekä rakennus- ja purkutoiminnan puujätteet, joihin sisältyy epäpuhtauksia, kuten kyllästysaineita, raskasmetalleja tms. Purkupuun biohajoavaksi osuudeksi lasketaan 90 prosenttia.

<sup>3)</sup> Muihin jätepolttoaineisiin kuuluvat mm. muovi-, kumi- ja ongelmajätteet.

<sup>4)</sup> Kierrätyspuu on puhdasta puuta kuten mm. uudisrakentamisen jätetä ja kuormalavat

<sup>5)</sup> Sisältää kierrätys- ja jätepolttoaineet sekä polttoaineena käytetyn vedyn sekä biokaasun, aurinkoenergian ja muun bioenergian.

### Taulukko 3. Kierrätyspolttoaineet Tilastokeskuksen luokittelussa [32].

Jätejae
Biomassa
315 Kierrätyspuu (puhdas puutähde tai käytöstä poistettu puu)
Muut bio- tai sekapolttoaineet
323 Sekapolttoaineet (sisältävät sekä fossiilista että uusiutuvaa)
3231 Kierrätyspolttoaineet (REF, RDF, energiajäte tai kuivajäte)
3232 Purkupuuta (muovipinnoitteita tai muita epäpuhtauksia)
Muut energialähteet
491 Muut polttoaineena käytettävät sivu- ja jätetuotteet
4911 Muovijätteet
4912 Kumijätteet

#### 2.2.2 SFS 5875 - standardi — Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi

SFS 5875 -standardissa määritetään tarkkaan soveltamisala, kierrätyspolttoaineisiin liittyvät käsitteet sekä kierrätyspolttoaineiden ja niiden raaka-aineiden kuljetukseen, valmistukseen ja käyttöön liittyvät toimintamallit. Lisäksi esitetään laatuluokitus (taulukko 4), näytteenotokäytännöt ja analyysimenetelmät [2].

#### Taulukko 4. SFS 5875 -standardin mukainen kierrätyspolttoaineiden laatuluokitus [2].

Kohta	Ominaisuus	Yksikkö	Ilmoitus-tarkkuus	Laatuluokitus			Raja-arvon kohdistuminen
				I	II	III	
1	Klooripitoisuus kuiva-aineessa	m-%2)	0,01	< 0,15	< 0,50	< 1,50	<sup>6)</sup>
2	Rikkipitoisuus kuiva-aineessa	m-%2)	0,01	< 0,20	< 0,30	< 0,50	<sup>6)</sup>
3	Typpipitoisuus kuiva-aineessa	m-%2)	0,01	< 1,00	< 1,50	< 2,50	<sup>6)</sup>
4	Kalium- ja natriumpitoisuus kuiva-aineessa <sup>1)</sup>	m-%2)	0,01	< 0,20	< 0,40	< 0,50	<sup>6)</sup>
5	Alumiinipitoisuus kuiva-aineessa (metallinen)	m-%2)	0,01	<sup>3)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>5)</sup>	<sup>6)</sup>
6	Elohopeapitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,5	<sup>6)</sup>
7	Kadmiumpitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	0,1	< 1,0	< 4,0	< 5,0	<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> Yhteenlaskettu (K + Na) vesiliukoinen ja ionivaihtuvan osan pitoisuus kuiva-aineessa.

<sup>2)</sup> m-% tarkoittaa massan osuutta prosentteina.

<sup>3)</sup> Metallista alumiinia ei sallita, mutta se on hyväksyttävissä ilmoitustarkkuuden rajoissa.

<sup>4)</sup> Syntypaikkalajittelulla ja polttoaineen valmistusprosessilla pyritään poistamaan metallinen alumiini.

<sup>5)</sup> Metallinen alumiinipitoisuus sovitaan erikseen.

<sup>6)</sup> Raja-arvo kohdistuu enintään 1000 m<sup>3</sup>:n tai yhden kuukauden aikana valmistettuun tai toimitettuun polttoainemäärään ja tulee verifioida vähintään vastaavalla tiheydellä.

#### 2.2.3 Kierrätyspuu

Yksi kierrätyspolttoaineiden keskeinen komponentti on puu. Energiateollisuus ry:n, Ympäristöministeriön ja Metsäteollisuus ry:n rahoittamassa projektissa käytöstä poistetulle puulle luotiin laatuluokitus energiantuottajien sekä jättepuuta tuottavan teollisuuden ja kierrätyspolttoainetoimittajien tarpeisiin. Käytöstä poistettu puu voidaan jaotella neljään eri



ryhmään puuaineksen likaantuneisuuden/sisältämien haitta-aineiden perusteella [33]. Laatuoluokituksen käyttö ei kuitenkaan vielä ole yleistynyt kierrätyspolttoainemarkkinoilla kattavaksi, vaan käytännöt ovat melko sekalaisia [34].

Luokkaan A, eli 'Käsittämättömän käytöstä poistettu puutavara' sekä luokkaan B, 'Pohjamaalilla tai pintamaalilla kemiallisesti käsitelty puu' kuuluvat puujäte-erät eivät kuulu kierrätyspolttoaineiden piiriin, vaan niiden luokitteluun ehdotetaan sovellettavan EU:n kiinteiden biopolttoaineiden standardia EN 14961-1. Luokka C on varsinainen kierrätyspolttoaineluokka. Luokan puuaines voi sisältää raskasmetalleja sekä halogeeniyhdisteitä, mutta ei puunkyllästysaineita. C-luokka koostuu mm. kotitalousperäisestä puujätteestä, purkupuusta, rakennustyömaiden puujätteestä ja puumuovikomposiiteista. Myös puujäte, jonka alkuperän toteaminen on hankalaa, sisällytetään lähtökohtaisesti luokkaan C. Kyllästysaineita sisältävä puuaines kuuluu automaattisesti luokkaan D, joka on ongelmajätettä ja vaatii polttokäsittelyn ongelmajätelaitoksessa. [33]

Luokkien C ja D kohdalla sovelletaan Eurooppalaisen standardisoimisjärjestön CEN:n teknistä spesifikaatiota CEN/TS 15359, jota voidaan kutsua varsinaisen eurostandardin esiasteeksi. Kirjoitushetkellä kiinteiden kierrätyspolttoaine standardia EN 15359 ei vielä ole julkistettu, vaan toistaiseksi voimassa on suomalainen SFS 5875 -standardi, 'Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi'.

#### **2.2.4 Muovit ja kuitutuotteet**

Toinen kierrätyspolttoaineiden tärkeä komponentti on muovi. Erityisesti kotitalouksista kerättävästä oikeinlajitellusta energiajätteestä suuri osa muodostuu eri muoveista. Ainoa energiajätteeseen sopimaton muovi (polymeeri) on PVC (03). Lajitteluohjeiden mukaan se tulee sijoittaa kaatopaikkajätteeseen [35].

Kuitutuotteiden, eli paperi, kartongin ja pahvin osalta ei energiajätteen/kierrätyspolttoaineiden kannalta ole erityisiä rajoituksia. Yleisesti materiaalikierrätykseen sopimattomat kuitutuotteet voidaan ohjata polttoon. [35]

## 2.3 Lainsäädäntö

### 2.3.1 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2000/76/EY on esitetty, että EU-maiden jätehuoltostrategian ensisijainen tavoite on jätteiden syntymisen ehkäiseminen. Toissijainen tavoite on jätteiden uudelleenkäyttö ja viimeinen vaihtoehto on niiden turvallinen käsittely [36]. Direktiivin mukaisesti Suomen jätelain yhteyteen on 15.5.2003 lisätty asetus jätteen polttamisesta (362/2003) [27].

### 2.3.2 Asetus jätteenpolttamisesta

Valtioneuvoston asetuksen jätteen polttamisesta mukaan polttolaitoksella tarkoitetaan jätteiden polttamiseen hapettamalla tai muulla lämpökäsittelyllä toimivaa yksikköä, jossa käsittelyssä syntyneet aineet tämän jälkeen poltetaan. Rinnakkaispolttolaitokseksi määritetään laitos, jonka päätarkoitus on tuottaa energiaa tai aineellisia tuotteita ja jossa jäte on vakinaisena tai lisäpolttoaineena. Jätteenpolttoasetus koskee kaikkia jätteenpoltto- ja rinnakkaispolttolaitoksia, uusia vuoden 2002 lopulta ja vanhoja vuoden 2005 lopulta. Asetusta ei sovelleta poltto- tai rinnakkaispolttolaitoksiin, joissa polttoaineen ainoa komponentti on puujäte (luokat A ja B). Asetuksen piiriin kuuluu kuitenkin puujäte, joka puunsuoja-ainekäsittelyn tai pinnoituksen seurauksena saattaa sisältää halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja (luokka C). Myös puujäte, joka on rakennus- ja purkujätettä kuuluu asetuksen piiriin. [27]

Jätteenpolttoasetus määrää, että ilmaan ja veteen johdettavia päästöjä on tarkkailtava seuraavasti:

Ilmaan johdettava päästöt

1) jatkuvat mittaukset:

- a) typenoksidit ( $\text{NO}_x$ ), (jos raja määritetty ympäristöluvassa);
- b) hiilimonoksidi (CO);
- c) hiukkasten kokonaismäärä;
- d) orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC);
- e) suolahappo (HCl);
- f) fluorivety (HF);
- g) rikkidioksidi ( $\text{SO}_2$ );

- 2) jatkuvat mittaukset prosessista:
  - a) uunin lämpötila;
  - b) savukaasun happipitoisuus, paine, lämpötila ja vesihöyrysisältö; ja
- 3) säännölliset mittaukset dioksiineista ja furaaneista; mittaus savukaasujen viipymäajasta, vähimmäislämpötilasta ja happipitoisuudesta.
- 4) säännölliset mittaukset raskasmetalleista:
  - a) kadmium (Cd)
  - b) tallium (Tl)
  - c) elohopea (Hg)
  - d) antimoni (Sb)
  - e) arseeni (As)
  - f) lyijy (Pb)
  - g) kromi (Cr)
  - h) koboltti (Co)
  - i) kupari (Cu)
  - j) mangaani (Mn)
  - k) nikkeli (Ni)
  - l) vanadiini (V)

Veteen johdettavat päästöt jäteveden poistopaikassa

- 1) jatkuvat mittaukset jäteveden happamuudesta, lämpötilasta ja virtauksesta;
- 2) päivittäiset mittaukset kiintoaineksen kokonaismäärästä;
- 3) säännölliset mittaukset vuorokauden päästöistä; ja
- 4) säännölliset mittaukset dioksiineista ja furaaneista. [27]

## 2.4 Polttotekniikat

### 2.4.1 Arinapoltto

#### Yleistä

Arinapoltto on voimalakäytössä olevista polttotekniikoista toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisin. Se on ollut yleisin polttotekniikka teollistumiskauden alusta asti kiinteitä polttoaineita käyttävissä pienissä ja keskisuurissa yksiköissä. Pääasiallisesti käytetyt polttoaineet ovat biopolttoaineet, hiili ja turve, mutta myös erilaiset jättepolttoaineet. Jätteenpoltossa arinapoltto on ollut perustekniikkaa jo hyvin pitkään. Jätteenpolttoon käytettävissä arinapolttolaitoksissa joudutaan usein polttamaan laadultaan vaihtelevia polttoaineita. Tällöin suunnittelu toteutetaan likaavimman ja eniten korroosiota aiheuttavan jätteen mukaan. Oikein säädetyssä laitoksessa kosteat polttoaineet eivät ole ongelma, mutta täysin nestemäisille, jauhemaisille tai sulaville aineille arinapoltto ei sovi. Nykyiset

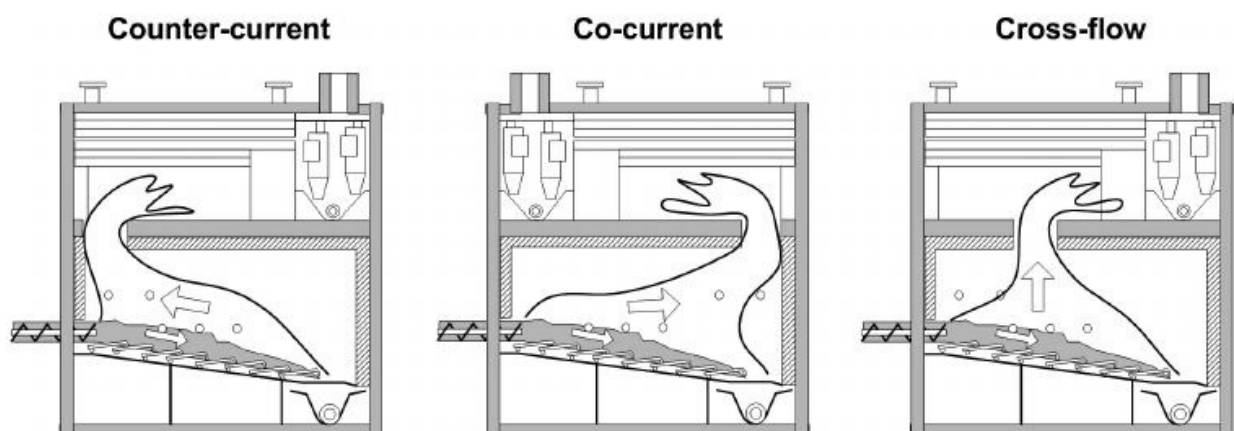
tekniset ratkaisut eivät sovellu myöskään erityisen hyvin usean, palo-ominaisuuksiltaan erilaisen polttoaineen seospolttoon. [37, 5, 8, 25]

Arinapolntin kokovaihtelu on 15 kW:n omakotitalokattiloista 80 MW:n teollisuuskattiloihin. Uudet ja kehittyneemmät polttotekniikat ovat vähentäneet arinapolton suosiota jo pitkään. Kuitenkin alle 5 MW<sub>th</sub> pienemmissä yksiköissä arinapoltto on edelleen suosituin polttomenetelmä kiinteillä polttoaineilla. [37]

### Toiminta

Arinapolton kannalta oleellista on polttoaineen mahdollisimman tasainen syöttö arinalle. Epätasaisen polttoainekerroksen seurauksena palaminen on epätasaista ja hyötysuhde alenee, kun paksumman kerroksen kohdalla polttoainetta jää palamatta. Palamisilma syötetään yleensä kahdessa, joskus kolmessa vaiheessa. Primääri-ilma syötetään aina arinan alta. Sekundääri-ilma ja mahdollinen tertiääri-ilma syötetään ylempää ja niiden avulla poltetaan polttoaineesta haihtuneet palamiskelpoiset kaasut. [37]

Yleisimmät arinarakenteet ovat: Kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina, ketjuarina ja erikoisarinat [37, 5, 8]. Kiinteillä tasoarinoilla polttoaine ei liiku, vaan palaa loppuun paikallaan. Viisto- ja ketjuarinoilla polttoaine siirtyy tulipesän halki painovoiman avulla tai mekaanisesti, jonka jälkeen se putoaa tuhkanpoistoon. Yleisesti ottaen arinapolton tuhkassa olevan palamiskelpoisen aineen määrä eli hehketushäviö on selvästi suurempi kuin leijupetikattiloissa [37]. Kuvassa 1. on esitetty eri arinakattiloiden toimintaperiaatteita.



**Kuva 1.** Arinakattiloiden toimintaperiaatteet tapauksissa, joissa polttoaine liikkuu arinalla: vastavirta (vasemmalla), myötävirta ja ristivirta [5].

Arinapoltossa palotilan lämpötilajakauma on yleensä suuri verrattuna leijupolttoon. Käytetty polttolämpötila vaihtelee yleensä välillä 850–1400 °C [8]. Arinapolton korkea huippulämpötila aiheuttaa yleensä pohjatuhkan osittaisen sintraantumisen ja sulamisen [25]. Arinapoltosta saatava teho arinan pinta-alaa kohden on tyypillisesti 1000–1100 kW/m<sup>2</sup> [37].

## 2.4.2 Leijupoltto

### Yleistä

Leijupoltto (FBC) on ollut kaupallisessa käytössä 1960–1970 -luvulta lähtien, aluksi mm. kunnallis- ja teollisuusjätteen poltossa. Leijupoltto soveltuu hyvin huonolaatuisille polttoaineille sekä eri polttoaineiden seospolttoon. Tekniikka sopii hyvin myös jätelietteiden polttoon [25]. Menetelmän etuina voidaan mainita edullinen rikinpoisto kalkin avulla sekä prosessin tasaisista lämpöolosuhteista johtuvat matalat NO<sub>x</sub>:in ja palamattoman materiaalin päästöt. Korkeasta polttoaineen palamisasteesta seuraa myös korkea polttoainetehokkuus. Verraten suurten laitteistokustannusten takia leijupoltto sopii parhaiten suurten tuotantoyksiköiden tekniikaksi. [5, 38]

Leijupolton lämpötila rajoitetaan välille 750–950 °C. Tällä tavoin toimimalla pyritään välttämään polttoaineen tuhkan sulamisesta aiheutuva petimateriaalin agglomeraatio eli paakkuuntuminen. Agglomeraatiota aiheuttavat myös runsaasti alkaleja sisältävät polttoaineet, joten niiden käyttöä leijupoltossa tulee välttää. Tehokkaan sekoittumisen ansiosta leijupolttokattiloiden tarvitsema polttoilman ylimäärä on pieni ja niissä voidaan polttaa seospolttona myös erityyppisiä polttoaineita. [5, 38, 8]

Myös erittäin kosteita polttoaineita, jopa 60 p-% vettä sisältäviä materiaaleja voidaan polttaa leijupetikattiloissa, erityisesti kuplivissa leijupedeissä. Myöskään korkea tuhkapitoisuus ei ole ongelma matalan lämpötilan takia [38, 8]. Polttoaineiden osalta kriittinen tekijä on kokojakauma, jonka pitää olla mahdollisimman tasainen. Tästä syystä leijupoltto vaatii hyvin toimivan murskaus- tai muun esikäsittelylaitteiston polttoaineen riittävän homogeenisen kokojakauman saavuttamiseksi [5, 38].

Leijupetipoltossa petinä toimiva inertti, rakeinen materiaali, kuten hiekka, kalkkikivi tai dolomiitti on sijoitettu palotilan pohjalle. Käytännössä petimateriaali koostuu myös polttoaineen tuhkasta, jonka osuus saattaa jätteenpoltossa olla suurikin [25]. Primääri-ilma puhalletaan palotilan alta,

arinassa olevien suutinten kautta, jolloin syötetty ilma alkaa leijuttaa petimateriaalia. Menetelmän polttoratkaisut voidaan syötetyn ilman nopeudesta riippuen jakaa kuplivaan leijukerrokseen (BFB) ja kiertoleijuun (CFB). [5, 38, 8]

Leijupoltossa hyväksikäytetty petimateriaalin leijumisilmiö syntyy kun kaasua puhalletaan sopivalla nopeudella rakeisen materiaalikerroksen läpi. Nopeutta, jossa ilmiö alkaa kutsutaan minimileijutusnopeudeksi,  $U_{mf}$ . Kun kyseinen nopeus saavutetaan, ja leijuminen alkaa, rakeiden välinen jatkuva kontakti katoaa. Tällöin petimateriaaliin alkaa muodostua ylöspäin nousevia kuplia. Leijumisesta ja kuplista huolimatta palotilassa säilyy selkeä raja petimateriaalin ja ylemmän palotilan välillä. Tätä leijumisen tilaa käytetään hyväksi kuplivassa leijupoltossa. [38, 8]

Kun leijukerrokseen puhalletun kaasun nopeutta nostetaan edelleen, kaasukuplat katoavat ja petimateriaalin leijutila muuttuu turbulentiksi. Tällöin lähestytään terminaalinopeutta,  $U_t$ , eli kaasuvirtauksen nopeutta, joko on sama kuin petimateriaalipartikkeleiden vapaa putoamisnopeus. Tällöin hiukkaset alkavat kulkeutua ylöspäin virtauksen mukana ja hiukkasten hävikki leijukerroksesta voimistuu. Samalla petimateriaalin kiintotiheys palotilan pohjalla pienenee ja ylemmissä osissa puolestaan kasvaa. Kun nopeutta edelleen nostetaan, saavutetaan petimateriaalin kiertävä tila, jota käytetään hyväksi kiertoleijupoltossa. [38]

### **Kupliva leijupoltto**

Kuplivassa leijukerrosoltossa petimateriaalina käytetään kiintoainehiukkasia, jotka ovat raekooltaan 0,5–1,0 mm. Menetelmän nimen mukaisesti siinä käytettävä 1–3 m/s nopeudella syötettävä ilmavirtaus alkaa leijuttaa petimateriaalia ja muodostaa siihen kuplia. Polttoainekappaleiden tulee olla kooltaan alle 80 mm. Toisin, kuin hiiltä poltettaessa, biopolttoaineet syötetään pedin sisään, ei päälle. Polttoilmasta vain noin puolet tuodaan prosessiin leijutusarinan kautta primääri-ilmana. Loput polttoilmasta tuodaan palotilaan sekundääri-ilmana, joka syötetään kerroksen yläpuoliseen jälkipalotilaan. [5, 38]

Kuplivalla leijupoltolla voidaan normaalipaineessa saavuttaa kattilan poikkipinta-alaa kohti noin 3 MW/m<sup>2</sup> teho. Kupliva leijupoltto sopii kiertoleijupolttoa paremmin kosteille polttoaineille [38]. Taloudellisesti menetelmä on kannattava, kun energian tuotantotarve on kokoluokkaa 20 MW [5].

## **Kiertoleijupoltto**

Kuten jo aiemmin mainittiin, kiertoleijupoltossa kattilassa kiertävän ilman nopeus on selvästi suurempi kuin kuplivassa leijupoltossa. Käytetty ilman virtausnopeus on yleensä 5–10 m/s. Tästä johtuen yhä suurempi osa petimateriaalista nousee palotilan huipulle asti ja joutuu ulos palotilasta. Syklonin tai vastaavan kiintoaine-erottimen avulla petimateriaali erotetaan savukaasuista ja johdetaan takaisin palotilan alaosaan. Petimateriaalin kierrosta huolimatta tiheyden ero palotilan pohjan ja yläpään välillä on selvä. Täydellä kuormalla ajettaessa pohjan kiintoainetiheys saattaa olla yli  $300 \text{ kg/m}^3$ , kun taas yläosassa pysytään yleisesti tiheydessä  $0\text{--}20 \text{ kg/m}^3$ . Osa ylöspäin virtaavista kiintoainehiukkasista muodostaa erityisesti reaktorin seinien läheisyydessä hiukkastihentymiä. Kiintoainetiheys on tästä syystä usein suurempi seinien lähellä kuin reaktorin keskellä. Suuriksi kasvaneet tihentymät vajoavat ilmavirtauksesta huolimatta alaspäin kohti reaktorin pohjaa. Petimateriaalina kiertoleijupoltossa käytetään pieniä, halkaisijaltaan alle 0,5 mm hiukkasia. Mahdollisimman täydellisen palamisen saavuttamiseksi polttoaineen tulee olla murskattu alle 40 mm partikkeleiksi. [5, 38]

Leijupolttomenetelmistä erityisesti kiertoleijupoltton etuina ovat polton tehokkuus ja suhteessa pieni savukaasun määrä. Kuplivaan leijukerrosolttoon verrattuna kiertoleijulla hiilen palamishyötysuhde on korkea, typpi- ja rikkioksidipäästöt matalat sekä polttoainevalikoima laaja [5, 38]. Voimakkaan sekoittumisen ansiosta kiertoleijupoltton aineen- ja lämmönsiirto on hyvä ja se sopii hitaasti hapettuville polttoaineille kuplivaa leijupolttoa paremmin [25]. Menetelmällä voidaan normaalipaineessa saavuttaa kattilan poikkipinta-alaa kohti noin  $6 \text{ MW/m}^2$  teho [38]. Korkean hintansa takia käyttö alkaa olla taloudellisesti kannattavaa yli 30 MW:n suuruusluokassa [5].

### **2.4.3 Rumpupoltto**

Ongelmajätteiden poltto on rumpu-uunien yleinen käyttötarkoitus. Ne sopivat kiinteiden, pastamaisten, nestemäisten sekä kaasumaisten materiaalien polttoon. Rumpu-uuneissa voidaan käyttää hyvinkin korkeita lämpötiloja sekä pitkää viipymäaika. Niitä voidaan tarvittaessa käyttää tuhkaa sulattavina uuneina. [25]

Rumpu-uuni on vino lieriö, jonka yläpäästä polttoaine sekä palamisilma syötetään sisään. Rummun pyöriessä polttoaine valuu hiljalleen alaspäin. Palokaasut ja tuhka poistuvat rummun alapäästä jälkipalotilaan. Jälkipalotilassa on usein tukipolttimet riittävän korkean lämpötilan saavuttamiseksi. Hyvin toimivan, jälkipalotilalla varustetun rumpu-uunin tuhka ja savukaasut eivät sisällä juuri

lainkaan palamattomia orgaanisia yhdisteitä. Polttolämpötila rumpu-uunissa voi olla 850–1400 °C ja polttokapasiteetti tyypillisesti 5–10 t/h. [25]

## **2.5 Kaasutus-CHP**

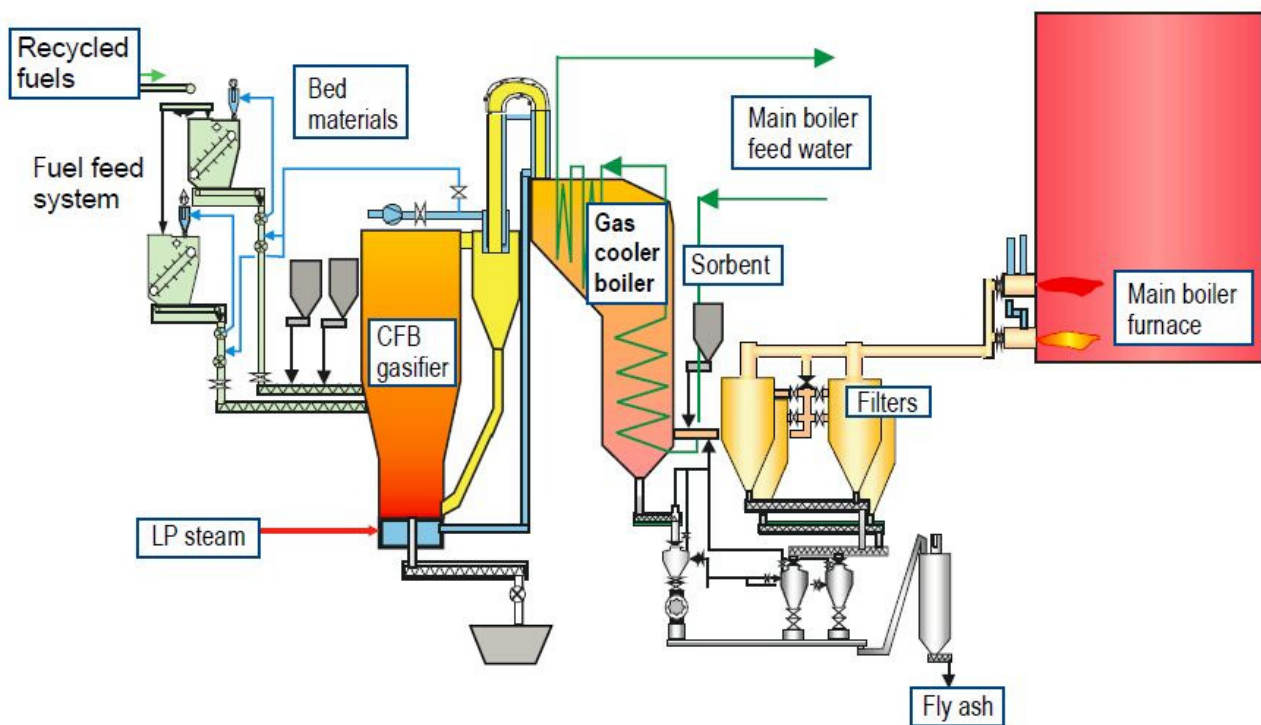
### **2.5.1 Yleistä**

Kiinteän polttoaineen kaasutuksen peruseriaatteen on tunnettu jo pitkään. Pyrolyysiin pohjautuvaa teknologiaa käytettiin Lontoossa kaupallisesti jo vuonna 1812. Ensimmäinen kaupallinen vastavirtakaasutin asennettiin käyttöön vuonna 1839. Kaasuttimia kehitettiin eri polttoaineille 1920-luvulle asti, kunnes öljyä käyttävät järjestelmät ottivat vallan sähkön ja lämmön tuotannossa [8]. Myöhemmin, 1980-luvun puolivälissä kaasutus alkoi taas herättää kiinnostusta. Tällöin pinnalla oli erityisesti hiilen kaasutus, ja kehityksen veturina toimi Yhdysvallat. 1990-luvun puolivälistä eteenpäin kiinnostusta on ollut enemmän biomassan kaasutusta kohtaan, ja kehitystä on hallinnut Eurooppa. Viimeaikoina myös Kiina ja Japani ovat olleet aktiivisia kaasutuksen kehityksessä [39].

1980- ja 1990-luvuilla kiinnostusta kaasutusta kohtaan lisäsi menetelmän korkea hyötysuhde, erityisesti sähkön korkea osuus kokonaistehosta eli rakennusaste [40]. Hyötysuhde ja rakennusaste ovat erityisen korkeita kombiprosesseissa (IGCC, Integrated Gasification Combined-Cycle), joissa tuotekaasu poltetaan ensin kaasuturbiinissa, ja tämän jälkeen kuumat pakokaasut johdetaan vielä höyryturbiiniin [11]. Viime aikoina myös mahdollisuus nestemäisten polttoaineiden sekä kemikaalien valmistukseen kaasutuksen kautta on herättänyt runsaasti huomiota ja kiinnostusta [41, 42, 43].

Kuten jo aiemmin työssä on mainittu, kiinteän polttoaineen kaasutus on kokonaisuutena tarkasteltuna endoterminen prosessi [12], jossa kiinteä polttoaine muunnetaan kaasumaiseen olomuotoon. Kaasutus voidaan suorittaa perusrakenteeltaan samanlaisissa kattiloissa kuin tavanomainen CHP-tuotanto (arinakaasutus ja leijupetikaasutus). Polttoaineen käsittely kuitenkin vaatii leijukerroskaasutuksessa erityistä huomiota, sillä niissä syötettävän partikkelikoon tulee olla alle 10 mm, eli vielä huomattavasti pienempiä kuin kierto-leijupoltossa. [11]





**Kuva 2.** Foster Wheelerin konsepti REF-polttoaineen CFB-kaasutusprosessista [44].

Kaasutusprosessissa syntyneet kaasut johdetaan kuvan 2 mukaisesti kiintoaine-erotuksen kautta jäädytykseen, joka on oleellista kaasun puhdistamisen takia. Puhdistettu kaasu johdetaan kohteeseen, jossa lopullinen polttaminen tapahtuu, yleensä kaasumoottoriin, -turbiiniin tai -kattilaan. Käytetystä menetelmästä riippuen tuotettu lämpö/höyry hyödynnetään yleensä vielä sähköntuotannossa ja/tai kaukolämpönä.

## 2.5.2 Laitosprojektit

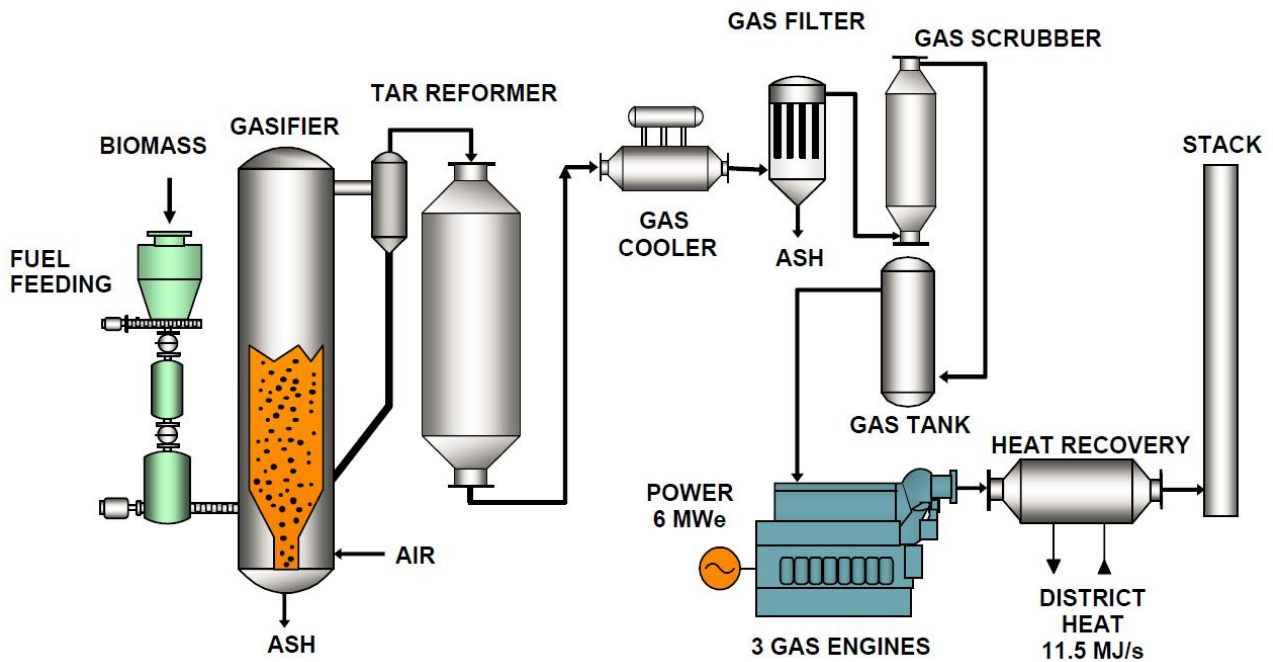
### Yleistä

Kaasutusteknologiaa on jonkin verran sovellettu suuressa kokoluokassa fossiilisilla polttoaineilla [11]. Kirjallisuudesta kuitenkin selviää, että biopolttoaineita käyttävät laitokset ovat olleet pääosin pilottihankkeita, eikä siis kaupallisen tason projekteja [45]. Muutamia erimerkkejä jo toimivista laitoksista kuitenkin on olemassa:

### Skive

Skiven CHP-kaasutuslaitos sijaitsee Skiven kunnassa, Jyllannissa. Laitoksella on käytössä matalapaineinen BFB-kaasutin, jossa polttoaineena käytetään puupellettiä/-haketta. Tuotekaasu

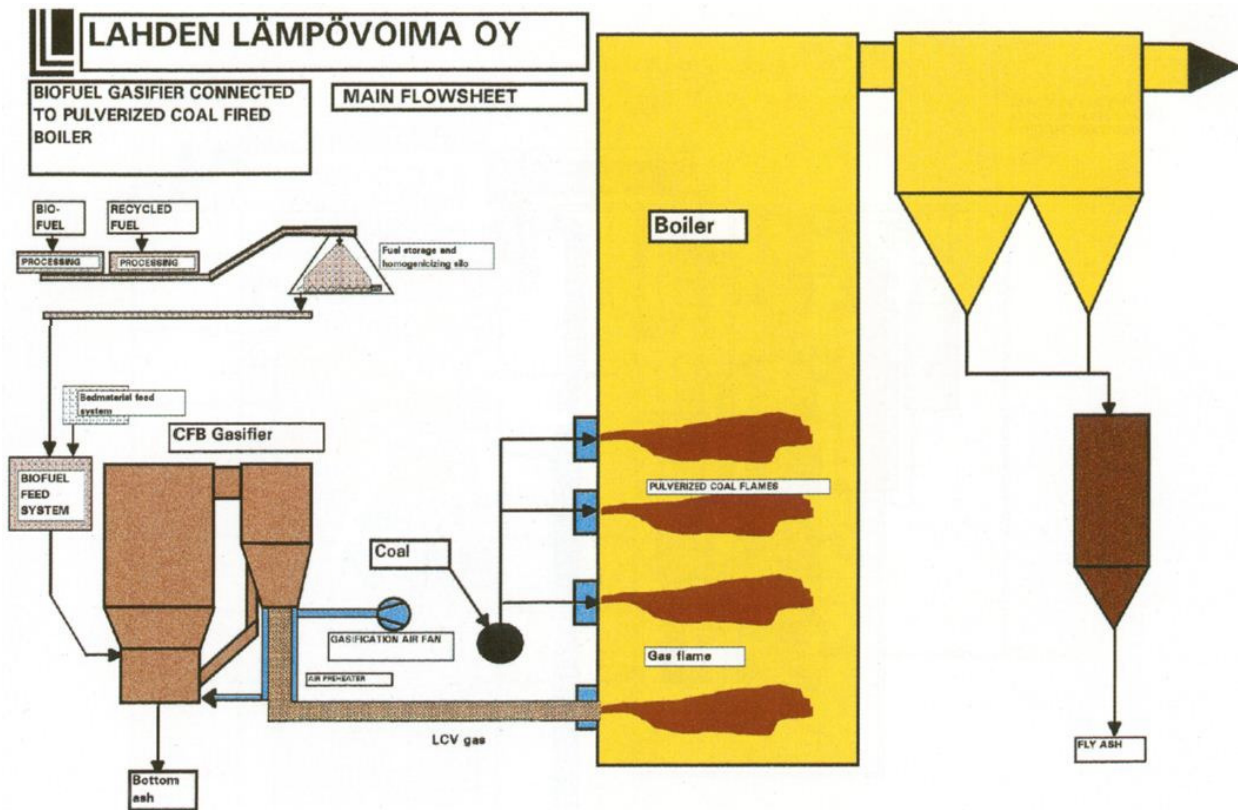
syötetään kolmelle Jenbacher AG:n valmistamalle kaasumoottorille, jotka vastaavat laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannosta. Laitoksen prosessikaavio on esitetty kuvassa 3. [46]



**Kuva 3.** Skiven CHP-laitoksen prosessikaavio [47].

### Lahti

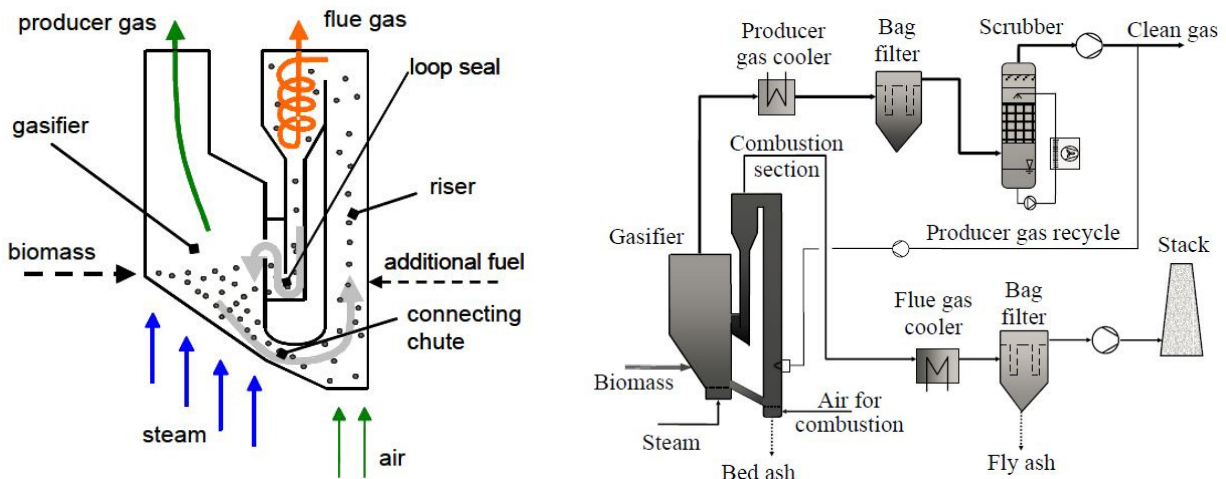
Lahti Energia Oy:n omistamassa, Lahdessa sijaitsevassa Kymijärven voimalaitoksessa on käytössä puujätettä ja kierrätyspolttoaineita hyödyntävä CFB-kaasutin, Tuotekaasu poltetaan voimalaitoksen kivihiiltä ja maakaasua pääpolttoaineinaan käyttävässä kattilassa. Tuotekaasupoltin on sijoitettu hiilipoltinten alapuolelle (kuva 4). Vuosittain kaasutin vähentää voimalaitoksen fossiilisten polttoaineiden tarvetta noin 15 %. [48, 49]



Kuva 4. Lahden CHP-laitoksen prosessikaavio [48].

## Güssing

Güssingin kaasutus-CHP-laitos Itävallassa on ollut toiminnassa vuodesta 2002 asti. Käytetty kaasutinkonsepti on kaksoisleijupeti (DFB), joka perustuu sekä kierto-leijuteknologiaan. Jälkimmäinen laitteisto on liitetty kiintoaineksen palautuskiertoon. Kaasutuksen jälkeen jäljelle jäänyt biomassa ohjataan kulkemaan höyryleijuputken kautta polttimeen. DFB-kattilan rakenne ja koko voimalaitoksen prosessikaavio on esitetty kuvissa 5 ja 6. Taulukossa 5 on esitetty edellä mainittujen voimaloiden tietoja. [50, 51]



**Kuva 5 ja kuva 6.** Güssingin CHP-laitoksen kaasuttimen rakenne (vas.) [50] ja prosessikaavio (oik.) [51].

**Taulukko 5.** Skiven, Lahden ja Güssingin voimaloiden tietoja [48, 49, 46, 50, 51].

Ominaisuus	Skive	Lahti	Güssing
Sähköteho, MW	6	167	2
Lämpöteho, MW	11,5	240	4,5
Sähkötuotannon hyötysuhde	-	0,311	0,25
Sähkö-lämpösuhte	0,52	0,7	0,44
Kokonaishyötysuhde, %	87	81	81
Polttoaineen syöttetehto, MW	20,1	-	8
Polttaine(et)	puupelletti/-hake	nyk. kivihiili, maakaasu, REF, biomassa	puuhake
Käyttöönottovuosi	2008	1976 raskas polttoöljy, kivihiili 1982, kierrätyspolttoaineiden kaasutin 1997	2002

## 2.6 Jätteenpolton päästöt ja niiden puhdistus

### 2.6.1 Yleistä

Sekä perinteistä polttotekniikkaa että kaasutustekniikkaa käytettäessä syntyneet kaasut on aina tarpeen puhdistaa. Puhdistuksen tarkoitus on poistaa kaasuista sekä laitteiston että ympäristön kannalta haitallisia aineita ja yhdisteitä. Ympäristön kannalta haitallisten päästöjen rajat on ilmoitettu jäteasetuksessa, mutta laitteiston toimivuuden kannalta haitallisten alkuaineiden ja yhdisteiden ylärajat ilmoittaa yleensä laitevalmistaja. Moni puhdistettava aine tai yhdiste on kuitenkin haitallinen sekä ympäristölle että laitteistolle.

### 2.6.2 Palamisen päästöt

Palamisen yhteydessä muodostuu haitallisia typpi-yhdisteitä ( $\text{NO}_x$ ). Noin 95 %  $\text{NO}_x$ :ista on typpimonoksidi ( $\text{NO}$ ) ja alle 5 % typpidioksidi ( $\text{NO}_2$ ). Ilmakehässä typpimonoksidi hapettuu

melko nopeasti typpidioksidiksi, mistä johtuu yhdisteiden samankaltaiset ympäristövaikutukset. Niitä ovat muun muassa happamoittavan laskeuman aiheuttaminen sekä otsonin ja fotokemiallisen saastesumun muodostus. Lisäksi palamisessa muodostuu dityppioksidia ( $N_2O$ ) eli ilokaasua, jonka osuus typen oksideista on vähäinen, mutta ilmastovaikutus merkittävä.  $NO_x$ -päästöt riippuvat sekä polttoaineen sisältämästä tyypestä että palamisolosuhteista. [52]

Rikin oksidit muodostuvat palaessa polttoaineen sisältämästä rikistä. Päästöistä valtaosa on rikkidioksidia ( $SO_2$ ) ja muutama prosentti rikkitrioksidia ( $SO_3$ ). Niiden arvo ilmastovaikutuksien kannalta on sama, koska rikkidioksidi hapettuu ilmakehässä rikkitrioksidiksi. Osa rikistä sitoutuu tuhkaan, mutta loppu muodostaa oksideja ja päättyy savukaasuihin. Myös rikkiyhdisteet aiheuttavat ympäristön happamoitumista ja terveyshaittoja ihmisille. [53]

Heikoissa palamisolosuhteissa muodostuu myös lukuisia suoraketjuisia hiilivetyjä ( $C_xH_y$ ), joista voi muodostua esimerkiksi monirenkaisia aromaattisia yhdisteitä (PAH). Hiilivety-yhdisteet saattavat myös reagoida polttoaineen epäorgaanisten alkuaineiden, kuten kloorin kanssa, jolloin voi syntyä polykloorattuja dibentso(p)dioksiineja ja -furaaneja (PCDD/F). [54]

### **2.6.3 Savukaasujen puhdistus tavanomaisessa polttolaitoksessa**

Lähes kaikkien haitallisten aineiden poistoon voidaan soveltaa useita menetelmiä ja teknologioita. Puhdistusprosessi koostuu aina useista toisiinsa kytketyistä ja toisiinsa vaikuttavista puhdistusvaiheista [25, 55]. Prosessin toteutus riippuu polttoaineen laadusta ja sen vaihtelusta sekä itse polttoprosessista ja vaadittavasta päästötasosta [56]. Sallitut päästörajat eivät saa ylittyä missään vaiheessa, vaikka vaihtelua hetkellisissä päästöissä onkin. Tämän takia suoritusarvojen ja raja-arvojen välille on jätettävä riittävä marginaali, eli suunniteltujen päästöarvojen tulee olla selvästi sallittuja raja-arvojen alapuolella [25].

Jo ennen varsinaista puhdistusprosessia epäpuhtaudet pyritään tiivistämään kiinteiksi esijähdytyskammiossa. Tällöin höyrystyneet metallit ja epäorgaaniset aineet kiinteytyvät ja erottuvat osittain ennen kattilan lämmönsiirtimiä, mikä vähentää niiden korroosioriskiä. [25]

Jätteenpoltossa syntyvien savukaasujen puhdistus voidaan karkeasti jakaa kolmeen ryhmään: märkään, puolikuivaan ja kuivaan puhdistusprosessiin. Viimeisimmässä jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirja kuvaa märkäprosessin vaiheet seuraavasti:

hiukkasten poisto sähkösuotimella, vesipesu, alkalinen pesu ja mahdollisesti typen oksidien pelkistys katalyyttisesti sekä elohopean ja dioksiinien poisto aktiivihiilisuodatuksella. [25]

Saman asiakirjan mukaan sekä kuivassa että puolikuivassa menetelmässä jätteenpolton savukaasujen puhdistuksessa sorbenttiin (kalsiumhydroksidi, kuivamenetelmässä myös natriumkarbonaatti) sidotut hiukkaset erotetaan kaasusta kangassuotimella. Savukaasuun saatetaan molemmissa menetelmissä sekoittaa myös hienojakoista aktiivihiiltä elohopean ja dioksiinien sitomiseksi. [25]

#### **2.6.4 Kaasutuskaasun puhdistus**

##### **Tuotekaasu**

Jätteenpoltoasetuksen antamat päästöraajat koskevat jätteenpoltoa myös kaasutusmenetelmää käytettäessä. Tällöin ensisijainen tavoite on saavuttaa savukaasujen riittävä puhtaus vain puhdistamalla tuotekaasu kaasutuksen ja polton välissä. Pelkkä kaasun puhdistus ei välttämättä ole kuitenkaan riittävä nykyvaatimuksille. Esimerkiksi Lahti energian meneillään olevassa kierrätyspolttoaineita käyttävässä kaasutus-CHP -projektissa savukaasujen puhtaus kaasukattilan jälkeen varmistetaan erillisellä puhdistusjärjestelmällä [57].

Puhtaiden ja vähän tuhkaa sisältävien biopolttoaineiden tuotekaasun puhdistaminen ei ole välttämätöntä, mikäli tuotekaasu poltetaan kattilassa kaasuttimen lähellä. Jäteperäisten tai muiden haitallisia aineita sisältävien polttoaineiden tuotekaasu on kuitenkin syytä puhdistaa. Kaasun sisältämät epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa kerrostumia tai korroosiota polttolaitteistossa tai ongelmia päästöjen osalta. [55]

Kaasuttamalla tuotettu kaasu sisältää aina hiukkasia, tervoja ja muita ainesosia, jotka voivat häiritä kaasuttimen jälkeisten laitteiden toimintaa. Puhdistuksen tarve määrittyy kuitenkin aina loppukäytön perusteella. Jos kaasu poltetaan suoraan esimerkiksi seospoltona, puhdistusta ei välttämättä tarvita lainkaan. Kaasuturbiineissa ja -moottoreissa tehokas puhdistus on puolestaan tarpeen. Nestemäisiä polttoaineita valmistettaessa myös oikean H<sub>2</sub> tai CO -suhteen määrittäminen on tärkeää. Myös energiantuotannon päästöraajat ovat motivoineet tuotekaasun puhdistuksen kehitystä. [58]

Tuotekaasun lentotuhkahiukkasten päälähte on polttoaineen sisältämä kivennäisaines. Lisäksi hiukkaset koostuvat kaasuuntumattomasta biomassasta sekä kaasuttimen petimateriaalista. Hiukkaset voivat kuluttaa ja vahingoittaa kaasuttimen jälkeistä laitteistoa, mutta ne on syytä poistaa myös päästörajojen takia. Hiukkasia sisältää erityisesti leijupetikaasuttimien kaltaisissa turbulenteissa olosuhteissa tuotettu kaasu. Tällöin kaasun puhdistus hiukkasista on tarpeen. Hiukkasten määrään siis vaikuttaa sekä polttoaine että kaasutuslaitteisto [58]. Taulukossa 6 on esitetty Italian Grevessä sijaitsevan lajiteltua RDF-jätepolttoainetta käyttävän CFB-kaasuttimen tuotekaasun koostumus.

**Taulukko 6.** Grevessä sijaitsevan RDF-polttoainetta käyttävän CFB-kaasuttimen tuotekaasun koostumus [16].

Komponentti	Tilavuus-%	%:a lämpöarvosta
CO <sub>2</sub>	15,65	0
N <sub>2</sub> + Ar	45,83	0
CO	8,79	34,90
H <sub>2</sub>	8,61	22,5
CH <sub>4</sub>	6,51	12,8
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	4,88	29,7
H <sub>2</sub> S	48 ppm	0,05
H <sub>2</sub> O	9,48	0
Muut	0,14	-
Yhteensä	100,00	100,00 (7,53 MJ/Nm <sup>3</sup> )

### Kylmäpuhdistus

Tuotekaasu voidaan puhdistaa joko kylmämenetelmällä (märkä) tai kuumamenetelmällä (kuiva) [11]. Yleisesti molemmissa menetelmissä mahdollisimman suuri osa hiukkasista poistetaan syklonin avulla, joka esimerkiksi kiertoleijupetikaasuttimissa onkin kiinteä osa petimateriaalin kierrätyslaitteistoa [58]. Kylmäpuhdistusta varten kaasu jäädytetään yleensä alle 150 °C:n lämpötilaan ja siitä vapautunut lämpö otetaan lämmönvaihtimien avulla talteen [11]. Jäädytetystä kaasusta loput hiukkaset, alkali- ja raskasmetallit, valtaosa typpiyhdisteitä, tervat, sekä rikki ja kloori poistetaan vesipesulla [11, 59]. Menetelmässä vettä suihkutetaan kaasuvirtaukseen, jolloin hiukkaset törmäävät vesipisaroihin ja sitoutuvat niihin. Vesi poistetaan kaasusta esimerkiksi syklonin tai muun erottimen avulla [58]. Kylmäpuhdistusmenetelmällä saavutetaan helposti esimerkiksi kaikkien kaasuturbiinien vaatimat puhtaustasot, mutta se vaatii tehokkaan jäteveden puhdistuksen, mikäli kokonaispäästöt halutaan alhaiselle tasolle [11]. Esimerkiksi kaasusta puhdistetut tervat voidaan muodostumislämpötilasta riippuen luokitella ongelmajätteeksi. Pesun jäljiltä veden seassa olevien tervojen ja jäteveden käsittely lisää puhdistuksen kustannuksia [58].

## Kuumapuhdistus

Kaasutuskaasujen kuumapuhdistusta on kehitetty, koska on ollut tarvetta kehittää kylmäpuhdistusta yksinkertaisempi prosessi, korottaa kokonaishyötysuhdetta, välttää jäteveden puhdistus ja saada tuhkat prosessista ulos kuivana [11]. Yli kaksikymmentä vuotta kehitetty teknologia ei kuitenkaan tähän mennessä ole saavuttanut riittävää luotettavuutta yli 600 °C:n lämpötiloissa, jotta tekniikka saataisiin kaupallistettua. Yleisimpiä luotettavuutta heikentäviä tekijöitä ovat suodattimen ympäristön suuret lämpötilan muutokset, ja niistä johtuva suodattimien hajoaminen, suodattimen tiivistykset sekä tuhka kerääntyminen suodattimiin [60, 61].

Kuumamenetelmässä vain vähän jäädytetty kaasu (300–600 °C, hieman menetelmästä riippuen) johdetaan suodattimien läpi [11]. Kuumamenetelmässä yleisimmät laitteet hiukkasten erottamiseen kaasusta ovat: sulku- tai sähkösuodattimet ja syklonit. Sulkusuodattimien huokokset päästävät kaasun läpi, mutta pysäyttävät kaiken huokosia suuremman aineksen. Sulkusuodattimet voivat olla esimerkiksi metallisia, keraamisia tai kankaisia. Uusien materiaalien ja suodatinmallien ansiota suodatus voidaan suorittaa selvästi korkeammassa lämpötiloissa. Sulkusuodattimilla saadaan erotettua 0,5–100 µm:n kokoisia partikkeleita [58, 62]. Optimiloissa keraamisilla suodattimilla on päästy jo lähes täydelliseen hiukkasten poistoon [11]. Suodattimen valinta on kuitenkin aina kompromissi tehokkuuden, käytettävän paineen ja suodatusnopeuden välillä [58].

**Taulukko 7.** Kaasutuksen tuotekaasusta poistettavat epäpuhtaudet, niiden aiheuttamat haitat ja puhdistus [59].

Epäpuhtaus	Esimerkki	Haitta	Puhdistus
Hiukkaset	Tuhka, hiili, petimateriaali	Eroosio, tukkeumat	Suodatus, pesu
Alkalimetallit	Natrium- (Na) ja kalium- (K) yhdisteet	Kuumakorrosio, katalyyttien toiminnan estyminen	Jäädytys, absorptio, tiivistys, suodatus
Raskasmerallit ja hivenalkuaineet	Elohopea (Hg), Arsenikki (As), Cadmium (Cd), Lyijy (Pb), Tellurium (Te),...	Katalyyttien toiminnan estyminen	Tiivistys, suodatus, suojaedit (guard beds), pesu ("ultra-cleaning")
Polttoaineen tyyppiyhdisteet	Lähinnä NH <sub>3</sub> ja HCN	NO <sub>x</sub> :in muodostus kaasunpoltossa	Pesu, selektiivinen katalyyttinen pelkistys
Tervat	Reaktiivisen aromaattiset yhdisteet	Suodatinten tukkeutuminen, tiivistyminen kerrostuminen	pilkkominen, reformointi, pesu
Rikki ja kloori	HCl ja H <sub>2</sub> S (sekä COS)	Katalyyttien toiminnan estyminen, korrosio, kaasumaiset rikkipäästöt	Kalkkikivi tai dolomiitti, sinkkipohjaiset petimateriaalit, pesu, absorptio

On olemassa myös sähkösuodattimia, joissa kaasussa olevat hiukkaset varataan suurjännitteisten elektrodien avulla. Varattujen hiukkasten keräys tapahtuu elektrodien jälkeen sijoitetuille



vastakkaisvarauksisille levyille. Sähkösuodattimet sopivat kokonsa ja hintansa takia suurempiin voimalaitoksiin [58]. Taulukossa 7 on esitetty kootusti tuotekaasusta poistettavat epäpuhtaudet, niiden haitat ja puhdistusmenetelmät.

### **Alkaliyhdisteet, raskasmetallit ja muut epäorgaaniset yhdisteet**

Polttoaineen mukana kaasun sisältämään tuhkaan tulee myös alkaliyhdisteitä, raskasmetalleja sekä muita haitallisia epäorgaanisia aineita ja yhdisteitä. Alkaliyhdisteet vaikuttavat tuhkan fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten pehmenemis-, sulamis- tai höyrystymislämpötilaan. Kaasuttimen jälkeisissä laitteissa kyseiset haitta-aineet aiheuttavat jäähtyessään ja tiivistyessään kerrostumia myöhemmissä osissa. Lisäksi alkalisuolat voivat aiheuttaa korroosiota metallipinnoissa ja estää katalyyttien toiminnan tervojen krakkauksessa ja synteesikaasusovelluksissa. Raskasmetalleilla ja muilla epäorgaanisilla alkuaineilla on haitallisia ympäristövaikutuksia, mutta ne saattavat myös aiheuttaa kiintoainekerrostumia ja muita haittoja kaasuttimen jälkeiselle laitteistolle. Raskasmetallit sekä alkaliyhdisteet höyrystyvät yleisesti kaasutusolosuhteissa, jolloin niiden erottelu tuotekaasusta ei onnistu suodattimilla sellaisenaan. Erotusmenetelmä perustuu kaasun jäädyttämiseen alle mainittujen haitta-aineiden höyrystymislämpötilan, jolloin höyrystyneet alkaliyhdisteet tiivistyvät pienten hiukkasten pinnalle. Hiukkaset puolestaan saadaan suodatettua kaasusta, kuten edellisessä kappaleessa on kerrottu. Menetelmä ei kuitenkaan toimi elohopeaan, jonka tiivistymislämpötila on hyvin matala. Myös uudelleen höyrystyminen kaasua poltettaessa on mahdollista, mikäli suodatus ei poista hiukkasia tarpeeksi tehokkaasti. [58, 62]

### **Tervat ja typpiyhdisteet**

Tervat on yleisnimi orgaanisille aineksille, jotka ovat reagoineet kaasutuksessa vain osittain. Tästä syystä kaasutustehokkuus alenee, kun tervoja syntyy. Tuotekaasun sisältämien tervojen koostumus riippuu suuresti kaasuttimen lämpötilasta ja tervojen määrä käytettävästä tekniikasta. Leijupetikaasuttimissa tervoja syntyy yleisesti selvästi enemmän kuin kiintokerros kaasuttimissa, jopa kymmenkertainen määrä. Kaikissa biomassan kaasutusprosesseissa muodostuu tervoja. Jos tuotettu kaasu poltetaan suoraan polttimessa, ei tervoista välttämättä ole haittaa. Mikäli kaasu kuitenkin pääsee jäähtymään ennen käyttöä, saattaa seurauksena olla pintojen ja putkien likaantumista ja tukkeutumista. Raskaiden tervojen aiheuttama lentotuhkan tarttuminen on myös yleisin suodatinten puhdistusta haittaava tekijä [58, 62].

Kuivamenetelmässä tervoja voidaan poistaa tuotekaasusta suodattimien sekä syklonien tai vastaavalla tavalla toimivien erottimien avulla. Ongelmana tervojen poistossa on kuitenkin

tahmeiden tervojen aiheuttama suodattimien tukkeutuminen [58, 62]. Sykloneissa ongelma on, että pienintä, alle 1 µm:n kokoista materiaalia ei saada talteen. Tervoja voidaan putsata kaasusta tehokkaasti myös hiukkasten tapaan sähkösuotimella. Tällöin kaasu joudutaan tosin jäähdyttämään noin 150 °C:een, ja keräinpintoja pesemään vedellä jatkuvasti. Kyseessä ei siis varsinaisesti ole kuuma- tai kuivamenetelmä [58].

Tuotekaasun tyyppiä sisältävistä epäpuhtauksista yleisin on ammoniakki, NH<sub>3</sub>. Pääsyy ammoniakkin haitallisuuteen on, että kaasua poltettaessa siitä muodostuu typen oksideja (NO<sub>x</sub>). Tuotekaasu sisältää tosin itsessäänkin typen oksideja, mutta niiden määrät ovat alhaiset. [58]

Tuotekaasuun muodostuneita tervoja sekä typpiyhdisteitä voidaan myös hajottaa. Tällöin tervojen osalta etuina ovat parantunut energiatehokkuus sekä pienentynyt tai poistunut tarve huolehtia puhdistusjätteestä. Pienempi ammoniakkin osuus tuotekaasussa puolestaan vähentää typen oksidien päästöjä myöhemmässä vaiheessa. Tervojen normaali hajotus tapahtuu korkean lämpötilan avulla (900–1200 °C). Sekä tervat että ammoniakki voidaan kuitenkin hajottaa myös katalyyttisesti noin 900 °C:n lämpötilassa (tervat alkaen noin 750 °C). Katalyytteinä voidaan käyttää metalleja tai ei-metalleista esimerkiksi dolomiitteja, zeoliitteja ja kalsiitteja. Hajotus voi tapahtua jo kaasuttimessa, jolloin katalyytti on petimateriaalissa, mutta myös erillisessä reaktorissa. Katalyyttinen hajotus ei kuitenkaan ole soveltuva täydelliseen tervojen poistoon suuren mittakaavan voimalaitoksissa. [58]

### **Rikki**

Polttoaineen mukana kaasutusprosessiin tulee myös rikkiä, joka muodostaa tuotekaasuun H<sub>2</sub>S ja SO<sub>x</sub> -yhdisteitä [58]. Vähän rikkiä sisältävillä polttoaineilla, kuten biopolttoaineilla erillistä rikinpoistoa ei petimateriaaliin lisättävän kalkin lisäksi välttämättä tarvita [11]. Jätteitä poltettaessa polttoaineen rikkipitoisuus on kuitenkin niin suuri, että rikin puhdistus on tarpeellista [58]. Osa rikistä voidaan poistaa tuotekaasusta kalsiumsorbenteilla, kuten kalkkikivellä tai dolomiitilla. Leijukerroskaasutuksessa niitä voidaan lisätä petimateriaaliin tai ne voivat olla petimateriaalina. Kalsiumia käytettäessä prosessissa syntyy myös kalsiumsulfidia, jonka käsittelystä täytyy huolehtia. Sorbentteina voidaan käyttää myös regeneroitavia yhdisteitä, kuten rautaoksideja tai sinkkiyhdisteitä [11].

### **Kloori**

Kloori on yksi haitallisimmista alkuaineista polttoprosesseissa. Se voi muodostaa hiilivetyjen kanssa muun muassa ympäristölle haitallisia dioksiineja ja furaaneja sekä aiheuttaa korroosiota

laitteistossa [59, 54]. Osa kloorista saadaan erotettua tuotekaasusta samalla tavalla kuin raskasmetallit, eli suodattamalla hiukkasiin tiivistyneet kloridit. Loput kloorista esiintyy kaasussa vetykloridina (HCl), jonka erottelu sellaisenaan ei onnistu suodattimella. Petimateriaali sisältää suuria määriä kalsiumia, natriumia ja kaliumia, joihin vetykloridin kloori voisi sitoutua. Olosuhteet kaasuttimessa eivät kuitenkaan ole otollisia reaktioille, sillä ne vaativat tapahtuakseen matalamman lämpötilan. Suodatuksen tehokkuutta pystytään silti parantamaan syöttämällä kaasuun erityistä klooria sitovaa sorbenttia juuri ennen suodatusta. Tuotekaasun kalsiumpitoisuuden ollessa matala saattaa myös suodattimeen kertyneessä tuhkerrostumassa tapahtua merkittävä osa kalsiumin ja kloorin reaktioista [62]. Taulukossa 8 on esitetty esimerkkejä jätephojaisten polttoaineiden polton ja kaasutuksen puhdistettujen savukaasujen pitoisuuksia.

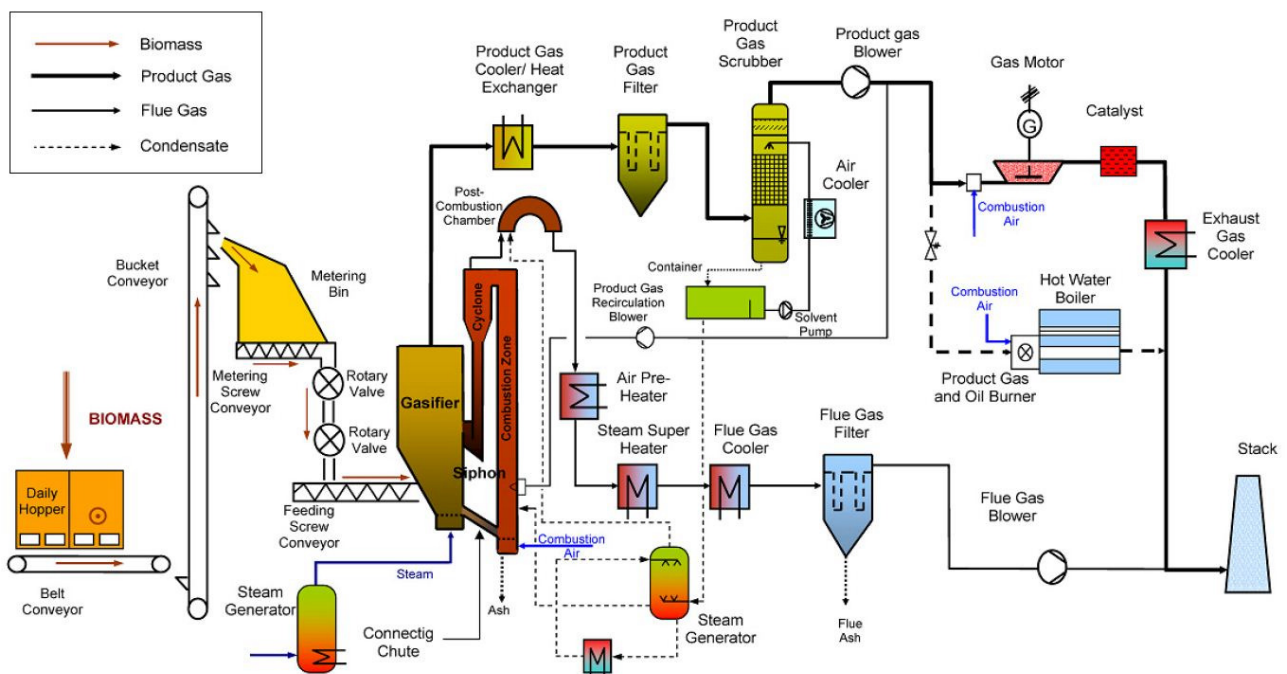
**Taulukko 8.** Esimerkkejä yhdyskuntajätteen (MSW) ja mekaanisesti lajitellun energiajätteen (RDF) poltossa ja kaasutuksessa syntyneiden puhdistettujen savukaasujen sisältämistä yhdisteistä.

Haitta-aine	Yksikkö	Poltto [63]	Poltto [63]	Kaasutus [16]
		MSW 12 % O <sub>2</sub>	RDF 11,2 % O <sub>2</sub>	RDF 11 % O <sub>2</sub>
Hiukkaset	mg/Nm <sup>3</sup>	5,7	3,15	3–7
CO <sub>2</sub>	%	6,65	7,9	-
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	367,5	240,7	2,5–5
H <sub>2</sub> O	%	26,6	14,1	-
SO <sub>x</sub>	ppm	13,5	15,0	-
SO <sub>2</sub>	ppm	-	-	1,9–5,7
NO <sub>x</sub>	ppm	18,0	9,2	163,1–244,6
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	0,54	0,86	0,5–2
Pb	mg/Nm <sup>3</sup>	0,13	0,013	≤ 0,005
Cd	mg/Nm <sup>3</sup>	< 0,003	0,0095	< 0,0004
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	10	5,35	0,008–0,05
HF + HBr	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	< 0,1
Raskasmet.	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	2,2
PCB:t	µg/Nm <sup>3</sup>	-	-	0,163
PCDD/PCDF	ng/Nm <sup>3</sup>	-	-	13,1

Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty Lahdessa sijaitsevan kierrätyspolttoaineita käyttävän kaasuttimen tuotekaasun haitta-aineiden tyypilliset määrät sekä polttoaineen koostumus. Lisäksi kuvassa 7 on esitetty esimerkki kaasutus-CHP-laitoksen puhdistuslaitteistosta.

**Taulukko 9 ja taulukko 10.** Lahden Kymijärvellä sijaitsevan kierrätyspolttoaineita käyttävän CFB-kaasuttimen tuotekaasun haitta-aineiden tyypilliset määrät ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) sekä polttoaineen koostumus (m-%) eri vuosilta [17].

Komponentti	Konsentraatio $\text{mg}/\text{m}^3$ , kuiva	Polttoaine	Yksikkö	1998	1999	2000	2001
$\text{NH}_3$	800–1000	Biomassa	m-%	71	57	63	61
HCN	25–45	Muovi	m-%	-	13	7,4	12
HCL	30–90	Paperi	m-%	-	6	0,1	0,3
$\text{H}_2\text{S}$	50–80	Ratapölkkyt	m-%	5,5	0,1	0,2	-
Bentseeni	7–12	Rengasjäte	m-%	1,5	0,9	-	-
Tervat	7–12	REF, josta	m-%	22	23	29	26
Alkalit	< 0,1	Muovi	m-%				5–15
Hiukkaset	6–10	Paperi	m-%				20–40
		Pahvi	m-%				10–30
		Puu	m-%				30–60



**Kuva 7.** Esimerkki kaasutus-CHP-laitoksen puhdistuslaitteistosta [50].

## 2.7 Tuhkat

Jätteenpolton, kuten muidenkin kiinteiden polttoaineiden polton jätteenä muodostuu tuhkaa. Tuhkajakeiden määrä riippuu käytettävästä polttomenetelmästä. Tuhka voidaan jakaa karkeasti kattilan pohjalle muodostuvaan pohjatuhkaan (arinapoltossa) sekä määritelmästä riippuen puhdistusjätteeseen tai lentotuhkaan. Savukaasun puhdistuksessa syntyvä puhdistusjäte sisältää lentotuhkaa, mutta mahdollisesti myös haitta-aineita sitovia sorbentteja. Lisäksi käytetään termiä lämmöntalteenottolaitteistoon kerääntynyt tuhka (heat recovery ash), joka yleensä yhdistetään joko

pohjatuhkaan tai lentotuhkaan. Arinapoltossa pohjatuhkan osuus on jakeista selvästi suurin, sillä menetelmässä se muodostaa noin 80 % kaikesta tuhkasta. [64]

Jakeiden erilaiset sisällöistä johtuen myös niiden tarvitsemat käsittelyt tai uudelleenkäyttökohteet eroavat toisistaan [65]. Tuhkat voidaan muun muassa sijoittaa (määräysten mukaisesti) maaperään tai käyttää rakennusmateriaaleina esimerkiksi tienrakennuksessa [64, 65, 66]. Tuhkajakeita on listattu taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Tuhkajakeita [64].

Tuhkajae	Määritelmä
Pohjatuhka	Materiaali kattilan pohjalla
Arinaseule	Arinan läpi pudonnut tuhka (yleensä pohjatuhkassa)
Lämmöntalteenottojärjestelmän tuhka	Järjestelmään kerääntynyt tuhka, yhdistetään yleensä pohjatuhkaan tai puhdistusjätteeseen
Lentotuhka	Savukaasun hiukkaset ennen sorbenttien lisäystä
Puhdistusjäte	Lentotuhka, lisätyt sorbentit, savukaasulauhde
Yhdistetty tuhka	Yhdistetty pohjatuhka, arinaseule, puhdistusjäte

## Pohjatuhka

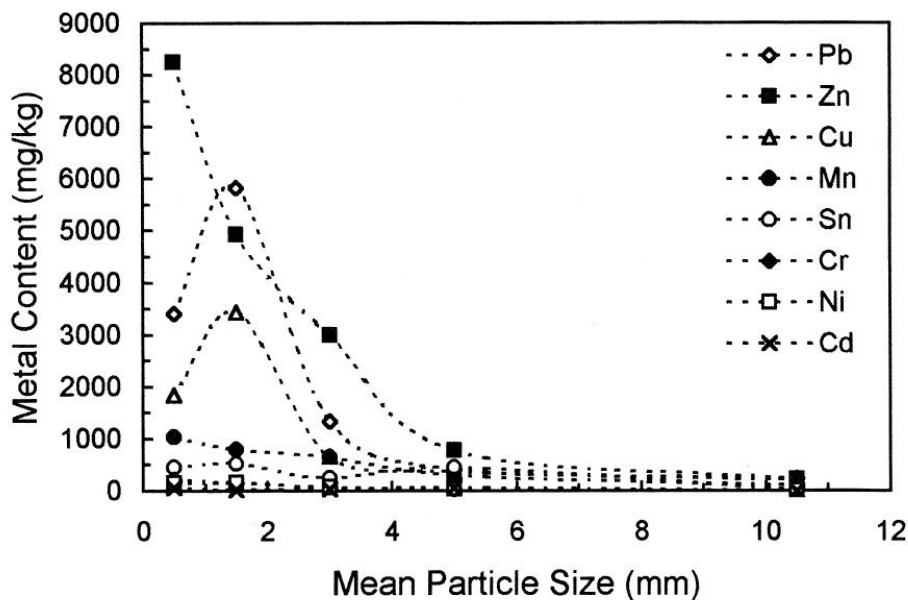
Kiinteän yhdyskuntajätteen (MSW) pohjatuhka on heterogeeninen sekoitus kuona-aineita, rautaa sisältäviä ja ei-sisältäviä metalleja, keraamisia aineita, lasia, muita palattomia aineita ja palamattomia orgaanisia aineita. Noin 80–90 % pohjatuhkan massasta muodostuu seuraavista alkuaineista: O, Si, Fe, Ca, Al, Na, K, ja C. Pienempinä pitoisuuksina pohjatuhkassa on seuraavia alkuaineita:

1 000–10 000 mg/kg	Mg, Ti, Cl, Mn, Ba, Zn, Cu, Pb, Cr
Alle 1 000 mg/kg	Sn, Sb, V, Mo, As, Se, Sr, Ni, Co, Ce, Ag, Hg, B, Br, F, I

Vaikka arinapoltossa syntyvä arinaseule edustaa vain 1–3 % pohjatuhkan massasta, jae sisältää merkittävän osan kokonaisuuden lyijystä, alumiinista, kuparista ja sinkistä. 20 % partikkeleista on kooltaan yli 10 cm. Lopusta aineksesta 10 % prosenttia on hienoainesta (alle 200 µm). [64]

Tutkimuksessa 50 % tuhkan massasta koostui 4–25 mm:n kokoisesta aineksesta. Tästä massasta yli 50 % koostuu lasista, yli 26 % synteettisistä keraamisista aineista ja yli 8 % mineraaleista. Magneettiset metallit kertyvät pohjatuhkassa partikkeleihin, joiden kokoluokka on 1–6 mm. Raskasmetallit kertyvät puolestaan alle 1 mm kokoisiin partikkeleihin. Happoihin liukenevan fraktion pitoisuus pienenee partikkelikoon pienentyessä. Pohjatuhkaa voidaan käyttää esimerkiksi teiden rakennusmateriaalina ja lasin kierrätykseen [66]. Jätteenpoltossa syntyvä tuhka sisältää myös

pieniä määriä dioksiineja ja furaaneja, mutta useiden tutkimusten mukaan niiden tasot ovat moderneissa laitoksissa niin matalat, etteivät ne aiheuta syytä huoleen [64]. Kuvassa 8 on esitetty raskasmetallipitoisuuksia kiinteän yhdyskuntajätteen polttolaitoksen pohjatuhkassa.



**Kuva 8.** Raskasmetallien pitoisuuksia kiinteän yhdyskuntajätteen polttolaitoksen pohjatuhkapartikkeleissa hiukkasen koon funktiona [66].

### Lentotuhka

Kirjallisuudessa lentotuhkan ominaisuuksia tutkitaan yleensä suodattimesta kerätystä näytteestä. Tällöin riippuu tilanteesta, sisältyykö näytteeseen sorbentteja vai ei. Suodatinjäte koostuu lentotuhkasta sekä kalsiumkloridien ja reagoimattoman kalkin sekoituksesta. Alkuaineet O, Si, Ca, Al, Cl, Na, K, S ja Fe ovat jakeessa eniten edustettuina. Seuraavia alkuaineita esiintyy suodatintuhkassa vain vähäisiä määriä:

Yli 10 000 mg/kg	Zn, Mg, Pb
Alle 1 000 mg/kg	Cu, Sb, Cd, Sr, Ni, As, Ag, Co, V, Mo, Se
Alle 10 mg/kg	Hg

Pohjatuhkaan verrattuna lentotuhka sisältää merkittävästi enemmän kadmiumia, lyijyä ja sinkkiä sekä jonkin verran enemmän liukoisia suoloja. [64]

Yhdyskuntajätteen polttoa käsittelevässä tutkimuksessa polttolaitoksesta kerätyn suodatintuhkan (kokojakauma 100–300  $\mu\text{m}$ ) pääkomponentit alkuainetasolla olivat kalsium, pii, alumiini ja kloori.

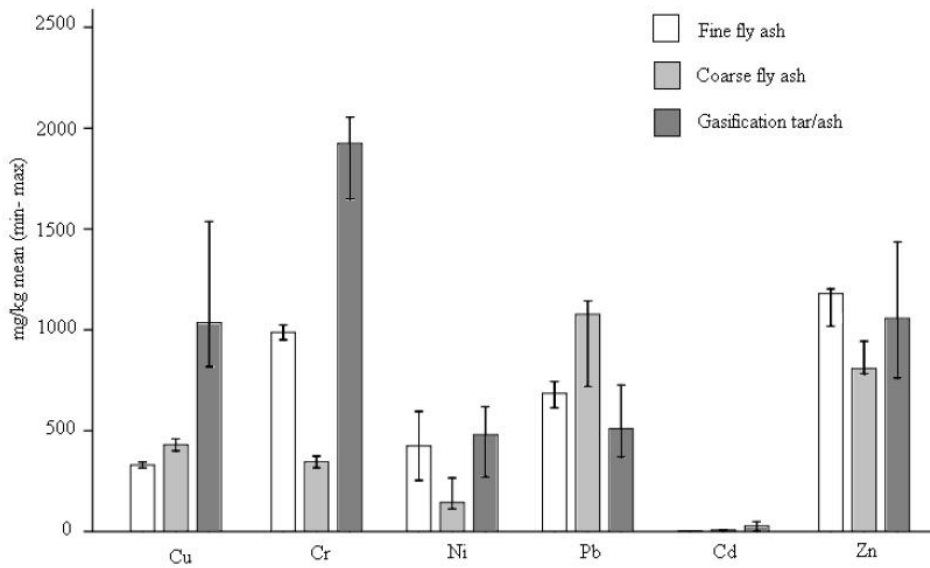
Raskasmetalleista suurimmat pitoisuudet olivat sinkillä, lyijyllä, kuparilla ja kadmiumilla [67]. Taulukossa 12 on esitetty eri alkuaineiden pitoisuudet tutkimuksen mukaan.

**Taulukko 12.** Esimerkki yhdyskuntajätteenpolttolaitoksen suodatintuhkan koostumuksesta [67].

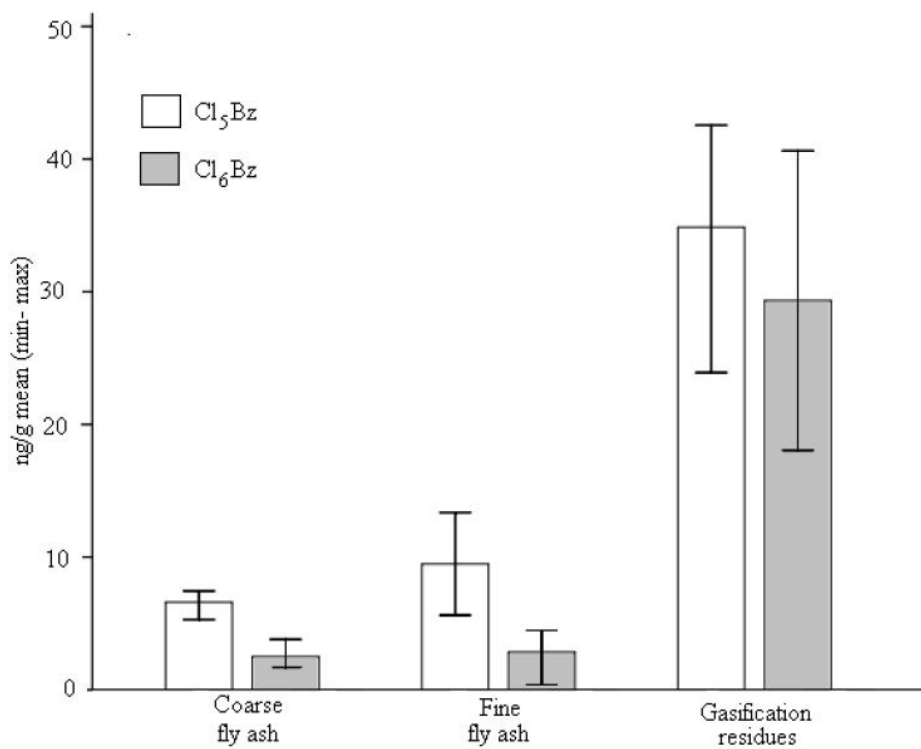
Alkuaine	Pitoisuus m-%	Alkuaine	Pitoisuus m-%	Alkuaine	Pitoisuus m-%
Ag	<0,001	Ga	~0,002	Pb	0,77
Al	6,8	H	-	Rb	<0,005
As	<0,005	Hg	<0,001	S	2,6
Ba	0,16	I	-	Sb	0,25
Bi	<0,002	In	-	Se	<0,002
C	3,8	K	3,3	Si	10,7
Ca	13,6	Mg	1,2	Sn	0,61
Cd	0,044	Mn	0,07	Sr	0,015
Cl	5,6	Mo	<0,002	Ti	1,1
Co	<0,003	N	-	Tl	-
Cr	0,055	Na	2,9	V	0,011
Cu	<0,001	Nb	<0,002	W	<0,005
F	0,093	Ni	0,014	Zn	2,7
Fe	0,6	O	-	Zr	0,008
	2,8	P	0,81		

### Polton ja kaasutuksen tuhkien eroja jätepolttoaineilla

SRF-polttolaitteen polttoa ja kaasutusta käsittelevässä tutkimuksessa kaasutuksessa ( $T = 700 \pm 20$  °C) syntyneessä tuhassa veteen liukenemattomien yhdisteiden, kuten osittain reagoineen kloorin ja suolojen osuus oli suuri verrattuna perinteisen polton tuhkaan. Tällöin riski kaasutustuhkasta liukeneviin klooripäästöihin loppusijoituksessa on polttotuhkia pienempi. Kaasutustuhka myös pidatti sisällään paremmin kuparia, kromia ja kadmiumia. Organokloridien esiintymistä kuvaavia penta- ja hexaklorobentseeniä kaasutustuhkassa oli kuitenkin 3–8 -kertainen määrä polttotuhkaan verrattuna. Kaasutuskokeessa 84 % polttoaineen kloorista päätyi tuhkaan, mikä viittaa kaasutuksen selvästi alhaisempaan kloorin höyrystyvyyteen kuin poltossa. Kuvissa 9 ja 10 on kuvattu Balampanisin tuloksia SRF-polttolaitteen poltto- ja kaasutustuhkien raskasmetallipitoisuuksista sekä klorobentseenipitoisuuksista. [68]



**Kuva 9.** Raskasmetallipitoisuuksia poltetun ja kaasutetun RDF-polttoaineen tuhkassa [68].



**Kuva 10.** Klorobentseenipitoisuuksia poltetun ja kaasutetun RDF-polttoaineen tuhkassa [68].

## 2.8 Likaantuminen ja korroosio

Polttoaineella ja sen tuhkan koostumuksella on merkittävä vaikutus tuhkan likaavuuteen kattilassa. Hienojakoinen, reaktiivista kalsiumia ja alkalimetalleja sisältävä tuhka likaa laitteistoa enemmän



kuin lähinnä silikaattimineraaleja sisältävä tuhka. Myös muun muassa fosfori- ja rautayhdisteet sekä kloori polttoaineessa voivat lisätä likaavuutta. [26]

Likaantumisen lisäksi kloori aiheuttaa polttolaitteistossa myös korroosiota. Kloori alentaa tuhkaa muodostavien aineiden sulamispistettä, mikä aiheuttaa kattilan kuonaantumista. Klooria sisältävä kuona myös aiheuttaa korroosiota lämmönsiirtopinnoille kasaantuessaan. Myös bromin on todettu reagoivan poltto-olosuhteissa kloorin tavoin muodostavan vesiliukoisia suoloja, jotka aiheuttavat korroosiota polttolaitteistossa. Merkittävimmät kloorin ja bromin kanssa korrodoivia yhdisteitä muodostavat alkuaineet ovat natrium ja kalium. [26, 69]

Jätepohjaisten polttoaineiden kaasutuksen osalta likaantumista ja korroosiota koskevaa kirjallisuutta ei tätä työtä varten löytynyt. Edellä mainittuja tietoja jätteenpolton tuloksista ei voida suoraan yhdistää kaasutukseen.

## **2.9 Tutkimuksen tavoite**

Tutkimuksessa tarkastellaan Lahti energian (LE) uuden, täysin kierrätyspolttoaineita käyttävän kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineiden koostumusta. Työn tavoitteena oli selvittää jättepolttoaineita käsittelevän kirjallisuuden ja suoritettujen polttoaineanalyysien avulla eri jätekomponenttien kemiallinen koostumus, tiettyjen jättejakeiden alkuainepitoisuuksien vaihteluvälit ja tiettyjen alkuaineiden reagointi kattilassa sekä laitteiston muissa osissa.

Tutkimuskysymykset olivat:

1. Minkälaiset ovat tarkasteltavien jättejakeiden kemialliset koostumukset ja eroavatko ne merkittävästi toisistaan?
2. Ovatko kierrätyspolttoainejakeet soveltuvia Lahti Energian kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineeksi?
3. Minkälaisia ovat yksittäisten jätekomponenttien kemialliset koostumukset?
4. Kuinka suuri osa kustakin tarkastellusta alkuaineesta on höyrystyneenä kaasutus- ja suodatusolosuhteissa?

### 3 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tarkastelussa mukana olivat LE:n uuden kaasutuslaitoksen laitteistovalmistajan sekä jätteenpolttoasetuksen rajoittamat alkuaineet sekä muutama täydentävä alkuaine. Raja-arvojen avulla selvitetään polttoainejakeiden sopivuutta LE:n uuden laitoksen polttoaineeksi ja suoritetaan jakeiden välistä vertailua.

Kirjallisuudesta saatavista alkuainepitoisuuksien keskiarvoista on muodostettu jokaiselle jakeelle kokoomataulukko, jossa julkaisujen pitoisuudet esitetään eriteltyinä. Mikäli yhdestä julkaisusta on esitetty useampi samaan jakeeseen kuuluva keskiarvo, muodostetaan niistä keskiarvojen vaihteluväli. Myös taulukoissa vaihteluvälinä kuvatut arvot ovat siis muodostettu keskiarvoista.

Lisäksi aineistona oli käytettävissä LE:lle jo aiemmin toimitetun kierrätyspolttoaineen analyysejä, joissa oli selvitetty alkuainepitoisuudet eri alkuaineille sekä muita kaasutuksen kannalta tärkeitä polttoaineen ominaisuuksia.

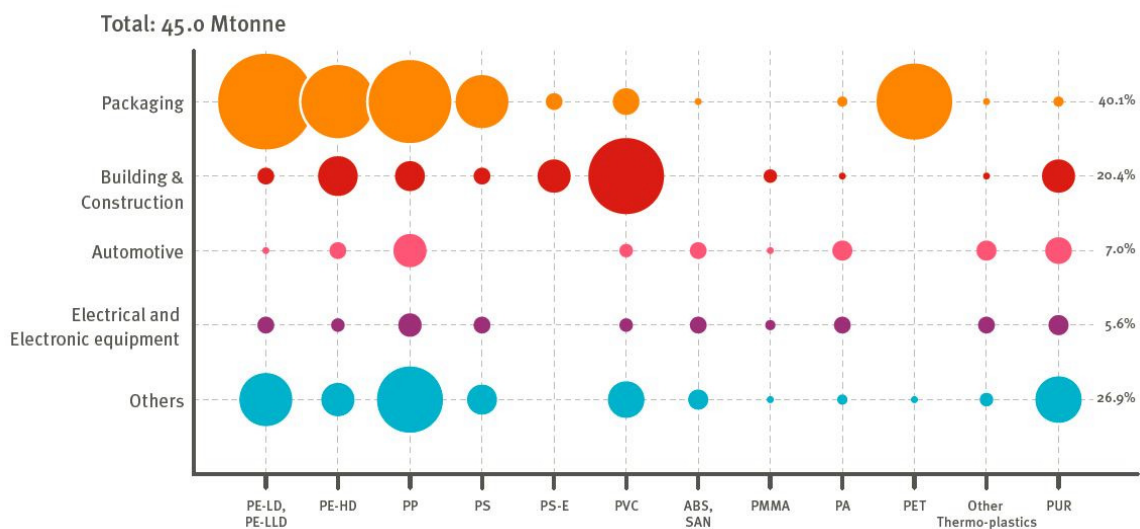
Käytettävissä olevista polttoaineanalyyseistä määritetään toimittajakohtaiset alkuainepitoisuuksien ja muiden ominaisuuksien keski- ja maksimiarvot. Alkuaineista määritetään myös höyrystyneet osuudet kaasutus- ja suodatusolosuhteissa. Höyrystyneet osuudet lasketaan alkuainepitoisuuden ja määritetyn höyrystymiskertoimen tulona. Saadut tiedot ovat tärkeitä tuotekaasun puhdistuksen kannalta ja niiden avulla voidaan myös arvioida alkuaineiden tuhkaan jäävää osuutta.

## 4 KIRJALLISUUSKATSAUS

### 4.1 Muovit

#### 4.1.1 Yleistä

Muovit ovat oleellinen komponentti kierrätyspolttoaineiden valmistukseen käytettävistä jättemateriaaleissa. Muovin käsite on kuitenkin varsin monimutkainen, sillä polymeerien lisäksi muovit sisältävät yleensä myös monenlaisia lisäaineita [70, 71]. Yksittäisistä polymeereistä ongelmallisena kirjallisuudessa tuodaan esiin ainoastaan PVC. Sen käyttöä polttoaineena tulee välttää korkean klooripitoisuuden takia [35, 69]. Kuvasta 11 voidaan havaita, että paljon klooria sisältävän PVC:n selvästi suurin käyttökohte on rakennus- ja kunnostustoiminta. Pakkausmuoveihin PVC:tä puolestaan käytetään verraten vähän. Muiden polymeerien haitallisuus polton kannalta on pitkälti riippuvainen käytetyistä lisäaineista. Muoveissa käytettäviä lisä-/alkuaineita on esitetty liitteessä 1. Luvussa 4.1 tarkastellaan jätteenpoltoa käsittelevässä kirjallisuudessa esille tuotuja muovien lisäaineita ja niiden käyttökohteita.



**Kuva 11.** Eri kohteissa käytettäviä muovilaatuja (PEMRG:n mukaan Plastics) [72].

#### 4.1.2 Palonestoaineet muoveissa

##### Yleistä

Muoveissa käytetään usein palonestoaineita hillitsemään/estämään palamista tai vähentämään savun muodostusta [71]. Niiden yleisiä käyttökohteita ovat muun muassa rakentamisessa käytettävät

eristevaahdot, huonekalujen verhoilut, suojakalvot, suojaputket, erilaiset pidikkeet (esim. lampuille), pistorasiat ja elektroniikkalaitteet [69]. Kirjallisuudessa palonestoaineet ovat jaoteltu usealla eri tavalla. Muun muassa seuraavanlaista jaottelua on käytetty:

### **Halogenoidut palonestoaineet**

Halogenoidut yhdisteet ovat palonestoaineina hinnaltaan ja käyttöpitoisuuksiltaan alhaisia. Niiden sisältämät halogeenit ovat yleensä bromi tai kloori. Haitallisten terveys- ja ympäristövaikutusten takia halogenoitujen yhdisteiden käyttöä pyritään kuitenkin vähentämään [71]. Muun muassa vuoden 2006 puolella välissä eräiden bromiyhdisteiden käyttö Suomessa kiellettiin sähkö- ja elektroniikkalaitteissa (tarkemmin luvussa 4.5) [73]. Kielloista huolimatta bromiyhdisteet olivat saman vuoden tilastoissa määrällisesti toiseksi eniten käytetty palonestoaineiden ryhmä 18:lla m-%:lla kaikista käytetyistä palonestoaineista [74]. Klooriyhdisteiden vastaava luku on 11 m-%. Yksi syy bromin suosioon on, että muihin palonestoaineisiin verrattuna se on selvästi tehokkain. Tästä syystä käytettävä pitoisuus on erittäin matala, jopa alle 5 % tuotteen massasta [70, 75]. Kuten jo aiemmin on mainittu, halogenoidut palonestoaineet ovat haitallisia jätteenpolttolaitteiston kannalta, sillä bromin ja kloorin on todettu muodostavan vesiliukoisia suoloja ja aiheuttavan korroosiota polttolaitteistossa [69].

Käyttökohteita halogenoiduille palonestoaineille ovat muun muassa sähkölaitteiden koteloinnit (näytöt, televisiot), lämpöeristeet (rakentaminen), johdot ja kaapelit sekä sähköliittimet [70, 71]. Viimeisen 10–20 vuoden aikana bromia sisältävistä palonestoaineista suosituimpia ovat olleet: tetrabromobisfenoli A (TBBPA), decabromodifenyylietteri (DecaBDE) ja hexabromosyklododekaani (HBCD) [69]. Käyttökohteet ovat yleisesti polymeeri-/muovi- ja tekstiiliteollisuudessa [69, 76]. Kirjallisuudessa todetaan muovin bromipitoisuudella olevan suora yhteys palonestoaineiden käytettyyn määrään [77].

### **Metallihydraatteja sisältävät palonestoaineet**

Metallihydraatteja sisältävät palonestoaineet ovat määrällisesti eniten käytetty palonestoineryhmä. Yksi syy määrällisesti suureen käyttöön on korkea käyttöpitoisuus. Esimerkiksi halogenoituihin palonestoaineisiin verrattuna niiden käytetyt pitoisuudet ovat erittäin korkeita, jopa yli 60 m-% [71, 74]. Metallihydraatteja sisältävistä palonestoaineista ei puolestaan ole havaittu terveydelle tai ympäristölle haitallisia vaikutuksia. Käytetyt yhdisteet sisältävät yleisimmin alumiinia (alumiinitrihydroksidi, tai -hydraatti, ATH), mutta myös magnesiumia (magnesiumhydroksidi, MH) ja muita metalleja. Mainittuja käyttökohteita ovat muun muassa erilaiset putket, johtimet, kaapelit,

kylpyhuonekalusteet, seinäpaneelit, pöytälevyt, sähkölaitteiden piirilevyt sekä rakennustarvikkeet, kuten laminaatit, suojakalvot ja muovipuutuotteet. Esimerkiksi ATH:a käytetään muovien lisäksi myös matoissa ja tekstiileissä [70, 71]. ATH:n toimivuus palonestoaineena perustuu siitä vapautuvaan veteen kuumissa olosuhteissa. Veden poistumisen jälkeen jäljelle jää alumiinioksidi [70]. Alumiinioksidi on polttoprosessin kannalta haitaton [78].

### Fosforia sisältävät palonestoaineet

Osa palonestoaineista sisältää fosforia eri muodoissa. Näistä yleisimpiä ovat fosfaattiesterit, mutta myös epäorgaanisia fosfaatteja käytetään. Lisäksi yhdisteet saattavat sisältää joitakin metalleja, kuten bromia. Käyttökohteita ovat sähkökomponentit, johdot ja kaapelit, erityisesti paineilmajohdot, sähkölaitteiden ja moottoreiden kotelot, polyuretaanivaaho, pehmusteet ja pakkaukset sekä eristeet. [70, 71]

### Muita palonestoaineita

Kirjallisuudessa mainitaan palonestoaineissa käytettävän lisäksi ainakin titaani-, tina-, molybdeeni-, rauta-, sinkki-, melamiini- ja booriyhdisteitä [70, 79, 71]. Taulukossa 13 on esitetty palonestoaineiden arvioitu kulutus maailmassa vuonna 2006.

**Taulukko 13.** Palonestoaineiden arvioitu kulutus maailmassa vuonna 2006 [74].

Palonestoaine	Arvioitu kulutus	Osuus
	t	%
Alumiinitrihydraatti (ATH)	600 000	38
Magnesiumhydroksidi (MH)	34 000	2
Bromia sisältävät yhdisteet	290 000	18
Klooria sisältävät yhdisteet	170 000	11
Fosforiyhdisteet	260 000	16
Typpiyhdisteet	53 000	3
Antimonioksiidi	90 000	6
Muut	93 000	6
Yhteensä	1 590 000	100

### Tehostimet

Palonestoaineiden kanssa käytetään usein erillistä tehostinta. Näistä selvästi käytetyin on antimonioksiidi (trioksiidi), jota esim. halogenoitujen yhdisteiden kanssa käytetään suhteessa 1:1–7 [71, 77, 80]. Tutkimuspuoli on viime aikoina keskittynyt erityisesti tehostinten kehittämiseen, jotta palonestoaineiden pitoisuuksia tuotteissa voitaisiin laskea. Myös haitallisten tehostimien, kuten antimonioksidin korvaaminen on ollut motivaationa. Erityisesti sinkkistannaatin käyttö metallihydraattien (ATH ja MH) yhteydessä on lisääntynyt. Muita, vähemmän käytettyjä tehostimia ovat sinkkiboraatti, -molybdaatti ja -fosfaatti sekä melamiini ja sen johdannaiset [70, 71, 74].

### 4.1.3 Stabilaattorit

Muoveissa, lähinnä PVC:ssä (sekä PVDC:ssä, VC:ssä ja PVC-sekoituksissa) käytetään erilaisia alkuaineita ja yhdisteitä lämpöstabilaattoreina. Stabilaattoreiden pääryhmät ovat metallisekoitesuolat, organotinayhdisteet ja lyijy-yhdisteet [79, 71]. Taulukossa 14 on esitetty stabilaattoriryhmien pääkäyttökohteet.

**Taulukko 14.** Stabilaattoriryhmien pääkäyttökohteet [71].

Stabilaattori	Käyttökohte
Metallisekoitteet	
Barium/kadmium	Taipuisa ja puolijäykkä PVC
Barium/sinkki	Taipuisa ja puolijäykkä PVC
Kalsium/sinkki	Taipuisa PVC (elintarvikemuovit)
Organotinat	
Butyyli	Jäykkä PVC
Metyyli	Jäykkä PVC (erit. putket)
Oktyyli	Jäykkä PVC (elintarvike)
Lyijy	
lyijystearaatit	Johdot ja kaapelit
lyijyphtalaatit	"
kolmiemäksinen lyijysulfaatti	"
kaksiemäksinen lyijyfosfiitti	"
kaksiemäksinen lyijykarbonaatti	"

## 4.2 Kaupan ja teollisuuden erilliskerätty jäte

### 4.2.1 Yleistä

Kauppojen erilliskerätty, kierrätyspolttoaineen raaka-aineeksi päätyvä jäte koostuu suurelta osin pakkausjätteestä, joka koostuu lähinnä paperista, pahvista ja eri muodoissa esiintyvistä muoveista [69]. Taulukossa 15 on vertailtu kahden eri lajittelujärjestelmää hyödyntävän automarketin (Prisma ja Citymarket Jyväskylässä) REF-raaka-aineen koostumusta vuodelta 1999. Toisin kuin Citymarketissa, Prismassa energijätteen lisäksi kerätään myös kuivajäte-jae, johon erotellaan energijätteeksi soveltumaton kuiva jättemateriaali. Kyseisten kauppojen käsinlajitellun palavan jätteen alkuainepitoisuudet ovat eriteltyinä taulukon 16 'Kauppa 1'-sarakeessa.

**Taulukko 15.** Kahden automarketin erillislajitellun energia-/kuivajätteen sisältämien jätefraktioiden kertymät [28].

Jae	Energiajäte m-%	Kuivajäte m-%
Muovit	40	34
Kuitu	17	23
Puu	25	12
Muu palava	1	1
Biojäte	7	15
Metallit	-	1
Lasi	1	2
Muut epäpuhtaudet	-	1
Loppujae	9	11

Valtioneuvoston päätöksen pakkauksista ja pakkausjätteistä mukaisesti sallittu lyijyn, kadmiumin, elohopean ja kuudenarvoisen kromin yhteispitoisuus pakkauksessa tai sen osassa ei 1.7.2001 alkaen saa ylittää 100 ppm painosta [81].

Teollisuuslaitosten tuottaman jätteen koostumus riippuu voimakkaasti siitä, mitä materiaaleja teollisuus käyttää raaka-aineinaan [26]. Kirjallisuudessa mainittuja teollisuuden jättejakeita ovat muun muassa: eri tyyppiset purku- ja pakkausjätteet, nestepakkaukset (muovipullot, pahvipurkit, huonekalujen valmistuksen jäte (lähinnä tekstiilit, puu ja muovi) sekä jätelietteet (paperituotannon) [82, 69, 83, 84]. Rakennus-/purkujätteen mukana teollisuuden jättejakeeseen tulee yleensä puun lisäksi myös paljon kiviainesta [26]. Sen määrä lopullisessa polttoaineessa riippuu pitkälti valmistusprosessin toimivuudesta. Rakennus- ja puujätteen koostumuksia tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.3.

#### 4.2.2 Alkuainepitoisuudet

Kirjallisuudesta saadut pitoisuudet (taulukko 16) olivat enimmäkseen keskenään hyvin linjassa. Erot yksittäisten alkuaineiden eri arvojen välillä jäivät pääosin yhteen kertaluokkaan. Suurimmillaan jakeiden väliset erot olivat kadmiumilla, jonka kohdalla pienimmän ja suurimman arvon ero oli jopa kolme kertaluokkaa. Jonkin verran vaihtelua oli havaittavissa myös muiden yksittäisten alkuaineiden kohdalla. Kloorin pitoisuuksissa jakeet 'Kauppa 1' sekä 'Kauppa, teollisuus ja kuluttajat' olivat jonkin verran muita korkeampia. Molempien jakeiden kohdalla PVC lienee merkittävin syy, sillä ainakin 'Kauppa 1' -jakeen jätteeseen PVC oli lajittelussa jätetty (0,6 m-% energiajätteessä ja 0,7 m-% kuivajätteessä). Tutkimusraportissa [28] merkittäviksi PVC:n ja samalla kloorin lähteiksi mainitaan jätteeseen joutuneet hintalistat ja hedelmälaatikoiden reunanauhat. Oma osuutensa on kuitenkin myös biojätteen ruokasuolalla. Muista alkuaineista

raportissa mainittiin metallista alumiinia (sellaisenaan ja laminaatteina) esiintyvän kaupan jätteessä jonkin verran [1].

'Kauppa ja teollisuus 1' -jakeen antimonipitoisuus oli myös kaikista kirjallisuuden arvoista suurin. Bromin arvoja oli valitettavasti saatavilla ainoastaan 'Kauppa, teollisuus ja toimisto' -jakeesta, joten vertailua ei sen osalta voida suorittaa. Bromin ja antimonin korkeat arvot voivat johtua purkujätteen sisältämistä palonestoaineilla suojatuista materiaaleista, kuten eristeistä tai muovimatoista.

Yksi selittäjä kalsiumin suureen pitoisuuteen polttoaineissa voi olla suuri paperituotteiden pitoisuus. Paperituotteiden kalsiumpitoisuutta nostavat epäorgaaniset täyteaineet, joita käytetään ominaisuuksien parantamiseen [69, 85]. Mikäli polttoaine sisältää rakennus-/purkujätettä, saattaa sen mukana polttoaineeseen tulla myös kipsiä, joka voi nostaa kalsiumtasoa tuntuvasti. Kalsiumia käytetään myös kalsiumkarbonaattina tiettyjen muovien täyteaineena [69].



**Taulukko 16.** Kaupan ja teollisuuden jätteistä valmistetun kierrätyspolttoaineen alkuainepitoisuuksia.

Ominaisuudet	Yksikkö	Teollisuus [26]	Kauppa 1 [28]	Kauppa 2 [86]	Kauppa ja teollisuus 1 [26]	Kauppa ja teollisuus 2 [85]	Kauppa, teollisuus ja toimisto [69]	Kauppa, teollisuus ja kuluttaja [85]	Yritys ja teollisuus [1]	Yritys ja teolli- suus (pelletti) [1]
Alkuperä		Pakkaustuote- teollisuuden tuotantojäte	Kuiva- /energiajäte	Pakkaus- jäte	Kuivajäte, rakennus- /purkujäte	Teollisuuden ja yritysten jäte	Erilliskerätyt energiajäte, rakennus-/purkujäte, pakkaus- ja tuotantojäte	Teollisuuden ja yritysten jäte sekä erilliskerätty kuluttajien muovijäte	Polttokelpoinen jäte	Polttokelpoinen jäte + pakkausteol. tuotantojäte
Julkaisuvuosi		2007	2005	2001	2007	2008	2010	2008	2005	2005
Keräysvuosi		2000–2002	1999	-	1997–2007	2007	-	2007	2000	2000
Käsittely		teollinen (kaupallinen)	Palava jäte (myös PVC) eroteltu käsin	Murskaus, jauhatus, ei lajittelua	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	Murskaus ja magn. materiaalien erottelu	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)
LHV, kuiva	MJ/kg	22,3	-	-	16,7	23,7 – 26	23,51 – 23,56	25,2 – 25,8	21,0	22,3
Kosteus	m-%	8,4	18,1	4,18	18,2	~18	18,1 – 18,3	~25 – 27,5	16	0,83
Kloori	m-%	0,06	1,04	0,14	0,28	0,4 – 0,42	0,44 – 0,46	1,02 – 1,34	0,18	0,42
Rikki	m-%	0,1	0,06	0,10	0,13	0,16 – 0,2	0,15	0,2 – 0,3	0,06	0,09
Typpi	m-%	0,88	0,32	0,33	0,71	0,6 – 0,7	0,48 – 0,79	0,6 – 1	0,9	0,3
Kalium + natrium	m-%	0,15	0,21	0,54	0,24	0,14 – 0,16	0,29 – 0,31	0,11 – 0,13	0,08	0,13
Kalium	m-%	-	-	0,23	-	0,04 – 0,05	0,09 – 0,13	0,04 – 0,04	-	-
Natrium	m-%	-	-	0,31	-	0,1 – 0,11	0,19 – 0,20	0,07 – 0,09	-	-
Alumiini, metallinen	mg/kg	-	700	490	-	-	-	-	300	1700
Alumiini, kokonais	mg/kg	-	-	7094	-	-	-	-	3300	6100
Elohopea	mg/kg	0,008	<0,09	-	0,06	-	-	-	<0,1	<0,06
Kadmium	mg/kg	0,03	3	0,17	0,63	<1,2 – 5	-	4 – 10	0,37	0,7
Tuhka	m-%	5,0	2,6	11,38	6,4	7,6 – 8,6	7,5	10,4 – 11,9	5,4	6,8
Irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hilti	m-%	-	71,8	47,13	-	56,9 – 60,5	54,9 – 55,1	59	51,5	54,4
Vety	m-%	-	10,2	6,32	-	7,4 – 8,5	7,6	8,5	6,8	7,8
Happi	m-%	-	-	-	-	22,9 – 26,4	29,1	17,5 – 21,2	-	-
Fluori	mg/kg	-	<100	-	-	-	-	-	<20	<50
Kalsium	mg/kg	-	-	10737	-	13000 – 15000	17800 – 19100	14000 – 19500	-	-
Magnesium	mg/kg	-	-	1079	-	-	-	-	-	-
Antimoni	mg/kg	7	3,4	0,64	140	15 – 37	-	34 – 62	14	12
Lyijy	mg/kg	5,6	18	12,4	59	16 – 57	-	75 – 140	39	57
Kromi	mg/kg	5,2	48	74,9	110	36 – 120	-	160 – 170	38	24
Koboltti	mg/kg	4,7	0,8	1,46	6,6	6 – 7	-	9 – 10	51	<4
Kupari	mg/kg	15	60	75,22	870	97 – 450	-	44 – 79	170	114
Mangaani	mg/kg	22	15	72,2	105	79 – 85	-	83 – 100	50	130
Nikkeli	mg/kg	2,7	<7	26,9	41	38 – 41	-	9 – 14	6,7	3,7
Vanadiini	mg/kg	1	<4	3,81	5,2	4	-	7 – 8	<5	4,1
Tallium	mg/kg	0,5	<1	-	0,8	<12	-	<0,5	<1	<1
Fosfori	mg/kg	-	180	307	-	-	-	-	71	180
Tina	mg/kg	-	43	-	-	<12 – 14	-	29 – 31	5,5	8,2
Sinkki	mg/kg	170	110	60,2	360	160 – 170	-	260 – 320	400	310
Arseeni	mg/kg	0,5	<4	1,56	5,3	<6	-	3 – 53	31	12
Bromi	mg/kg	-	-	-	-	-	40 – 205	-	-	-
Barium	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 4.3 Rakennusjätteestä ja jätetuusta valmistetut kierrätyspolttoaineet

### 4.3.1 Yleistä

Rakennus-/purkujäte koostuu suurimmalta osin kiviaineksesta. Koostumus vaihtelee hieman riippuen siitä, onko kyseessä uudisrakentaminen, korjausrakentaminen vai purkaminen [87]. Kierrätyspolttoainetta valmistettaessa kiviaines pyritään lajittelemaan pois seoksesta. Lopullinen määrä kuitenkin riippuu lajittelulaitoksen toiminnasta. Kierrätyspolttoaineen kannalta oleellisin fraktio rakennus-/purkujätteessä on puu, jota kertyy kaikissa rakennus- ja purkutoiminnassa yli viidennes kaikesta jätteestä [87]. Lisäksi energiantuotannon kannalta tärkeä fraktio on muovit. Taulukossa 17 on esitelty rakennus-/purkujätteen koostumuksia.

**Taulukko 17.** Eri rakennusjätetyyppien koostumuksia [87].

Jäteaines	Uudisrakentaminen	Korjausrakentaminen	Purkaminen
	m-%	m-%	m-%
Kiviaines	43,8	40,1	69,7
Puu	25,3	25,5	22,8
Pahvi	2,4	1,0	0
Metalli	3,7	11,8	1,0
Muu jäte	24,8	22,3	3,8

### 4.3.2 Alkuainepitoisuudet

#### Rakennusjäte

Rakennusjätteen alkuainepitoisuudet (taulukko 19) olivat keskenään tasaisia. Yksittäisten alkuaineiden pitoisuuksien erot jakeiden välillä olivat korkeintaan yhden kertaluokan suuruisia. Luvussa 4.2 'Kaupan ja teollisuuden jäte' mainitut bromin ja kalsiumin lähteet pätevät myös rakennusjätteellä.

#### Puujäte

Puujätejakeiden alkuainepitoisuudet olivat selvästi linjassa keskenään. Suurinta vaihtelu alkuainepitoisuuksissa oli lyijyn kohdalla. 'Jätetäpuu 4' -jakeen lyijypitoisuuden keskiarvo oli yli kymmenkertainen kirjallisuuden toiseksi suurimpaan arvoon verrattuna. Muilla jakeilla vaihtelu oli vähäisempää. Puhtaaseen puuhun verrattuna korkeat kromin, kuparin ja arseenin pitoisuudet osassa puujätejakeissa saattavat johtua sekaan joutuneesta kyllästetystä puusta (CCA-puu, ei valmistettu vuoden 2004 jälkeen [88]).

## Maalit

Moilanen ym. [78] ovat raportissaan selvittäneet myös maalien koostumuksia tarkastelemalla niiden käyttöturvallisuustiedotteita. Heidän mukaansa maaleissa on yleisesti ottaen vähän raskasmetalleja sisältäviä aineksia. Halogeenipitoisten (lähinnä jodipitoisten) homesuoja-aineiden käyttöä maaleissa saattaa kuitenkin esiintyä. Raskasmetalleja voi joutua maaliin myös epäpuhtauksina, jolloin ne eivät näy tuoteselosteissa. Taulukossa 18 on esitetty joitain esimerkkejä maalien alkuainepitoisuuksista.

**Taulukko 18.** Eri maalien alkuainepitoisuuksia.

Alkuaine	Yksikkö	Vesiohenteinen akryyli-maali [89]	Alkydi-hartsimaali [90]	Vanhat maalit (yli 40 v.) [91]
Natrium	m-%	0,7 – 0,9	-	-
Alumiini, kokonais	mg/kg	1 – 1,5	-	-
Elohopea	mg/kg	-	400	-
Kadmium	mg/kg	-	11 700	-
Hiili	m-%	26,9 – 50,3	-	10,88 – 47,28
Happi	m-%	37,4 – 42,3	-	31,11 – 387
Kalsium	mg/kg	27 000 – 94 000	-	-
Magnesium	mg/kg	9 000 – 13 000	-	-
Antimoni	mg/kg	-	600	-
Lyijy	mg/kg	-	300	1 300 – 1 900
Kromi	mg/kg	-	100	29 400 – 70 800
Sinkki	mg/kg	-	-	7 000 – 32 600
Arseeni	mg/kg	-	100	-
Barium	mg/kg	-	600	-
Si	mg/kg	32 000 – 52 000	-	7 700 – 61 000
Ti	mg/kg	38 000 – 125 000	-	213 300 – 494 800
Se	mg/kg	-	800	-

Laajassa eri alkuaineiden lähteitä selvittäneessä raportissa [92] maalien todetaan voivan jätteenpoltossa toimia seuraavien alkuaineiden lähteinä (määriin ei ole otettu kantaa): barium, kupari, arseeni, kadmium, elohopea, lyijy, titaani, kromi ja kloori. Maaleja koskevassa kirjallisuudessa vastaan useimmin tulee tutkimuksia maalien lyijypitoisuudesta. Kiinalaisessa tutkimuksessa [93] paikallisten koulujen ja lastentarhojen huonekalujen, seinien ja lelujen maalien lyijypitoisuuden kaikkien mittauksen mediaaniarvo oli 1 005 mg/kg, mutta esimerkiksi leluissa maksimipitoisuus oli 51 800 mg/kg. Intialaisessa tutkimuksessa [94] kaikki vesipohjaiset lateksimaalit sisälsivät lyijyä alle 25 mg/kg, mutta emalimaalit maksimissaan 140 000 mg/kg. Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa [95] kotitalouksien ulkopinnoilta lyijypitoisuuden maksimiarvo oli jopa 317 151 mg/kg.

Myös elohopean ja kadmiumin pitoisuuksia oli kirjallisuudessa selvitetty. Edellä mainitussa amerikkalaistutkimuksessa elohopean pitoisuudet ulkomaaleissa vaihtelivat 0,8–214,0 mg/kg välillä. Sisämaaleissa pitoisuus oli jälleen pienempi 0,03–39,2 mg/kg. Toisen

kiinalaistutkimuksen mukaan puumaalien kadmiumpitoisuus puolestaan vaihteli 0,04–0,07 mg/kg välillä [96].

Maalienkategorian laajuuden huomioon ottaen, voidaan todeta, että niiden osalta tarkastelu ei ole lähellekään kattava. Vain muutamia esimerkkejä on mainittu. Tarkasteltujen arvojen pohjalta voidaan kuitenkin päätellä, että alkuainepitoisuuksissa on pitkälti käyttökohteesta riippuvia, huimia vaihteluita. Erot ovat suuria erityisesti lyijyn kohdalla. Sen pitoisuudet voivat olla erittäin korkeita.

**Taulukko 19.** Rakennusjätteestä ja jätetuusta valmistettujen kierrätyspolttoaineiden, puhtaan puun sekä eri kyllästepuiden alkuainepitoisuuksia.

Ominaisuudet	Yksikkö	Rakennus 1	Rakennus 2	Rakennus 3 (ilman levymateriaalia)	Jätetuu 1	Jätetuu 2	Jätetuu 3	Jätetuu 4	Puhdas puu	Kyllästetty puu 1	Kyllästetty puu 2
		[86]	[78]	[78]	[78]	[1]	[26]	[62]	[78]	[78]	[97]
<b>Alkuperä</b>		Rakennusjäte	Rakennusjäte	Rakennusjäte	Rakennusjäte, arvot yksittäisistä näytteistä	Esilajiteltu rakennus-toiminnan puujäte	Pääosin rakennuspuujätettä	Purkupuu	Sahatavara, eri puolilta Suomea	Kyllästetty puu (epäorgaaninen aines)	CCA-sahatavara, mänty
<b>Julkaisu vuosi</b>		2001	2002	2002	2002	2005	2007	-	2002	2002	1999
<b>Keräysvuosi</b>		-	projekti 2000–2002	projekti 2000–2002	projekti 2000–2002	2000	1997–2007	2003	projekti 2000–2002	projekti 2000–2002	-
<b>Käsittely</b>		Murskaus, jauhatus, ei lajittelua	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	-	-	-	-
LHV, kuiva	MJ/kg	-	-	-	-	18,73	14,2	-	-	-	-
Kosteus	m-%	6,33	-	-	-	-	22,1	-	-	-	-
Kloori	m-%	0,0643	0,04 – 0,11	0,01	0,01 – 0,32	0,035	0,06	-	0,001 – 0,002	0,01	-
Rikki	m-%	0,069	-	-	0,01 – 0,05	0,02	0,04	-	-	0,02	-
Typpi	m-%	0,458	-	-	0,07 – 0,43	0,5	0,47	-	-	-	-
Kalium + natrium	m-%	0,27	-	-	0,08 – 0,15	0,11	0,16	-	-	-	-
Kalium	m-%	0,13	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-
Natrium	m-%	0,15	-	-	-	-	-	-	-	<0,05	-
Alumiini, metallinen	mg/kg	330	-	-	0	200	-	-	-	-	-
Alumiini, kokonais	mg/kg	3 855	-	-	-	600	-	-	-	600	-
Elohopea	mg/kg	-	<0,06	<0,06	0,01 – 0,02	<0,1	0,02	-	<0,1	-	-
Kadmium	mg/kg	0,726	0,22 – 0,4	0,2	0,09 – 1,03	0,29	0,36	<5	<0,05 – 0,17	-	-
Tuhka	m-%	7,35	-	-	-	1,7	1,9	-	-	-	-
Irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hiili	m-%	48,1	-	-	-	50,1	-	-	-	-	-
Vety	m-%	5,645	-	-	-	6,4	-	-	-	-	-
Happi	m-%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluori	mg/kg	-	-	-	-	<20	-	-	-	-	-
Kalsium	mg/kg	6 262	-	-	-	-	-	-	-	1 100	-
Magnesium	mg/kg	855	-	-	-	-	-	-	-	1 000	-
Antimoni	mg/kg	0,75	1,1 – 1,2	<1	<0,4 – 1,2	<3	3,7	<5	<2	<100	-
Lyijy	mg/kg	59,3	25 – 46	14	0,72 – 44,8	26	26	552	<1	-	-
Kromi	mg/kg	91,2	35 – 124	30	23 – 124	39	23	7,5	<4	3 700	14 200 – 19 100
Koboltti	mg/kg	1,88	0,9 – 9,2	<4	0,49 – 0,86	<4	0,8	<10	<4	-	-
Kupari	mg/kg	91,8	29 – 99	27	9 – 98,5	31	59	5,7	<4	700	5 930 – 7 100
Mangaani	mg/kg	89,8	70 – 81	72	78,3 – 82,5	72	81	73	54 – 102	100	-
Nikkeli	mg/kg	16,1	4,6 – 4,6	<4	4,6 – 9,8	<4	4,3	<10	<4	<100	-
Vanadiini	mg/kg	4,42	0,5 – 1,1	<4	0,5 – 0,57	<5	0,9	<10	<4	-	-
Tallium	mg/kg	-	<1	<1	<0,4 – <0,5	<1	0,5	-	<2	-	-
Fosfori	mg/kg	192	-	-	-	49	-	-	<30 – 87	200	-
Tina	mg/kg	-	0,8 – 1,9	<0,7	<0,3 – 0,84	<3	-	<2	<2	-	-
Sinkki	mg/kg	270	157 – 527	66	17,4 – 527	160	291	319	7 – 11	2 500	-
Arseeni	mg/kg	72,3	27,5 – 72	39	5,7 – 72,1	34	9,7	<10	<1	3 500	11 500 – 16 300
Bromi	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 4.4 Kotitalousjäte

### 4.4.1 Yleistä

Kotitalousjäte syntypaikkalajitellaan Suomessa kerrallaan 1–5 jakeeseen. Kaiken kaikkiaan lajittelussa käytössä olevia jakeita on kuitenkin enemmän. Niitä ovat esimerkiksi: biojäte, pahvi- ja paperipakkausjäte, keräyspaperi, kaatopaikkajäte, energiajäte, metalli, lasi, keräyspaperi, kuivajäte, märkäjäte (biojäte, märät ja likaiset pakkaukset sekä paperit) sekä kuiva jäte. Kunta-/seutukohtainen variaatio lajitelluissa jakeissa on suurta. [28]

### 4.4.2 Erillislajiteltu energiajäte

Kotitalouksilta erilliskerätty energiajäte koostuu pääosin muoveista, erityyppisistä kuituvalmisteista, muusta palavasta aineesta sekä epäpuhtauksista. Kuituvalmisteet koostuvat lähinnä paperista ja pahvista. Sekä muovien että kuitutuotteiden osalta energiajäte on suurimmaksi osaksi pakkausjätettä. Muu palava aines koostuu lähinnä hygieniatuotteista ja tekstiileistä. Kotitalousjätteen mukana tulevia epäpuhtauksia ovat mm. biojäte, hiekka/kivi/betoni, kodinkoneet, lasi, alumiini ja muut metallit, posliini/keramiikka, sähkötarvikkeet, yhdistelmäateriaalit, muu palamaton jäte sekä ongelmajätteet. Epäpuhtauksista selvästi eniten on biojätettä. Huomioitavaa on suuri kuitujätteen osuus energiajätteestä. [28]

Taulukossa 20 on esitetty eri menetelmillä syntypaikkalajiteltujen kotitalousjätteiden koostumuksia. Lahden jäte on erillislajiteltua energiajätettä, joka ei oikein lajiteltuna sisällä kaatopaikkajätettä, lasia, metallia, kierrätettäviä paperi- tai pahvituotteita tai biojätettä. Jyväskylän jätteet puolestaan ovat kuivajätettä, josta biojäte, lasi, metalli, paperi ja pahvi lajitellaan pois. Pietarsaassa jätteet on eroteltu kuivaan ja märkään jätteeseen, joista taulukossa on esitetty kuivajäte [28].

**Taulukko 20.** Syntypaikkalajitellun kotitalousjätteen fraktioiden kertymät Lahdessa, Jyväskylässä ja Pietarsaassa [28].

Paikka	Jätefraktio, % kokonaismassasta			
	Muovit	Kuitu	Muu palava	Epäpuhtaudet
Lahti, energiajäte	35	49	4	8
Jyväskylä, kuivajäte	15	23	20	40
Pietarsaari, kuivajäte	19	25	13	40

### 4.4.3 Alkuainepitoisuudet

#### **Kotitalousjätteen yksittäisten komponentit ja materiaalit**

Kotitalousjätteiden lyijystä ja kadmiumista suurin osa tulee määrällisesti vähäisistä, mutta pitoisuuksiltaan korkeista lähteistä. Tutkimuksen mukaan noin 91 % kotitalousjätteen lyijystä on peräisin juuri näistä korkeita pitoisuuksia sisältävistä komponenteista, kuten elektroniikkalaitteista, akuista/paristoista, lyijyputkista, maaleista ja kristallilasista [98]. Mainituista komponenteista oikein lajiteltujen kierrätyspolttoaineiden tai syntypaikkalajitellun energiajätteen kannalta oleellisia ovat ainoastaan maalit.

Lyijyä sisältävät kuitenkin myös mahdollisesti REF-polttoaineeseen päätyvät jakeet, kuten paperi, muovi, tekstiilit, kumi ja nahka. Jos korkean pitoisuuden lähteet jätetään huomiotta, mainitut materiaalit muodostavat yli 70 % jäljelle jäävän jätteen lyijystä. Erityisesti nahka ja kumi, jotka erottuvat joukosta korkeimmilla pitoisuuksilla (taulukko 21). Muovituotteissa lyijyn pitoisuudet olivat korkeita erityisesti leluissa ja urheiluvälineissä sekä yksivärisissä tuotteissa [98].

Lajittelemattoman kotitalousjätteen kadmiumista puolestaan vielä suurempi osuus (noin 93 %) aiheutui akuista/paristoista. Loput (noin 7 %) jätevirran kadmiumista on peräisin papereista, muoveista, nahkasta ja muista lähteistä [98].

Kotitalousjätteessä myös valtaosa (62 %) antimonista koostui suurista pitoisuuksia sisältävistä jätefraktioista. Näitä ovat muun muassa verhot ja liinavaatteet (polyesterikuitu), joissa antimonia on käytetty palonestoaineena ja polykondensaation katalyyttinä. Loppuosa antimonista oli peräisin muun muassa elektroniikan kuorista ja tekstiileistä [98].

Suurimpia kloorin lähteitä kotitalousjätteessä olivat PVC-pakkaukset sekä nahka. Myös kumi ylsi pitoisuudeltaan listan kärkipäähän. Kalium+natrium-yhdistelmää esiintyi selvästi eniten hygienia tuotteissa [28]. Taulukossa 21 on listattu kotitalousjätteen sisältämien yksittäisten komponenttien ja materiaalien kloorin, rikin, kaliumin+natriumin, kadmiumin, elohopean, lyijyn ja antimonin pitoisuuksia. Lisäksi taulukossa 22 on vielä eritelty tarkemmin eri muovituotteiden lyijyn ja kadmiumin pitoisuuksia.

**Taulukko 21.** Kirjallisuudessa esiintyviä kotitalousjätteen sisältämien materiaalien ja yksittäisten komponenttien kloorin, rikin, kaliumin+natriumin, kadmiumin, elohopean, lyijyn ja antimoniin pitoisuuksia [28, 98, 3].

Materiaali/komponentti	Kloori (m-%)	Rikki (m-%)	Kalium+natrium (m-%)	Kadmium (mg/kg)	Elohopea (mg/kg)	Lyijy (mg/kg)	Antimoni (mg/kg)	
Kuidut:								
Pehmopaperi	0,35	0,04	0,42	0,2	<0,1	-	-	
Kartonki + pahvi	0,20	0,07	0,14	0,2	0,3	-	-	
Kartonki- ja pahvipakkaukset	0,34	0,08	0,25	0,1	<0,1	-	-	
Paperipakkaukset	0,28	0,07	0,27	0,1	<0,1	-	-	
Sanomalehdet	0,13	0,07	0,21	<0,1	<0,1	-	-	
Aikakauslehdet	0,04	0,03	0,14	<0,1	<0,1	-	-	
Nestepakkauskartonki	0,59	0,07	0,24	0,2	<0,1	-	-	
Muu paperi	0,20	0,04	0,18	0,4	<0,1	-	-	
Muovit:								
Kalvomuovi	0,65	0,1	0,19	0,4	0,8	-	-	
Kalvomuovipakkaukset	1,00	0,06	0,35	0,1	0,1	-	-	
Kovamuovipakkaukset	1,40	0,09	0,22	5,4	<0,1	-	-	
Kova muovi	2,38	0,11	0,1	16	0,7	-	-	
PVC-muovipakkaukset	5,86	0,12	0,04	0,8	<0,1	-	-	
PVC-muovi	21,63	0,14	0,04	1,1	0,3	-	-	
Muut:								
Puu	0,10	0,04	0,14	< 0,1	0,7	<0,1	19	0,42
Kumi	3,07	0,29	0,08	0,75	3,7	<0,1	47	8,4
Nahka	7,70	0,32	0,08	3	23	<0,1	168	2,8
Alumiinilaminaatti	1,80	0,09	0,26	0,4	<0,1	-	-	
Tekstiilit	0,3	0,4	0,32	0,1	1,8	<0,1	11,2	25,9
Vaatteet (polyesterikuitu)	-	-	-	-	-	-	-	127
Täytetyt lelut	-	-	-	-	-	-	-	156
Liinavaatteet	-	-	-	-	-	-	-	156
Verhot	-	-	-	-	-	-	-	2 100
Hygieniatuotteet	0,41	0,07	6,46	<0,1	<0,1	-	-	
Keramiikka	-	-	-	2,8	-	240	0,5	
Keittiöjäte (roskat)	0,9	1,4	-	0,96	-	4,5	1,4	
Lasi	-	-	-	0,1	-	2,5	47	
Metalli	-	-	-	0,1	-	3,4	1,2	
Maali (arvio)	-	-	-	-	-	710 000	-	
Pb-paristot	-	-	-	-	-	650 000	-	
Ni-Cd-paristot	-	-	-	160 000	-	-	-	
Pienelektroniikka	-	-	-	-	-	77 000	-	
Hehkulamppu	-	-	-	-	-	120 000	-	



**Taulukko 22.** Kotitalousjätteen sisältämien yksittäisten muovituotteiden lyijyn ja kadmiumin pitoisuuksia [98].

Muovituote	Lyijy mg/kg	Kadmium mg/kg
PVC		
Moniväriset		
Lelut ja urheiluvälineet	9,2	4,7
Kertakäyttötuotteet ym.	47	< 0,1
Valkoinen/keltainen		
Pullo	5,4	<0,1
Muut yksiväriset		
Pullo, elintarvike	22,5	< 0,1
Astiat ja pakkaukset, elintarvike	3,8	0,1
Pullo	11,7	< 0,1
Astiat ja pakkaukset	21,6	< 0,1
Kääre/pakkaus	8,7	< 0,1
Muut muovit		
Lelut ja urheiluvälineet	2,3	1,3
Kertakäyttötuotteet ym.	< 2,3	< 0,1
Ruokailuvälineet	< 2,3	< 0,1
Elintarvikepussit	2,3	< 0,1
Muut	16,7	0,1
Pullo, elintarvike	19,7	< 0,1
Astiat ja pakkaukset, elintarvike; valk.	4	0,1
Astiat ja pakkaukset, elintarvike; kelt.	< 2,3	< 0,1
Pullo	8,5	< 0,1
Styroxmuovipakkaus; valk.	5,4	< 0,1
Styroxmuovipakkaus; kelt.	< 2,3	< 0,1
Kassi; valk.	16	< 0,1
Kassi; kelt.	54	< 0,1
Pussi, yleis	10,1	< 0,1
Pullo, elintarvike	6,1	< 0,1
Astiat ja pakkaukset, ruoka	5,8	< 0,1
Pullo, yleis	< 2,3	< 0,1
Kassi	8	< 0,1
Pussi, elintarvike	39,9	< 0,1
Pussi, yleis	35,2	< 0,1

### Kotitalousjätteestä valmistettu kierrätyspolttoaine

Kotitalousjätteen kohdalla aineisto koostui useasta eri tavalla lajitellusta jakeesta. Jakeista kuitenkin erottui selvästi useita keskenään vertailukelpoisia pareja. Mekaanisesti lajitellut kuivajätejakeet ('Kotitalous 3, mek.' Jyväskylästä ja 'Kotitalous 4' Pietarsaaresta) olivat alkuainepitoisuuksiltaan hyvin samankaltaisia. Pietarsaarella on käytössä kaksipussijärjestelmä (märkä jäte mustaan muovipussiin ja kuivajäte valkoiseen), jossa eriväriset pussit lajitellaan mekaanisesti. Menetelmä ei siis aiheuttanut eroa jätteiden pitoisuuksissa, kun verrataan Jyväskylän ”perinteiseen” järjestelmään, jossa kuivajätteestä lajitellaan pois lasi, metalli, paperi, pahvi ja biojäte.

Lahden energijätteen ('Kotitalous 1, man.') ja Båtkyrkan polttokelpoisen jätteen ('Kotitalous 2) alkuainepitoisuudet oli keskenään usein samaa luokkaa, mutta eroja oli silti hieman edellistä paria

enemmän. Suurimmillaan ero oli kadmiumilla, jonka pitoisuus Lahdessa oli noin 20-kertainen Båtkyrkaan verrattuna. Båtkyrkan kobolttipitoisuus puolestaan oli noin 10-kertainen verrattuna Lahden arvoon. Muuten erot olivat pienempiä, ja korkeampi pitoisuus vaihteli alkuperien välillä alkuaineittain. Melkein 10 vuoden ajanjakso keräysajankohtien välillä ei ole aiheuttanut mitään selvää eroa jätteiden pitoisuuksissa. Selviä syitä havaittuihin eroihin ei löytynyt.

Erilliskerätyn energiajätteen/polttokelpoisen jätteen (man.) pitoisuudet erottuivat lähes kaikkien alkuaineiden osalta kuivajätteen pitoisuuksia pienempinä. Sama toistui myös, kun vertailtiin vastaavia mekaanisesti lajiteltuja jakeita. Yleisesti ottaen mekaanisesti lajitellun (mek.) energiajätteen/polttokelpoisen jätteen pitoisuudet olivat keskenään samalla tasolla. Eroja laitosten kyvyssä poistaa eri alkuaineita polttoaineesta oli kuitenkin havaittavissa. Taulukossa 23 on esitetty kirjallisuuden arvot kotitalousjätteelle.

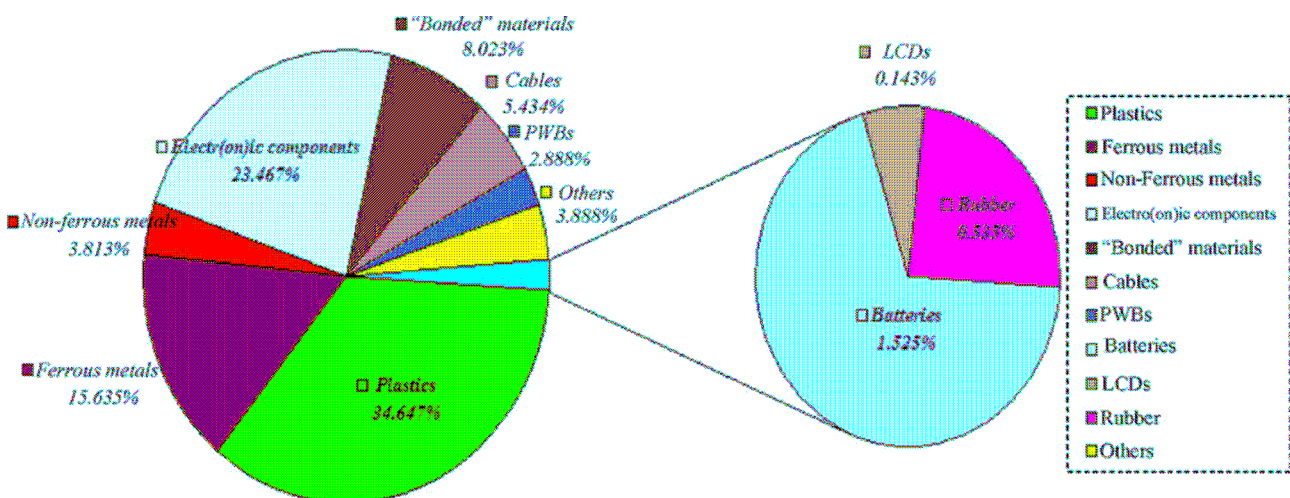
**Taulukko 23.** Kotitalousjätteestä valmistetun kierrätyspolttoaineen alkuainepitoisuuksia.

Ominaisuudet	Yksikkö	Teollisuus [26]	Kauppa 1 [28]	Kauppa 2 [86]	Kauppa ja teollisuus 1 [26]	Kauppa ja teollisuus 2 [85]	Kauppa, teollisuus ja toimisto [69]	Kauppa, teollisuus ja kuluttaja [85]	Yritys ja teollisuus [1]	Yritys ja teolli- suus (pelletti) [1]
Alkuperä		Pakkaustuote- teollisuuden tuotantojäte	Kuiva- /energiajäte	Pakkaus- jäte	Kuivajäte, rakennus- /purkujäte	Teollisuuden ja yritysten jäte	Erilliskerätyt energiajäte, rakennus-/purkujäte, pakkaus- ja tuotantojäte	Teollisuuden ja yritysten jäte sekä erilliskerätty kuluttajien muovijäte	Polttokelpoinen jäte	Polttokelpoinen jäte + pakkausteol. tuotantojäte
Julkaisuvuosi		2007	2005	2001	2007	2008	2010	2008	2005	2005
Keräysvuosi		2000–2002	1999	-	1997–2007	2007	-	2007	2000	2000
Käsittely		teollinen (kaupallinen)	Palava jäte (myös PVC) eroteltu käsin	Murskaus, jauhatus, ei lajittelua	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	Murskaus ja magn. materiaalien erottelu	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)	teollinen (kaupallinen)
LHV, kuiva	MJ/kg	22,3	-	-	16,7	23,7 – 26	23,51 – 23,56	25,2 – 25,8	21,0	22,3
Kosteus	m-%	8,4	18,1	4,18	18,2	~18	18,1 – 18,3	~25 – 27,5	16	0,83
Kloori	m-%	0,06	1,04	0,14	0,28	0,4 – 0,42	0,44 – 0,46	1,02 – 1,34	0,18	0,42
Rikki	m-%	0,1	0,06	0,10	0,13	0,16 – 0,2	0,15	0,2 – 0,3	0,06	0,09
Typpi	m-%	0,88	0,32	0,33	0,71	0,6 – 0,7	0,48 – 0,79	0,6 – 1	0,9	0,3
Kalium + natrium	m-%	0,15	0,21	0,54	0,24	0,14 – 0,16	0,29 – 0,31	0,11 – 0,13	0,08	0,13
Kalium	m-%	-	-	0,23	-	0,04 – 0,05	0,09 – 0,13	0,04 – 0,04	-	-
Natrium	m-%	-	-	0,31	-	0,1 – 0,11	0,19 – 0,20	0,07 – 0,09	-	-
Alumiini, metallinen	mg/kg	-	700	490	-	-	-	-	300	1700
Alumiini, kokonais	mg/kg	-	-	7094	-	-	-	-	3300	6100
Elohopea	mg/kg	0,008	<0,09	-	0,06	-	-	-	<0,1	<0,06
Kadmium	mg/kg	0,03	3	0,17	0,63	<1,2 – 5	-	4 – 10	0,37	0,7
Tuhka	m-%	5,0	2,6	11,38	6,4	7,6 – 8,6	7,5	10,4 – 11,9	5,4	6,8
Irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hilti	m-%	-	71,8	47,13	-	56,9 – 60,5	54,9 – 55,1	59	51,5	54,4
Vety	m-%	-	10,2	6,32	-	7,4 – 8,5	7,6	8,5	6,8	7,8
Happi	m-%	-	-	-	-	22,9 – 26,4	29,1	17,5 – 21,2	-	-
Fluori	mg/kg	-	<100	-	-	-	-	-	<20	<50
Kalsium	mg/kg	-	-	10737	-	13000 – 15000	17800 – 19100	14000 – 19500	-	-
Magnesium	mg/kg	-	-	1079	-	-	-	-	-	-
Antimoni	mg/kg	7	3,4	0,64	140	15 – 37	-	34 – 62	14	12
Lyijy	mg/kg	3,6	18	12,4	59	16 – 57	-	75 – 140	39	57
Kromi	mg/kg	5,2	48	74,9	110	36 – 120	-	160 – 170	38	24
Koboltti	mg/kg	4,7	0,8	1,46	6,6	6 – 7	-	9 – 10	51	<4
Kupari	mg/kg	15	60	75,22	870	97 – 450	-	44 – 79	170	114
Mangaani	mg/kg	22	15	72,2	105	79 – 85	-	83 – 100	50	130
Nikkelä	mg/kg	2,7	<7	26,9	41	38 – 41	-	9 – 14	6,7	3,7
Vanadiini	mg/kg	1	<4	3,81	5,2	4	-	7 – 8	<5	4,1
Tallium	mg/kg	0,5	<1	-	0,8	<12	-	<0,5	<1	<1
Fosfori	mg/kg	-	180	307	-	-	-	-	71	180
Tina	mg/kg	-	43	-	-	<12 – 14	-	29 – 31	5,5	8,2
Sinkki	mg/kg	170	110	60,2	360	160 – 170	-	260 – 320	400	310
Arseeni	mg/kg	0,5	<4	1,56	5,3	<6	-	3 – 53	31	12
Bromi	mg/kg	-	-	-	-	-	40 – 205	-	-	-
Barium	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 4.5 Elektroniikkajäte — waste electrical and electronic equipment (WEEE)

### 4.5.1 Yleistä

Elektroniikkajäte (WEEE) on yksi jätefraktio, jota voidaan käyttää kierrätyspolttoaineiden valmistamisessa. Se koostuu suureksi osaksi muoveista, magneettisista ja ei-magneettisista metalleista sekä mm. useista materiaaleista koostuvista komponenteista. Lisäksi elektronisten laitteiden mukana saattaa olla haitallisia aineita sisältäviä paristoja, akkuja yms. Kuvassa 12 on esitelty kotitalousjätteestä erotellun elektroniikkajätteen koostumusta. [4]



**Kuva 12.** Kotitalousjätteestä erotellun elektroniikkajätteen koostumus (m-%) vuonna 2006 [4].

**Taulukko 24.** Eri elektronisissa laitteissa yleisesti käytettäviä muoveja [100].

Tuote	PE	PP	PVC	PS	ABS	PC	PA	PET	Muut
Suuret kodinkoneet (jäälkaappi, pesukone..)	x		x	x	x	x	x	x	PU
Pienet kodinkoneet (imuri, paahdin...)	x	x	x	x	x	x	x		Epoksi
ATK (tietokone, oheislaitteet...)	x	x	x	x	x		x	x	Epoksi, PU
Viihde-elektroniikka (tv, radio...)		x	x	x	x	x	x	x	PET
Viestintälaitteet (puhelin, faksi...)					x	x			
Muut sähkölaitteet (pora, hiomalaite...)						x	x	x	Kertamuovit
Toimistovälineet (kopio- ja kirjoituskone..)	x	x	x	x	x	x	x	x	Epoksi, PU
Hoitolaitteisto			x		x		x		
Kaapelit	x		x						

Yleisimpiä polymeerejä kotitalouksien elektroniikkajätteessä ovat akryylinitriilibutadienistyreeni (ABS, n. 37 %), polypropeeni (PP, n. 29 %), polystyreeni (PS, n. 19 %) sekä polykarbonaatti (PC, n. 5 %) ja polyvinyylidikloridi (PVC, n. 5 %) [4]. Muovit kuitenkin kehittyvät nopeasti, minkä lisäksi

elektroniikkalaitteiden elinkaaret lyhenevät. Nämä seikat aiheuttavat tutkimustiedon nopean vanhenemisen. Erityisesti muovien lisäaineiden, kuten palonestoaineiden koostumukset muuttuvat nopeasti. Taulukossa 24 on esitetty esimerkkejä eri polymeerien käyttökohteista.

#### 4.5.2 Bromia sisältävät palonestoaineet elektroniikassa

Association of Plastics Manufacturers in Europe:n (APME) selvityksen mukaan vuonna 2000 kaikesta elektroniikassa käytetystä muovista noin 30 % sisälsi palonestoaineita. Tällöin 41 % palonestoaineista oli halogenoituja ja loput halogeenejä sisältämättömiä [100]. Kuten aiemmin työssä on mainittu, erityisesti bromin pitoisuudet ovat olleet ympäristöaspektien sekä palamiskemian takia mielenkiinnon kohteina. Yleinen pyrkimys on myös siirtyminen pois bromia sisältävistä palonestoaineista. Pyrkimyksistä huolimatta bromipitoisilla aineilla on yhä vahva asema, sillä myös vuonna 2006 kerätyn aineiston laitteista bromia sisälsi noin puolet. Suurimmassa osassa tapauksista antimoni-trioksidia ( $Sb_2O_3$ ) oli käytetty tehostimena [4].

Bromia sisältäviä palonestoaineita (BFR) elektroniikassa on eniten laitteiden koteloinnissa sekä piirilevyissä [100]. Bromipitoisia palontorjunta-aineita kustakin elektroniikkalaiteryhmästä sisältää seuraavanlaiset osuudet (APME, TN Sofres:in selvityksen mukaan):

Toimistovälineet, tietokoneet, tietoliikennevälineet	53%
Viihde-elektronikka	22%
Muut sähkölaitteet	16%
Teollisuuden sähkölaitteet	7%
Kotitaloustuotteet	2% [100].

Vuonna 2000 tetrabromobisfenoli (TBBPA) oli selvästi suosituin BFR koko markkinoilla, yli 50 %:n osuudella [100]. Taulukossa 25 on esitelty vuosina 2006 ja 2008 kerätyn kotitalouksien elektroniikkajätteen bromia sisältäviä palonestoaineita.

**Taulukko 25.** Bromia sisältävien palonestoaineiden pitoisuuksia vuosina 2006 ja 2008 kerätyissä piirilevyissä sekä kotitalouksien elektroniikkajätteessä (laskennallinen koostumus) [101].

Palonestoaine	Yksikkö	Piirilevy	WEEE
TBBPA	mg/kg	26,9	1,46
HBCD	mg/kg	10	0,54
Penta-BDE	mg/kg	27,9	1,51
Tri-BDE	mg/kg	0,4	0,02
Octa-BDE	mg/kg	10	0,54
Deca-BDE	mg/kg	27	1,3
4-Bromifenyylieetteri	mg/kg	0,2	0,01

### 4.5.3 Alkuainepitoisuudet

Taulukossa 26 on esitetty itävaltalaisien kotitalouksien elektroniikkajätteen sisältämien yksittäisten komponenttien haitta-aineita.

**Taulukko 26.** Yksittäisten komponenttien sisältämiä haitta-aineita itävaltalaisien kotitalouksien elektroniikkajätteessä [101].

Komponentti	Merkittävät haitalliset yhdisteet	Merkitys
Kondensaattori	PCB-yhdisteet, korvaavat aineet (substitute substances; naftaleeni, dietyyliheksyyliftalaatti)	PCB-yhdisteiden määrä luultavasti alenee kiellon takia.
Piirilevy	(Raskas) metallit (esim. Pb, Hg, Cd, Ni, Cr, Sb, Bi, Be, As), bromia sisältävät palonestoaineet, orgaaniset pehmenysaineet	Merkittävä haitallisten aineiden lähde WEEE:ssä.
Akut/paristo	Raskasmetalleja (esim. Cd, Pb, Hg, Co), elektrolyyttejä (esim. litium, hexafluorofosfaatti)	Merkittävä haitallisten aineiden lähde WEEE:ssä.
Värijauhe- ja mustekasetit (tulostimista)	Värijauhe (pääosin raskasmetalleja, org. tinayhdisteitä)	Melko alhainen pitoisuus haitallisia aineita
LCD-paneelit	Raskasmetalleja (Hg, As), nestekideaineita	Verraten alhainen pitoisuus elohopeaa taustavalosta. LCD-jätteen määrää tulee nousemaan tuntuvasti. Mahdollinen arsenikin leviäminen murskauksessa.

Kirjallisuuden arvot elektroniikkajätteen sisältämille alkuainepitoisuuksille olivat yleisesti linjassa keskenään. Vertailukelpoisten sekajakeiden kohdalla poikkeuksia linjasta oli kuitenkin antimonin, kuparin ja kalsiumin kohdalla. 'WEEE 2' (kotitaloudet) ja 'WEEE 7' (yleinen) -jakeiden antimonin arvot poikkesivat selvästi muuta aineistoa matalampina. Selvää selitystä eroille ei käsittelyn tai alkuperän perusteella voitu päätellä. 'WEEE 2':n osalta bromin tiedot puuttuivat, mutta 'WEEE 7':n bromipitoisuus oli silti korkea. Tästä seuraa bromi-antimoni -suhteen erittäin korkea arvo muuhun kirjallisuuteen verrattuna. Kirjallisuuden arvoja matalampi bromi-antimoni-suhde saattaa viitata antimonin käytöstä muiden kuin bromipitoisten palonestoaineiden tehostimena tai antimonin käytöstä palonestoaineena sellaisenaan. Kaikkein korkeimmat antimonin arvot olivat TV- ja PC-koteloissa ('TV-kotelot' ja 'TV/PC-kotelot' -jakeet).

Kuparin arvoissa oli havaittavissa suurta hajontaa. Teollisuuden elektroniikkajätteen ('WEEE 5') sekä piirilevyjätteen ('Piirilevy 1–3' -jakeet) kuparipitoisuudet olivat selvästi muita korkeampia. Teollisuuden arvot erosivat selvästi korkeampina myös saman raportin kotitalouksien sekä yritysten ('WEEE 1 ja 3') elektroniikkajätteen vastaavista arvoista. Tutkimuksen pitoisuuksien mittauksessa menetelmät olivat samat, mutta jätteiden käsittely tapahtui eri laitoksissa. Suurin eroja aiheuttava

tekijä lienee kuitenkin ollut itse materiaali. Erot kalsiumin arvoissa johtuivat lähinnä teollisuuden elektroniikkajätteestä, jonka pitoisuus oli muita jakeita korkeampi. Taulukoissa 27 ja 28 on esitelty kirjallisuudesta löytyvien elektroniikkajätejakeiden alkuainepitoisuuksia.

**Taulukko 27.** Polttoaineeksi tarkoitettujen käsitellyn elektroniikkajätteen sisältämien alkuaineiden pitoisuuksia.

Ominaisuudet	Yks.	WEEE 1 vain polymeerit [77] Kotitaloudet	WEEE 2 laskennal. [101] sWEEE, kotitaloudet	WEEE 3 vain polymeerit [77] Yritykset	WEEE 4 vain polymeerit [80] Kotitaloudet, yritykset	WEEE 5 vain polymeerit [77] Teollisuus	WEEE 6 [100] Yleinen	WEEE 7 [102] Yleinen	WEEE 8 [102] Kirjallisuuden arvot kootusti
Alkuperä									
Julkaisu vuosi		1997	2011	1997	2006	1997	2002	2006	2006
Keräysvuosi		1993, 1994	2006, 2008	1992	2003	-	2000	2004	-
Käsittely		Käsin purku, murskaus ja lajittelu	Useita vaihtoehtoisia esikäsittelyjä,	Osittainen käsin purku, teollinen murskaus ja lajittelu	Käsin purku ja lajittelu, teollinen murskaus ja lajittelu	Purku, teollinen murskaus ja lajittelu	Murskaus ja lajittelu	Esilajittelu ja -purku, teollinen murskaus ja lajittelu	-
LHV, kuiva	MJ/kg	35	-	32	-	25,5	25,4 – 31,0	23,1	9 – 20
Kosteus	m-%	-	-	-	-	-	-	-	2 – 5
Kloori	m-%	0,39	-	1,1 – 2,3	0,86	0,19	3,1 – 5,6	1,61	0,5 – 6
Rikki	m-%	-	-	-	-	-	0,1 – 0,1	-	-
Typpi	m-%	-	-	-	-	-	2,8 – 2,9	-	-
Kalium + natrium	m-%	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalium	m-%	0,11	-	0,15 – 0,31	-	0,14 – 0,27	0,007 – 0,081	-	-
Natrium	m-%	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumiini, metallinen	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumiini	mg/kg	-	-	-	19 000	-	-	-	-
Elohopea	mg/kg	-	3,5	-	0,31	-	-	1,07	1 – 49
Kadmium	mg/kg	240	213	123 – 124	160	29 – 94	70,0 – 110,0	58	2 – 85
Tuhka	m-%	3 – 5	-	3 – 5	-	-	10,6 – 18,9	21,2	28 – 61
Irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
Hiili	m-%	-	-	-	-	-	56,6 – 67,4	57,2	20 – 40
Vety	m-%	-	-	-	-	-	6,0 – 6,8	5,67	2 – 6
Happi	m-%	-	-	-	-	-	8,2 – 8,2	-	-
Fluori	mg/kg	-	-	-	-	-	-	800	100 – 800
Kalsium	mg/kg	1 200	-	2 500 – 2 550	-	50 000 – 73 900	1 260 – 9 980	-	-
Magnesium	mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Antimoni	mg/kg	2 000	42,1	1 950 – 13 200	3 500	2 200 – 3 500	6 950 – 7 190	169	50 – 10 000
Lyijy	mg/kg	146	1 780	96 – 152	1 900	1 890 – 2 050	1 010 – 3 500	932	1 100 – 11 000
Kromi	mg/kg	63	35,7	164 – 250	900	140 – 384	6 – 70	93	1 000 – 1 800
Koboltti	mg/kg	-	129	-	-	-	-	18,9	13 – 33
Kupari	mg/kg	1 900	-	82 – 1 140	18 000	77 500 – 105 000	80 – 2 720	12 274	3 700 – 26 300
Mangaani	mg/kg	-	77,4	-	-	-	4 – 60	147	360 – 1 100
Nikkeli	mg/kg	88	800	550 – 780	1 300	170 – 200	8 – 110	127	400 – 1 500
Vanadiini	mg/kg	36	-	155 – 880	-	149 – 900	-	2,6	20 – 150
Tallium	mg/kg	-	-	-	-	-	-	0,6	-
Fosfori	mg/kg	250	-	2 600	1 200	8 150	-	-	-
Tina	mg/kg	85	312	63 – 880	2 300	1 230 – 2 130	580 – 935	26	130 – 400
Sinkki	mg/kg	620	-	1 540 – 3 350	2 300	4 720 – 5 100	40 – 850	964	4 600 – 20 000
Arseeni	mg/kg	9	7,97	29 – 38	-	45 – 46	15 – 18	6,4	20 – 50
Bromi	mg/kg	4 290	-	15 000 – 41 100	-	5 750 – 12 550	13 100 – 17 400	40 800	5 000 – 60 000
Barium	mg/kg	250	-	590	-	571 – 580	390 – 390	-	-



**Taulukko 28.** Polttoaineeksi tarkoitetun käsitellyn elektroniikkajätteen komponenttien sisältämien alkuaineiden pitoisuuksia.

Ominaisuudet	Yks.	TV-kotelot	TV/PC - kotelot	Piirilevy, TV	Piirilevy	Piirilevy	Elektroniikan muovit
		[100]	[80]	[103]	[100]	[80]	[77]
Jättemateriaali		Televisioiden muovikuoria	Kotitaloudet ja yritykset	Televisioiden pääpiirilevyjä	Elektroniikasta kerättyjä piirilevyjä	Kotitaloudet ja yritykset	Arvioon perustuva
Julkaisuvuosi		2002	2006	2007	2002	2006	1997
Keräysvuosi		2000	2003	-	2000	2003	n. 1995
Käsittely		Murskaus ja lajittelu	Käsin purku ja lajittelu, teollinen	Laboratoriota son käsittely, n = 12	Murskaus ja lajittelu	Käsin purku ja lajittelu, teollinen	-
LHV, kuiva	MJ/kg	35,7 – 38,0	-	-	16,0	-	-
Kosteus	m-%	-	-	-	-	-	-
Kloori	m-%	0,2 – 1,9	2	-	2,3	0,68	3,86
Rikki	m-%	0,02 – 0,03	-	-	0,2	-	-
Typpi	m-%	0,7 – 1,0	-	-	1,9	-	-
Kalium + natrium	m-%	-	-	-	-	-	-
Kalium	m-%	<0,002 – 0,075	-	-	0,072	-	0,22
Natrium	m-%	-	-	-	-	-	-
Alumiini, metallinen	mg/kg	-	-	-	-	-	-
Alumiini	mg/kg	-	44 000	62 000	-	27 000	-
Elohopea	mg/kg	-	1,2	-	-	1,7	-
Kadmium	mg/kg	13 – 70	78	12	40	500	41
Tuhka	m-%	1,2 – 1,2	-	-	48,0	-	-
Irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-
Häili	m-%	81,5 – 82,2	-	-	53,7	-	-
Vety	m-%	7,1 – 7,2	-	-	5,6	-	-
Happi	m-%	1,1 – 3,2	-	-	8,4	-	-
Fluori	mg/kg	-	-	-	-	-	-
Kalsium	mg/kg	<10 – 1 000	-	-	17 620	-	7 000
Magnesium	mg/kg	-	-	-	-	-	-
Antimoni	mg/kg	10 900 – 23 980	16 000	3 200	5 730	2 100	2 630
Lyijy	mg/kg	145 – 220	230	14 000	4 960	12 000	1 890
Kromi	mg/kg	<1 – 27	150	57	220	1 100	53
Koboltti	mg/kg	-	-	36	-	-	-
Kupari	mg/kg	<1 – 140	380	72 000	66 200	170 000	137
Mangaani	mg/kg	<1 – 7	-	790	230	-	-
Nikkeli	mg/kg	<1 – 35	200	3 000	470	11 000	30
Vanadiini	mg/kg	-	-	-	-	-	900
Tallium	mg/kg	-	-	-	-	-	-
Fosfori	mg/kg	-	2 300	-	-	50	1 200
Tina	mg/kg	70 – 310	750	20 000	5 550	27 000	18
Sinkki	mg/kg	<1 – 305	280	5 300	1 310	19 000	292
Arseeni	mg/kg	20 – 55	-	-	40	-	47
Bromi	mg/kg	25 000 – 34 900	-	-	18 540	-	8 600
Barium	mg/kg	<20 – 290	-	2 400	770	-	-

## 4.6 Tulevaisuus

### Elektroniikkajäte

Työssä tarkasteltujen kierrätyspolttoaineiden raaka-aineiden tulevaisuuteen liittyvää tietoa oli tarjolla lähinnä elektroniikkajätteestä. Koostumuksen muutosnopeus on suuri laitteiden verraten lyhyen eliniän takia. Uudentyyppisten laitteiden aiheuttaman muutoksen lisäksi laitteiden sisältämiä haitallisia aineita on viime aikoina rajoitettu selvästi.

Tarkkoja tulevaisuudennäkymiä elektroniikkajätteen haitallisten aineiden pitoisuuksista on vaikea tehdä, mutta lainsäädäntö antanee viitteitä maksimipitoisuuksista tiettyjen alkuaineiden ja yhdisteiden osalta. Euroopan parlamentin ja neuvoston RoHS (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) direktiivin (2002/95/EY) [104] perusteella valtioneuvosto on antanut asetuksen 853/2004 vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa [73]. Sen mukaan 1.7.2006 alkaen markkinoille tuotavat uudet sähkö- ja elektroniikkalaitteet eivät saa sisältää lyijyä, elohopeaa, kadmiumia, kuuden arvoista kromia, polybromibifenyylä (PBB) tai polybromidifenyylieetteriä (PBDE, sisältää aiemmin mainitut tri-, penta-, okta- ja deka-bromodifenyylieetterin). Poikkeuksia sallitaan kuitenkin osassa seuraavista tapauksista: elohopea lamputissa, lyijy lasissa, metalliseoksissa ja juotosaineena, kadmium pinnoitteena sekä kuudenarvoinen kromi hiiliteräksen korroosionestossa absorptiojäähdytyskoneiden jäähdytysjärjestelmissä.

Sähkölaitteiden tyypillisen käyttöiän ollessa 7–10 vuotta [101] muutokset elektroniikkajätteen pitoisuuksissa lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuuden arvoisen kromin, polybromibifenyylin (PBB) tai polybromidifenyylieetterien (PBDE) osalta alkanevat näkyä muutaman vuoden kuluessa.

### Muut jakeet

Vuonna 2004 voimaan tullut valtioneuvoston asetus [88] asetti arseeni- ja elohopeayhdisteiden kyllästekäytölle selvästi aiempaa tiukemmat rajat. Arseeni- ja elohopeayhdisteiden käyttö puunsuojakemikaalina kiellettiin kokonaan, lukuun ottamatta arseenin kohdalla tiettyjä tapauksia kyllästetyn puun ammattimaisessa tai teollisuuskäytössä. Näin ollen rajoitukset vähentävät tulevaisuudessa myös kierrätyspolttoaineena käytettävän jätepuun arseeni- ja elohopea pitoisuuksia. Uuden tavaran valmistuksen kieltämisestä huolimatta kyllästettyä puuta kuitenkin päätyy edelleen puujätteeseen, kun vanhaa, käytöstä poistettua puuta hävitetään.

Tietoa muiden jätefraktioiden tulevaisuudennäkymistä oli niukasti saatavilla, minkä vuoksi päätelmiä niiden tulevaisuudennäkymistä ei voitu tehdä.

## **4.7 Kierrätyspolttoaineet — alkuainelähteet**

### **4.7.1 Kirjallisuudessa esitettyjä kierrätyspolttoaineisiin liittyviä alkuainelähteitä**

Yleisesti jättemateriaalien epäpuhtaudet ovat ihmisen valmistamissa materiaaleissa, kuten metalleissa, muoveissa, kyllästetyssä puussa, tekstiileissä, nahkassa, kumissa jne. Erityisesti polttoaineen Sn, Zn, Sb, Pb, Cu, Cr, Br ja Ba ovat peräisin lähinnä muoveista, kumista, metalliseoksista ja tekstiileistä [82].

#### **Alumiini**

Polttoaineessa alumiini voi esiintyä metallisena (mm. pakkausjäte [28] ja oksidina (mm. palonestoaineet [71]). Metallinen alumiini on erityisen hankala epäpuhtaus reaktiivisuutensa takia, sillä se hajottaa jopa vettä. Tällöin syntyvä vety voi syttyä kipinästä ja aiheuttaa räjähdysten esimerkiksi sähkösuotimessa [78, 105]. Oksidimuodossa alumiini taas on polton/kaasutuksen kannalta haitaton [78]. Täten myös palonestoaineena käytettävä alumiinitrihydroksidi on haitaton, koska se kuumentuessaan vapauttaa sisältämänsä veden ja jäljelle jää alumiinioksidia [70].

#### **Antimoni**

Antimonia käytetään palonestoaineena tai sen tehostimena. Antimonin aerosolimuodon esiintymisen polttoprosessissa on havaittu olevan selvässä yhteydessä bromin esiintymiseen. Tämä viittaa juuri antimonin käyttöön tehostimena. Antimonin, kalsiumin ja tinan yhtäaikainen korkea pitoisuus saattaa olla merkki polttoaineen sisältämistä kumisista tai muovisista kaapeleiden kuorista, joissa kalsiumia on ollut täyteaineena, tina stabilaattorina ja antimoni palonestoaineena. Antimoni polttoaineessa voi johtua myös juotostinasta tai muista metalliseoksista. Lisäksi maalien oranssi pigmentti, kumin vulkanointi ja puun kyllästys ovat antimonin käyttökohteita. [82]

#### **Barium**

Bariumia käytetään mm. lasin, maalien, kumin ja muovien valmistuksessa. Kumituotteista kirjallisuudessa on mainittu mm. autonrenkaiden valkoisissa sivuissa ja ovimatoissa. Muoveissa bariumia käytetään ainakin PVC:n ja polyuretaanin valmistuksessa [106].

## Bromi

Bromin ensisijainen käyttökohde kierrätyspolttoaineissa on palonestoaineet [71, 82].

## Kadmium

Suurina määrinä tulevasta jätteestä kadmiumia sisältävät mm. muovit, joiden pitoisuudet ovat kuitenkin verraten matalat. Korkeat piikit polttoaineen pitoisuuksissa voivat viitata esim. akkujen/paristojen esiintymiseen [98].

## Kalsium

Polttoaineen suuri kalsiumpitoisuus saattaa johtua mm. rakennus/purkujätteen mukana tulleesta kipsistä/kiintoaineksesta. Kalsiumkarbonaattia käytetään myös paperin ja pahvin täyteaineena ja päällysteenä sekä muovien lisäaineina. Muovin merkitys paperiin ja pahviin verrattuna on kuitenkin vähäinen [69].

## Kloori

Yleisen käsityksen mukaan jätemateriaalin kloori aiheutuu pääosin PVC:stä ja ruoka-aineista, jotka sisältävät ravintosuoloja [82]. Klooria tulee REF-polttoaineeseen kuitenkin myös muiden muovien mukana. Titaani(III)kloridia ( $\text{TiCl}_3$ ) käytetään magnesiumkloridin ( $\text{MgCl}_2$ ) tukemana polymeroinnin katalyyttinä polypropeenille (PP) ja polyeteenille (PE) [69].

## Kromi

Kierrätyspolttoaineessa kromia voi esiintyä mm. metallikappaleissa (seoksissa, pinnoitteena), keltaisessa ja vihreässä väriaineessa, kyllästetyssä puussa ja parkitussa nahkassa [82].

## Kupari

Vaikka kupari pääosin johtuu polttoaineen sisältämästä messingistä, myös kuparijohdot ja kyllästetty puu voivat olla esiintymisen syy. Kuparia voidaan myös käyttää katalyyttinä ja väriaineena muoveissa. Kuparin korkea pitoisuus yhdessä sinkin korkean pitoisuuden kanssa voi olla viite lasista polttoaineesta [82]. Kupari- ja sinkkikationeja käytetään lasinvalmistuksessa värien alusaineina [107].

## Lyijy

Kierrätyspolttoaineessa lyijyä voi suurina pitoisuuksina olla esim. maaleissa [98]. Lyijyä käytetään myös väriaineissa (mm. maaleissa, väriliiduissa ja muoveissa). Myös muovien (kaapelit ja johdot)

stabilointi on lyijyn käyttökohde [71]. Lyijyn ja kloorin yhtäaikainen esiintyminen voi olla indikaattori PVC:n esiintymisestä polttoaineessa [82]. Muovien lyijypitoisuus on yleisesti kuitenkin verraten matala. Mikäli suuria piikkejä arvoissa syntyy, on syytä epäillä suuria pitoisuuksia sisältävien tuotteiden, kuten akkujen/paristojen, maalien, elektroniikan (piirilevyjen) tai lyijyputkien esiintymistä polttoaineessa [98]. Myös lasitavara (erityisesti kristalli) saattaa sisältää suuria määriä lyijyä [98, 82].

#### Rauta

Rauta esiintyy kierrätyspolttoaineissa lähinnä metallina tai ruosteena. Rautaa saattaa kulkeutua polttoprosessiin myös jätevesilietettä poltettaessa. [82]

#### Sinkki

Yksi syy sinkin esiintymiseen polttoaineessa on ruostumisen estämiseksi pinnoitetut metallit, kuten galvanoidut naulat. Sinkin ja kuparin kohonneet arvot puolestaan voivat viitata messingin esiintymiseen. Sinkkiä käytetään useissa muoveissa happojen poistamiseen (acid scavenger), stabilaattorina ja täyteaineena. Lisäksi sinkkiä käytetään lasin värjäyksessä (ks. kupari), kyllästysaineena (puu), palonestoaineena (muovit) ja vulkanointiaineena (kumi), väripigmenttinä ja öljyn kovettimena [82].

#### Tina

Tinaa käytetään mm. muovin stabilaattorina sekä juotostinassa, joka on yleensä useiden metallien seos. Tinaa esiintyy kuitenkin myös muissa metalliseoksissa, kuten messingissä ja pronssissa. Näiden kohdalla yhteys kupariin ja sinkkiin on havaittavissa. [82]

Taulukossa 29 on esitetty tiivistetysti eri alkuaineiden lähteitä REF-polttoaineessa Vainikan ym. [82] mukaan.

## Taulukko 29. Eri alkuaineiden lähteitä REF-polttoaineessa [82].

Alkuaine	Lähde
Tina	Metalleissa ja seoksissa, muovin stabilointi, juotostina
Sinkki	Messinki, metallien sinkkipinnoitteet, kylläste, palonestoaineet, vulkanointiaine, väripigmentti, öljyn kovetin, ruosteesto, muovin stabilointi, happojen poisto (acid scavenger)
Antimoni	Metalliseokset, palonestoaineet, oranssi pigmentti maaleissa, vulkanointiaine, kyllästysaine
Lyijy	Messinki, juotostina, väripigmentti ("lyijyn valkoinen"), PVC:n stabilointi, polymeerikatalyytti, lasi
Rauta	jätevesiliete (ei tärkeä kiinteässä REFissä)
Kupari	Messinki, kyllästetty puu, katalyytti, väripigmentti
Kromi	Seoksissa, väri (keltainen ja vihreä), kyllästetty puu, kromipinnoitus, parkittu nahka
Bromi	Palonestoaine, puhdistusaine, desinfiointiaine
Barium	Muovin stabilointi, väriaine, lisäaine

### 4.7.2 Kaikki kirjallisuudessa esitetyt jätepohjaiset alkuainelähteet

Seuraavassa on listattu kaikkien LE:n listauksessa rajattujen alkuaineiden lähteitä jätemateriaaleissa. Alkuainelista on koottu lähteiden [98, 82, 69, 107, 92, 106] pohjalta.

#### Alumiini (Al)

Rakennusmateriaalit, paperi, keramiikka, filmi, tina, tulenkestävät materiaalit, metalliseokset, teräs, johteet, muovit, rasvahapot, voiteluöljyt

#### Antimoni (Sb)

Muovit, metalliseokset, elektroniikka, puolijohteet, akut/paristot, kumi (vulkanointiaineena), väriaineet, tekstiilit, kaapelit, metallipinnoitteet, lasi, pyrotekniikka, lääkkeet, paristokennot (elektrodi), sähköjohdot, palonestoaineet (muovit, kem. kuidut, kumi), kuvaputki (kuvaputki-TV, lasinkirkasteena), polyesteri (katalyyttinä), valkoinen maali, lasite, tulitikut (sytytysaine)

#### Arsenikki (As)

Savi, organometallit, maalit, lääkkeet, tuholaismyrkyt, elektroniikka, puolijohteet, kosmetiikka, lasi, metalliseokset, aurinkoparistot, lamput, nahka, hedelmätarhajäte (lehdet), rikkihappo, kyllästetty puu

#### Barium (Ba)

Rakennusmateriaalit, paperi, organometallit, lasi, tekstiilit, keramiikka, nahka, maalit, muovit (PVC, polyuretaani), kumi (mm. renkaiden valkoiset sisäreunat ja kumimatot), teräs, metalliseokset, väriaineet, elektroniikka, lamput, pyrotekniikka, lääkkeet, optiikka, voiteluöljyt, röntgenkuvat

#### Bromi (Br)

Orgaaniset aineet, muovit, lääkkeet, tuholaismyrkyt, galvanoidut materiaalit, valokuvat, väriaineet, polttoaineet

#### Elohopea (Hg)

Akut/paristot, lämpömittarit, pyrotekniikka, muovit (PVC), sienitorjunta-aine, lääkkeet, lamput, kasvintorjunta-aineet, metalliseokset, galvanoidut materiaalit, väriaineet, maalit, elektroniikka, loisteputki, kalantähteet

#### Fluori (F)

Orgaaniset aineet, muovit, kumi, hartsit, rakennusmateriaalit, tekstiilit, optiikka, polttoaineet, lasi, elektroniikka, ruoka-aineet, lääkkeet

#### Fosfori (P)

Orgaaniset aineet, muovit, pyrotekniikka, kumi, lakat, liimat, hammastahna, saippua, metalliseokset, tuholaismyrkyt, lannoitteet, teräs, puolijohteet, juote, tekstiilit, lääkkeet, väriaineet, voiteluöljyt

#### Happi (O)

Orgaaniset aineet, epäorgaaniset materiaalit

#### Hiili (C)

Orgaaniset aineet, paperi, muovit, kumi, hartsit, ruoka-aineet, rakennusmateriaalit, teräs, galvanoidut materiaalit, musteet, puhalteet, tulenkestävät materiaali, lyijykynät, voiteluöljyt, elektroniikka, lamput, paristot, lääkkeet, lannoitteet, tuholaismyrkyt

#### Kadmium (Cd)

Muovin stabilaattori (mm. PVC), paperi, organometallit, maalit, aurinkopaneelit, paristot, tulostusmuste, galvanoidut materiaalit, metalliseokset, juote, metallipinnoitteet, tekstiilit, puolijohteet, lasitettu keramiikka, paristokennot (elektrodi), sähkölaitteet, kultaukset, väripigmentit (kadmiumkelta ja -puna), puolijohteet, valokuvat

#### Kalium (K)

Rakennusmateriaali, orgaaninen aines, paperi, lasi, ruoka-aineet, tekstiilit, nahka, paristot, saippua, muste, metalliseokset, galvanoidut materiaalit, lääkkeet, valokuvat, lannoitteet

#### Kalsium (Ca)

Rakennusmateriaali, orgaaninen aines, täyteaineet, paperi, lasi, teräs, metalliseokset, tekstiilit, nahka, muovit (täyteaine, stabilaattori), lääkkeet, lannoitteet, tuholaismyrkyt, kasvit

#### Kloori (Cl)

Orgaaniset aineet, muovit (lähinnä PVC), hartsit, kumi, paperi, ruoka-aineet, tekstiilit, nahka, lakat, maalit, rakennusmateriaalit, lääkkeet, tuholaismyrkyt, sienitorjunta-aine, kasvintorjunta-aineet, bakterisidit, galvanoidut materiaalit, lannoitteet, pyrotekniikka, öljyt

#### Koboltti (Co)

Metalliseokset, teräs, organometallit, musteet, magneetit, polttoaineet, väriaineet, keramiikka, lasi, lannoitteet

#### Kromi (Cr)

Pahvi, paperi, lasi, maalit, väriaineet, nahka, metalliseokset, teräs, elektroniikka, metallipinnoitteet, galvanoidut materiaalit, tulenkestävät materiaali, muovit, kyllästetty puu

#### Kupari (Cu)

Metalliseokset (mm. messinki), teräs, elektroniikka, johdot, organometallit, johteet, lasi (värjäys), paperi, tulostusmateriaalit, maalit, muovit, galvanoidut materiaalit, rakennusmateriaalit, sienitorjunta-aine, kasvit, kyllästetty puu

#### Lyijy (Pb)

Organometallit, muovit (PVC:n stabilisaattori, pigmentit), putket, maalit, väriaineet (valkoinen sekä punertavat pigmentit mm. maaleissa, väriliiduissa ja muoveissa), metalliseokset, paperi, pahvi, kumi, akut/paristot, tulostusmuste, lasitettu keramiikka, amalgaami, elektroniikka, kaapelit, juote, metallipinnoitteet, galvanoidut materiaalit, lasi, polttoaineet, ruoka-aineet, veri, sähköjohtimet, putket, kuvaputket, sähkölamput

#### Magnesium (Mg)

Rakennusmateriaali, orgaaninen aines, paperi, metalliseokset, teräs, tulenkestävät materiaalit, galvanoidut materiaalit, tekstiilit, lääkkeet, pyrotekniikka, lannoitteet

#### Mangaani (Mn)

Teräs, metalliseokset, paristot, lasi, hartsit, väriaineet, galvanoidut materiaalit, polttoaineet, tekstiilit, tuholaismyrkyt, sienitorjunta-aine, lannoitteet, rasvahapot

#### Natrium (Na)

Rakennusmateriaalit, orgaaninen aines, paperi, lasi, ruoka-aineet, kumi, nahka, muste, galvanoidut materiaalit, metalliseokset, lääkkeet, tekstiilit, saippua, valokuvat, polttoaineet, lannoitteet, kasvit

#### Nikkeli (Ni)

Metalliseokset, teräs, paristot, muovit, väriaineet, lasi, kolikot, elektroniikka, laitteet, metallipinnoitteet, magneetit, kasviöljyt

#### Rauta (Fe)

Teräs, metalliseokset, rakennusmateriaalit, laitteet, magneetit, elektroniikka, paristot, väriaineet, johteet, paperi, kasviöljyt, rasvahapot, voiteluöljyt, jätevesiliete

#### Rikki (S)

Orgaaniset aineet, paperi, rakennusmateriaalit, muovit, kumi, tekstiilit, nahka, lasi, metalliseokset, paristot, valokuvat, galvanoidut materiaalit, teräs, pyrotekniikka, väriaineet, lääkintätarpeet, vulkanoidut materiaalit, elektroniikka, puolijohteet, lääkkeet, tuholaismyrkyt, lannoitteet

#### Sinkki (Zn)

Organometallit, metalliseokset, tulostusmuste, lasi (värjäys), paperi, vulkanoitu materiaali, kumi, muovit (mm. PVC:n stabilaattori), paristot, metallipinnoitteet, galvanoidut materiaalit (mm. naulat), väriaineet, puolijohteet, tuholaismyrkyt, lääkkeet, ruoka-aineet

#### Tin (Sn)

Organometallit, muovien stabilaattorit ja katalyytit, juotostina, juote, metallipinnoitteet, metalliseokset, puolijohteet, laitteet, lasi, tuholaismyrkyt, väriaineet, voiteluöljyt

#### Typpi (N)

Orgaaniset aineet, paperi, muovit, kumi, hartsit, galvanoidut materiaalit, musteet, orgaaniset maalit, teräs, metalliseokset, lääkkeet, lannoitteet, tuholaismyrkyt

#### Vanadiini (V)

Teräs, metalliseokset, elektroniikka, suprajohteet, tekstiilit, lakat, kumi, keramiikka, lasi, lääkkeet



Vety (H)

Orgaaniset aineet, paperi, muovit, kumi, hartsit, orgaaniset maalit, tekstiilit, epäorgaaniset materiaalit, galvanoidut materiaalit, lääkkeet, tuholaismyrkyt, saippua, lannoitteet

## **5 POLTTOAINEANALYYSIT**

### **5.1 Polttoainejakeiden keskinäinen vertailu**

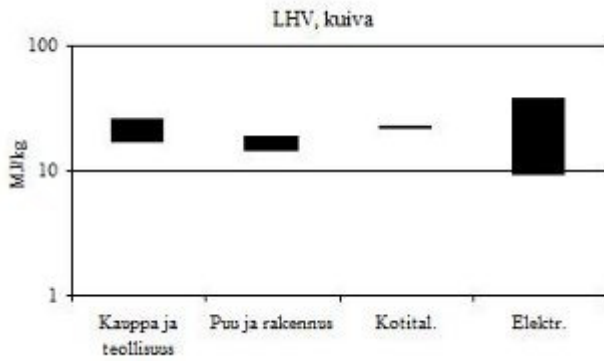
#### **5.1.1 Yleistä**

Polttoainejakeiden ominaisuuksien vaihtelu on koostettu kuviksi, joissa jokaisessa esitetään yhden alkuaineen arvot jokaiselle tarkastetulle jakeelle. Kuvat on muodostettu käyttäen aiemmin työssä esitettyjen jakohtaisten taulukoiden arvoja. Osassa havainnoista tietyn alkuaineen alin pitoisuus alittaa määrittäjärajan ja on merkitty muodossa pitoisuus  $<X$ . Tällöin kuvien vaihteluvälin alarajana on käytetty arvoa  $X$ . Kuvissa on käytetään katkoviivaa, mikäli alkuaineen pitoisuus perustuu vain yhteen arvoon.

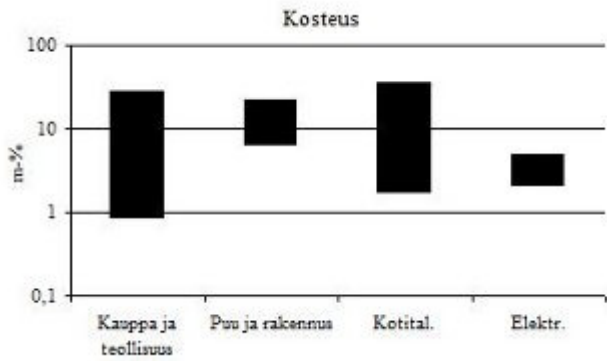
#### **5.1.2 Lämpöarvo ja kosteus**

Tutkimuksessa mukana olleiden polttoainejakeiden lämpöarvon vaihteluväli sekä maksimiarvo olivat selvästi suurimmat elektroniikkajätteellä. Suuren vaihteluvälin takia myös elektroniikkajätteen minimiarvo oli muiden alapuolella. Muilla jakeilla lämpöarvon vaihteluvälit olivat melko suppeita.

Elektroniikkajätteen kosteuden vaihteluväli on suppea ja alhaisella tasolla. Muilla jakeilla kosteuden vaihteluvälit olivat suuria. Kuvissa 13 ja 14 on esitetty lämpöarvon ja kosteuspitoisuuden vaihteluvälit eri kierrätyspolttoainejakeissa.



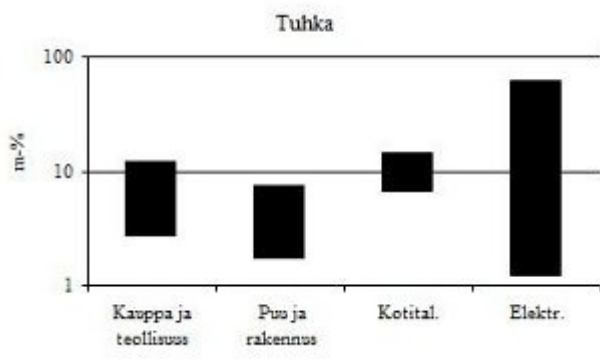
Kuva 13. Lämpöarvot



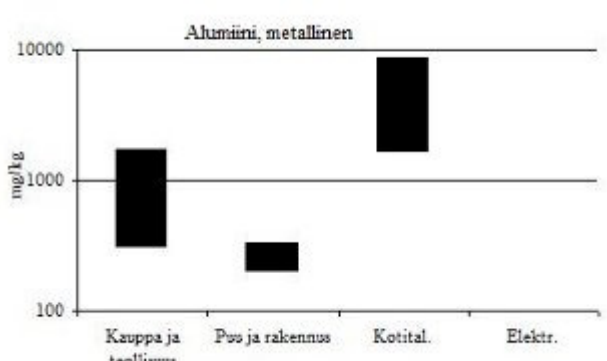
Kuva 14. Kosteuspitoisuudet.

### 5.1.3 Tuhka ja tuhkaa muodostavat alkuaineet

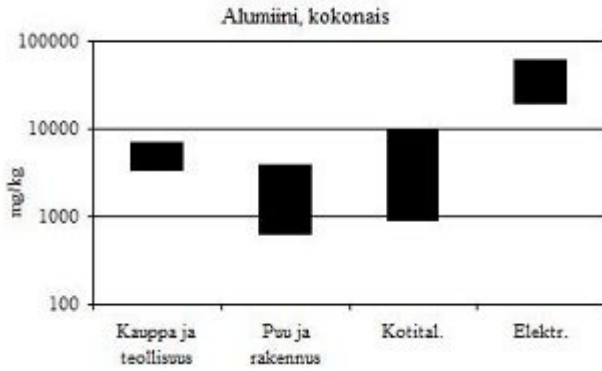
Polttoaineiden tuhkapitoisuudessa ei ole suuria eroja elektroniikkajätettä lukuun ottamatta. Elektroniikkajätteen arvot yltyvät kirjallisuudessa tuhkan osalta sekä matalimpiin että korkeimpiin arvoihin. Myös tuhkaa muodostavien alkuaineiden osalta elektroniikkajätteen pitoisuuden maksimi-arvot ovat korkeimmat muita useammin. Näissä tapauksissa myös vaihteluväli on yleensä suurin. Muiden jakeiden suuruusjärjestys maksimipitoisuuksien osalta vaihtelee. Matalin maksimi-arvo on useimmin puu- ja rakennusjätteellä. Kuvissa 15–23 on esitetty vaihteluvälit tuhkan ja tuhkaa muodostavien alkuaineiden pitoisuuksien vaihteluvälit eri kierrätyspolttoainejakeissa.



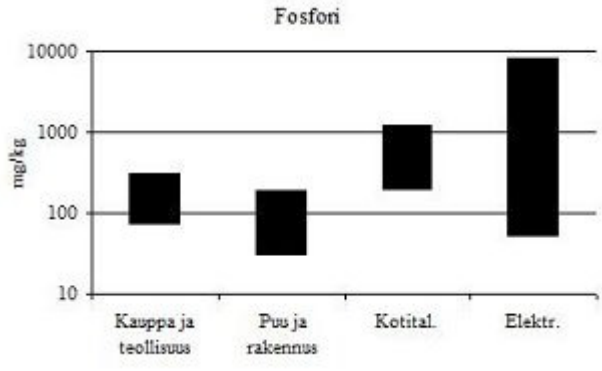
Kuva 15. Tuhkapitoisuudet.



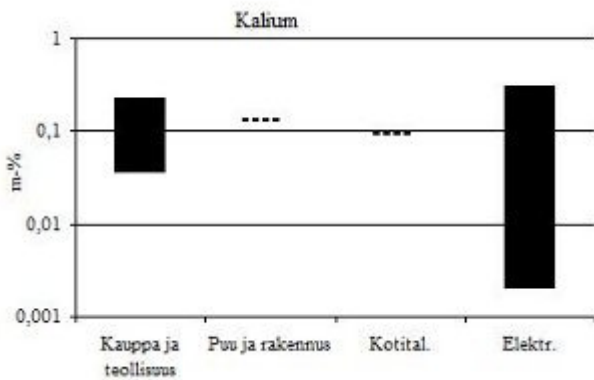
Kuva 16. Metallisen alumiinin pitoisuudet.



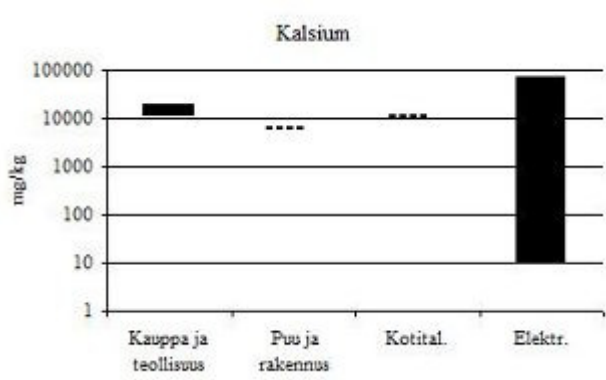
Kuva 17. Alumiinin kokonaispitoisuudet.



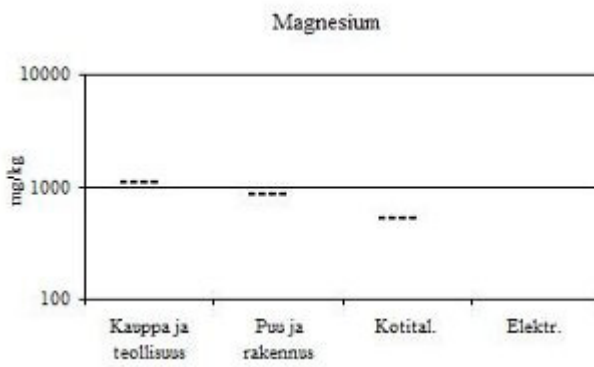
Kuva 18. Fosforipitoisuudet.



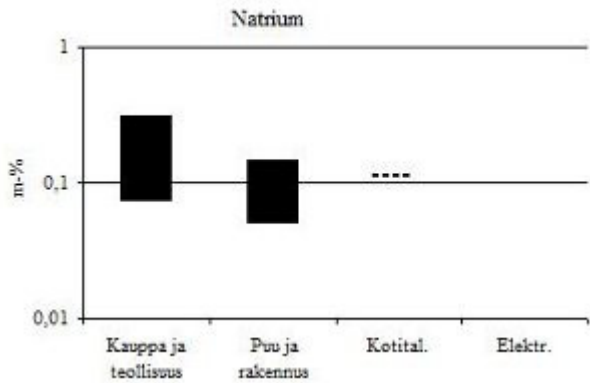
Kuva 19. Kaliumpitoisuudet.



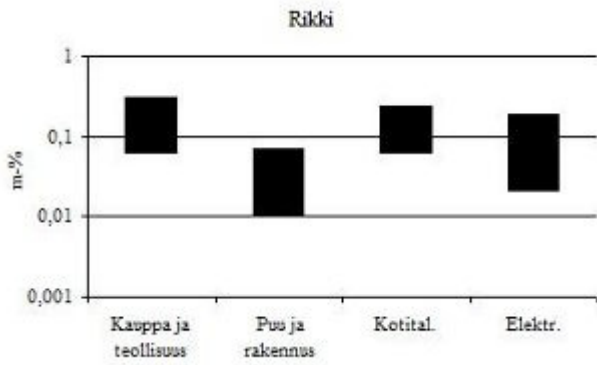
Kuva 20. Kalsiumpitoisuudet.



Kuva 21. Magnesiumpitoisuudet.



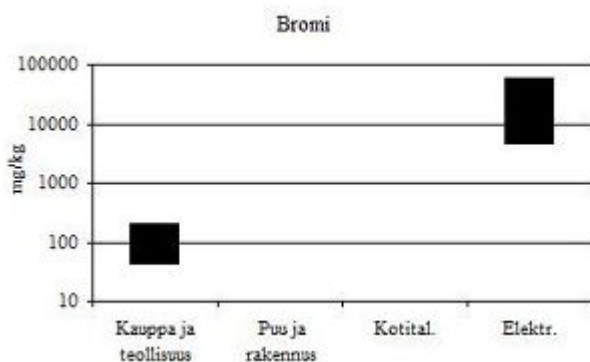
Kuva 22. Natriumpitoisuudet.



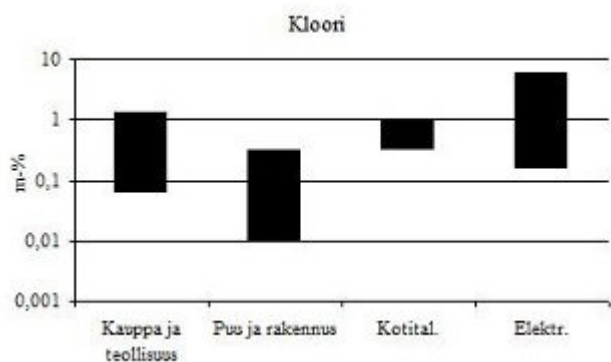
**Kuva 23.** Rikkipitoisuudet.

### 5.1.4 Tärkeimmät korroosiota aiheuttavat alkuaineet

Korroosiota aiheuttavia suoloja muodostavien bromin ja kloorin pitoisuudet olivat suurimmillaan elektroniikkajätteellä. Jakeella myös bromin minimipitoisuus oli hyvin korkea. Pienin klooripitoisuuden maksimiarvo sekä suppein vaihteluväli oli puu- ja rakennusjätteellä. Kuvissa 24 ja 25 on esitetty bromin ja kloorin pitoisuuksien vaihteluvälit eri kierrätyspoltoainejakeissa.



**Kuva 24.** Bromipitoisuudet.

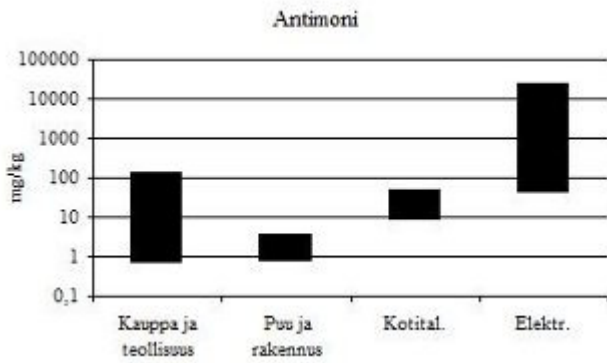


**Kuva 25.** Klooripitoisuudet.

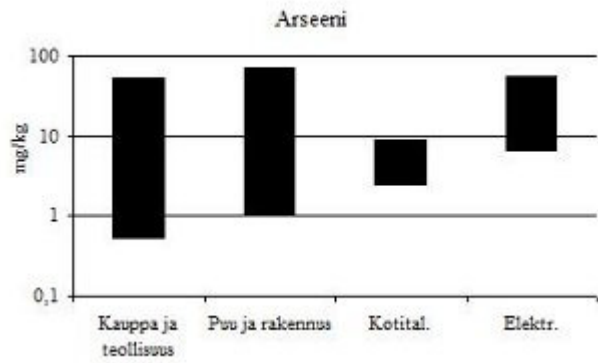
### 5.1.5 Raskasmetallit ja muut myrkylliset metallit

Raskasmetallien ja muiden myrkyllisten metallien suurimpien pitoisuuksien osalta elektroniikkajätteen pitoisuudet olivat arseenia lukuun ottamatta selvästi korkeimmat. Elektroniikkajätteen alhaisin pitoisuus kuitenkin ylsi useassa tapauksessa jätejakeista kaikkein alhaisimmaksi. Muiden jakeiden osalta suurin pitoisuus vaihteli yleensä kaupan ja teollisuuden jätteen sekä kotitalousjätteen välillä. Puu- ja rakennusjätteen maksimipitoisuus oli yleensä joukon matalin. Poikkeuksina arseeni, jonka kohdalla puu- ja rakennusjätteen maksimipitoisuus ylitti

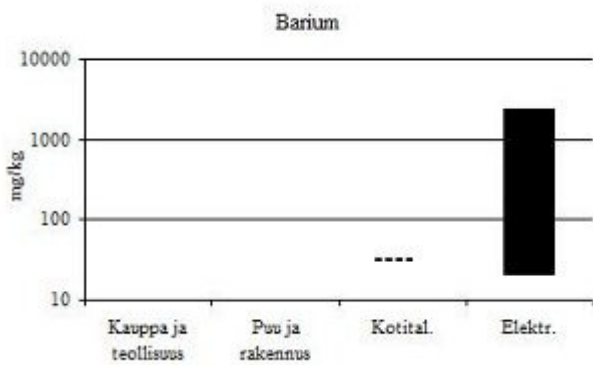
kaikki muut jakeet sekä lyijy, jonka kohdalla maksimipitoisuus jäi vain elektroniikkajätteelle. Kuvissa 26–38 on esitetty raskasmetallien ja muiden myrkyllisten metallien pitoisuuksien vaihteluvälit eri kierrätyspolttoainejakeissa.



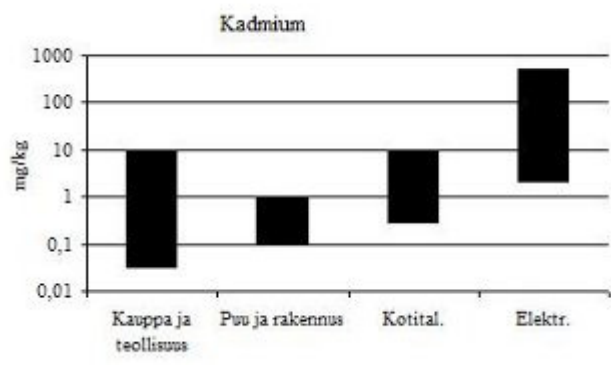
**Kuva 26.** Antimonipitoisuudet.



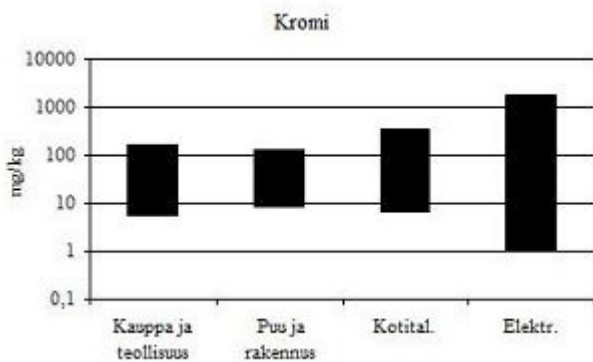
**Kuva 27.** Arseenipitoisuudet.



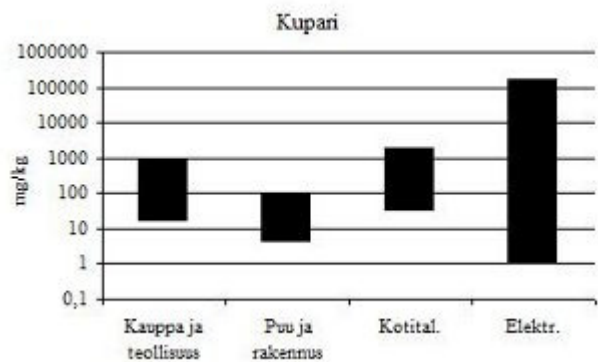
**Kuva 28.** Bariumipitoisuudet.



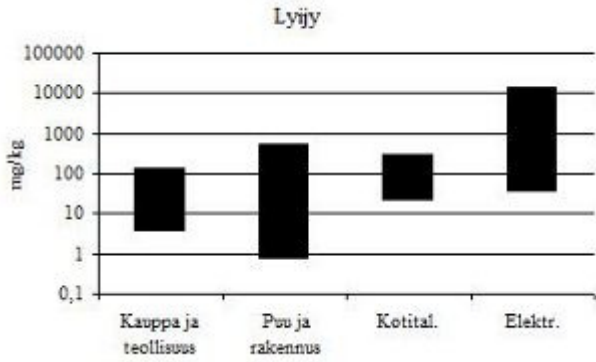
**Kuva 29.** Kadmiumipitoisuudet.



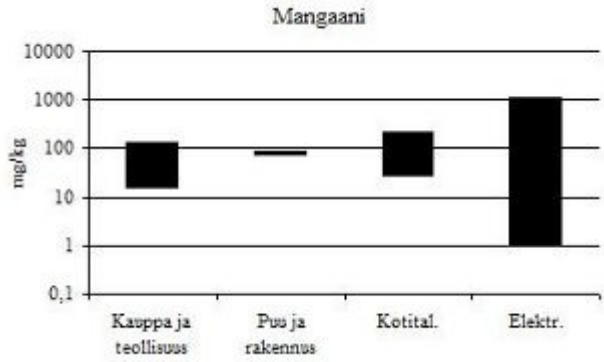
**Kuva 30.** Kromipitoisuudet.



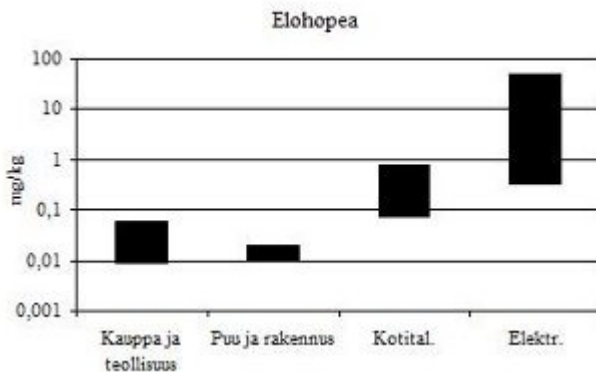
**Kuva 31.** Kuparipitoisuudet.



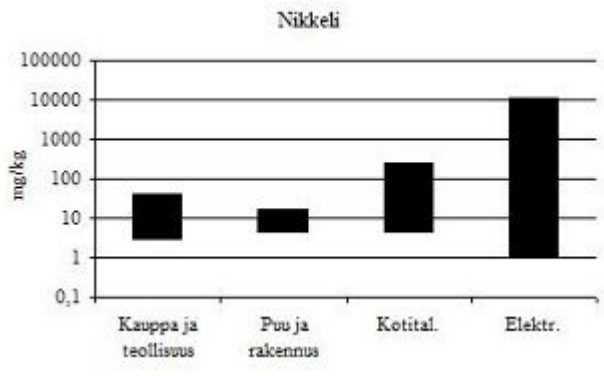
Kuva 32. Lyijypitoisuudet.



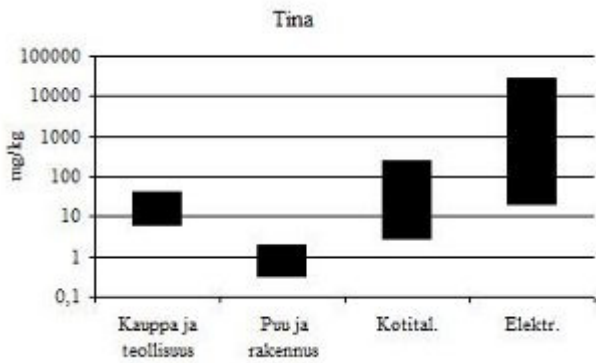
Kuva 33. Mangaanipitoisuudet.



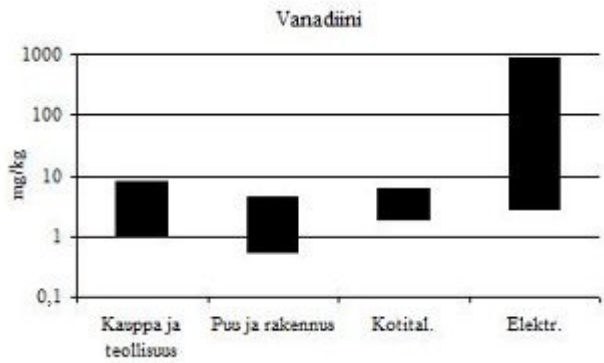
Kuva 34. Elohopeapitoisuudet.



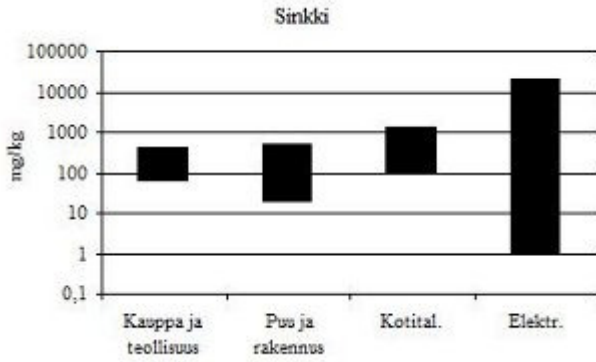
Kuva 35. Nikkelipitoisuudet.



Kuva 36. Tinapitoisuudet.



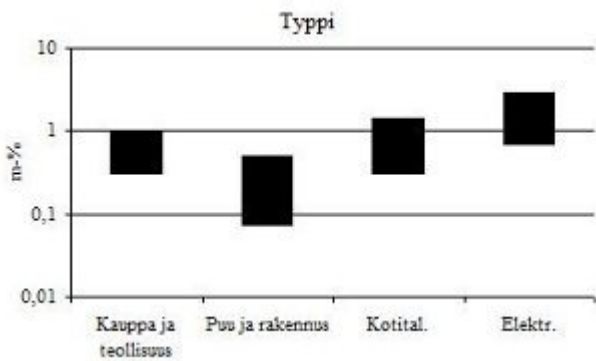
Kuva 37. Vanadiinipitoisuudet.



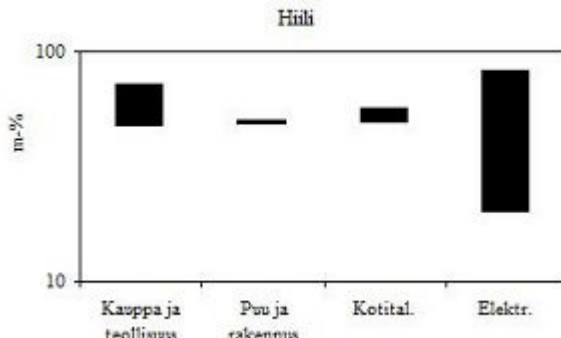
**Kuva 38.** Sinkkipitoisuudet.

### 5.1.6 Muut alkuaineet

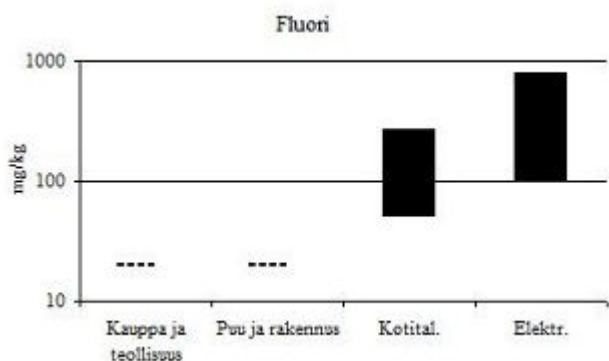
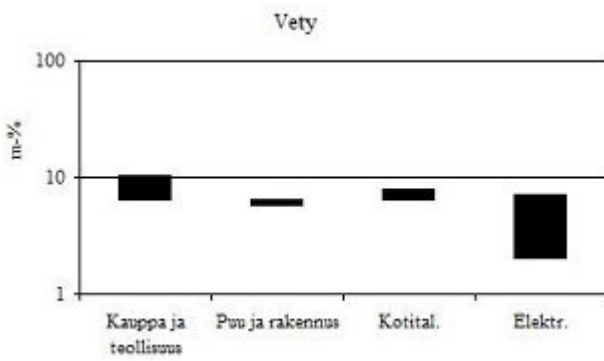
Muista alkuaineista erottui selvimmin fluori, jonka pitoisuuden suurimmat arvot olivat jälleen elektroniikkajätteellä. Muiden alkuaineiden kohdalla erot huippupitoisuuksissa olivat pienempiä. Kuvissa 39–44 on esitetty muiden alkuaineiden pitoisuuksien vaihteluvälit eri kierrätyspolttoainejakeissa.



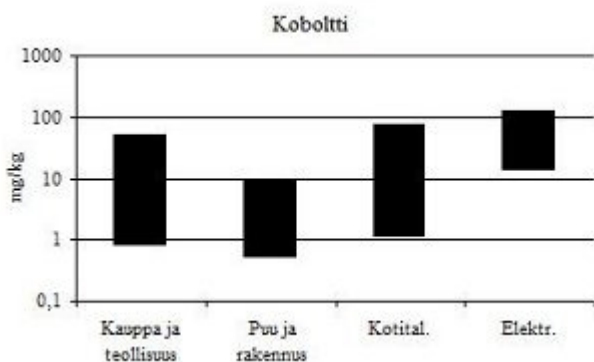
**Kuva 39.** Typpipitoisuudet.



**Kuva 40.** Hiilipitoisuudet.

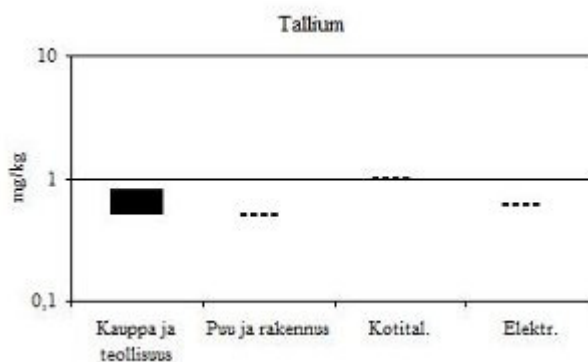


**Kuva 41.** Vetypitoisuudet.



**Kuva 43.** Kobolttipitoisuudet.

**Kuva 42.** Fluoripitoisuudet.



**Kuva 44.** Talliumpitoisuudet.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kierrätyspolttoaineiden tärkeimmät materiaalit ovat muovit, puu ja kuitutuotteet. Pääkomponenteista selvästi monimutkaisin käsite on muovit, jotka yhteisestä yleisnimityksestä huolimatta ovat varsin sekalainen kokoelma polymeerejä ja lisäaineita. Itse polymeereistä jätteenpolton kannalta haitallisinta on suuren klooripitoisuutensa takia PVC. Sen käytön yleisyys mahdollistaa suuren kloorimäärän joutumisen polttoaineeseen, mikäli ongelmia lajittelussa ilmenee. PVC:n merkitys on erityisen suuri rakennusteollisuuden jätteissä. Polttoprosessiin joutuvalla kloorilla on sekä kattilaa korrodoivia sekä ympäristön kannalta haitallisia vaikutuksia. PVC:n ohella myös ruoka-aineista peräisin olevilla suoloilla on pieni rooli kloorin tuojana polttoaineeseen. Toinen muoveissa esiintyvä, korrodoivia yhdisteitä muodostava alkuaine on bromi. Sen esiintyminen on suorassa yhteydessä muoveissa käytettyihin palonestoaineisiin. Palonestoaineiden takia bromia esiintyy runsaasti erityisesti elektroniikkajätteessä. Myös rakennus-/purkujätteen bromipitoisuus voi olla korkea palonestoaineita sisältävien suojakalvojen, eristeiden ym. rakennusmateriaalien käytöstä johtuen.

Jätteenpolttoaineet sisältävät myös useita muita haitallisia aineita, kuten raskasmetalleja ja muita haitallisiksi luokiteltuja metalleja. Yksi lähde on muovien lisäaineet. Esimerkiksi lyijyä ja kadmiumia käytetään muovien väriaineina. Näiden lisäksi muun muassa bariumia, sinkkiä ja organotinoja käytetään muovien, lähinnä PVC:n stabilisointiaineina.



Myös jätetee on potentiaalinen raskasmetallilähde. Puupohjaisten jäteteeolttolaineiden osalta ongelmana on yleensä käsitellyn, erityisesti kyllästetyn puun joutuminen polttolaineeseen. Esimerkiksi nykyään jo myyntikiellossa olevan CCA-puun joutuminen polttolaineeseen nostaa selvästi sen pääkyllesteiden, kromin, kuparin ja arseenin pitoisuuksia. Kyllästettyä puuta ei koskaan tarkoituksellisesti tule sijoittaa poltettavaan jäteteeseen, vaan se tulee toimittaa ongelmajätteen käsittelyyn. Maalin osuus maalatussa sahatavarassa on varsin pieni, mutta sen raskasmetallipitoisuudet, erityisesti lyijyn osalta voivat olla erittäin korkeita. Suurina määrinä myös maalatussa puulla voi olla havaittavaa vaikutusta raskasmetallipitoisuuksiin.

Mikäli jäteteeolttolaineessa havaitaan erittäin korkeita raskasmetalliarvoja, syynä on todennäköisesti jokin pitoisuudeltaan korkea komponentti, kuten akut/paristot, maali suurina määrinä, puhtaat metallikappaleet tai metalliseokset. Etenkin lyijyn ja kadmiumin osalta kyseisten komponenttien pitoisuudet saattavat muoviin verrattuna olla useita kertaluokkia suurempia. Piikit raskasmetallien alkuaineiden osalta johtuvat siis yleensä yksittäisistä korkean pitoisuuden sisältävistä komponenteista, joiden joutuminen kierrätyspolttolaineeseen johtuu puutteellisesta lajittelusta.

Kuitumateriaalista ei jätteenpolttolaa käsittelevästä kirjallisuudesta löytynyt montaa mainintaa. Suuren paperimäärän mainittiin kuitenkin voivan nostaa polttolaineen kalsiumpitoisuutta.

Keskimäärin matalimmat alkuainekohtaiset maksimipitoisuudet olivat rakennus- ja puujätteellä. Myös jakeen laatu oli tasaisinta, mistä merkkinä oli keskimäärin pienimmät vaihteluvälit alkuainepitoisuuksia tarkasteltaessa. Selvimpänä poikkeuksena oli kuitenkin arseeni, jonka maksimipitoisuus rakennus- ja puujätteellä oli kaikista jakeista korkein. Syynä lienee kyllästetty puu.

Kierrätyspolttolaineiden jaekohtaisessa tarkastelussa korkeimmat maksimipitoisuudet ja suurimmat vaihteluvälit olivat useimmin elektroniikkajätteestä valmistetulla polttolaineella. Erityisesti metallien pitoisuudet elektroniikkajätteestä valmistetussa polttolaineessa olivat korkeita. Muihin jakeisiin verrattuna korostuivat barium, kadmium, kupari, elohopea, tina ja vanadiini, joiden pitoisuudet olivat parhaimmillaan satakertaisia lähimmäksi yltäneeseen jakeeseen verrattuna. Metallien lisäksi myös antimoni erottui muista jakeista vastaavalla erolla. Elektroniikkajätteen käsittelyssä lajittelun tarkkuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä suuri osa metalleista ei ole muoveissa lisäaineina, vaan mekaanisesti kiinnitettyinä osina, jotka on mahdollista erotella lajittelussa.

## LÄHTEET

- [1] S. Ajanko, A. Moilanen & J. Juvonen. ”Kierrätyspolttoaineiden laadunvalvonta”, VTT, Espoo, Suomi, VTT Publications 587, 2005.
- [2] ”Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi, Laadunvalvontajärjestelmä”, Suomen standardisoimisliitto SFS, standardi SFS 5875, 46.1.2000.
- [3] W. Ma, G. Hoffmann, M. Schirmer, G. Chen & V. S. Rotter, “Chlorine Characterization and Thermal Behavior in MSW and RDF”, *Journal of Hazardous Materials* vol. 178, s. 489–498, 2010.
- [4] E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski, E. Gidarakos, ”Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics,” *Journal of Hazardous Materials* vol. 161 s. 913–919, 2009.
- [5] S. van Loo & J. Koppejan (toim.), *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London - Sterling: Earthscan, 2008.
- [6] J. Saastamoinen, ”Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus,” teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 186–232.
- [7] E. Denisov, O. Sarkisov & G. Likhtenshtein, *Chemical Kinetics, Fundamentals and New Developments*. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Science B.V., 2003.
- [8] P. Quaak, H. Knoef & H. Stassen, “Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies”, World Bank, Washington D.C., USA, World Bank Technical Paper No. 422, Energy Series, 1999.
- [9] J. Konttinen, kirjallinen tiedonanto, 2011.
- [10] R. Flagan & J. Seinfeld, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988.
- [11] E. Kurkela and A. Jahkola, ”Paineistetut poltto- ja kaasutusvoimaproessit,” teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 557–584.
- [12] BTG Biomass Gasification, Apr. 2008. [Online].  
Saatavilla: <http://www.btgworld.com/uploads/documents/Gasification%20Attachment%20Website%20v2.pdf>. [Vierailtu: 8.7.2011].
- [13] A. Rajvanshi. “Biomass Gasification,” in *Alternative Energy in Agriculture*, Vol. II, D. Goswami, toim. CRC Press, 1986, s. 83–102.
- [14] J. Saastamoinen. ”Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus,” teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 189–232.

- [15] J. Nieminen & M. Kivelä, "Biomass CFB gasifier connected to a 350 MWth steam boiler fired with coal and natural gas – thermie demonstration project in Lahti in Finland," *Biomass and Bioenergy*, vol. 15, no. 3, s. 251–257, 1998.
- [16] D. L. Granatstein, "Case Study on Waste-fuelled Gasification Project Greve in Chianti, Italy," IEA Bioenergy Agreement – Task 36, 2002. [Online].  
Saataavilla: [http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/2001-2003/Case\\_Studies/Case\\_Study\\_on\\_Waste-fuelled\\_Gasification\\_Project.pdf](http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/2001-2003/Case_Studies/Case_Study_on_Waste-fuelled_Gasification_Project.pdf). [Vierailtu: 22.7.2011].
- [17] D. L. Granatstein, "Case study on Lahden Lämpövoima gasification project Kymijärvi power station, Lahti, Finland," for IEA Bioenergy Agreement – task 36, 2002.  
Saataavilla: [http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/2001-2003/Case\\_Studies/Case\\_Study\\_on\\_Lahden\\_Lampovoima\\_Gasification\\_Project.pdf](http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/2001-2003/Case_Studies/Case_Study_on_Lahden_Lampovoima_Gasification_Project.pdf) [Vierailtu: 7.10.2011].
- [18] I. Glassman, *Combustion*, 3. painos, San Diego, CA: Academic Press, 1996.
- [19] J.F.M. Clark, *The Burning Issue: Historical Reflections on Municipal Waste Incineration*, Short Report 2. AHRB Research Centre for Environmental History, Universities of Stirling and St Andrews, 2003.
- [20] L. Hickman, "Garbage: Bin there, done that," *The American City & County*, 114, 6, ProQuest, marraskuu 1999.
- [21] S. Laita, "Kyläsaaren polttolaitos tahri maineen," *Helsingin Sanomat*, 20.12.2008. [Online].  
Saataavissa: <http://www.hs.fi/kaupunki/artikkeli/Kyl%C3%A4saaren+polttolaitos+tahri+maineen/HS20081220SI1KA0186u>. [Vierailtu: 22.7.2011].
- [22] Turku Energia, "Orikedon jätteenpolttolaitos," *Jätteenpolttolaitos*. [Online].  
Saataavilla: <http://www.turkuenergia.fi/index.php?page=8d76cdf1d041757014c23ffa7259d06>. [Vierailtu: 22.7.2011].
- [23] R. Saarinen & M. Leikoski, *Selvitys jätteenpolton luvista*, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 8. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 2009.
- [24] P. Vainikka, kirjallinen tiedonanto, 2011.
- [25] P. Vesanto, Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä, Suomen ympäristö 27, Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 2006.
- [26] P. Vesanto, M. Hiltunen, A. Moilanen, T. Kaartinen, J. Laine-Ylijoki, K. Sipilä & C. Wilén. "Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö — Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon", VTT, Espoo, Suomi, VTT Tiedotteita 2416, 2007.
- [27] "Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta", FINLEX® - Säädökset alkuperäisinä: 362/2003, 15.5.2003. [Online].  
Saataavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030362>. [Vierailtu: 7.7.2011].

- [28] S. Ajanko, A. Moilanen & J. Juvonen. ”Jätteiden lajittelujärjestelmän ja käsittelytekniikan vaikutus kierrätyspolttoaineen laatuun”, VTT, Espoo, VTT Tiedotteita 2317, 2005.
- [29] E. Saarinen, ”Kierrätyspolttoaineen hinta romahti”, *Uusiouutiset* vol. 17, 2, s. 4–7, 2006.
- [30] Tilastokeskus, kirjallisena tiedonantona taulukko-otteet Energiatilasto Vuosikirja 2010 -CD-ROM-julkaisusta, 2011.
- [31] E. Saarinen, ”Kierrätyspolttoaineen kysyntä kasvussa,” *Uusiouutiset* vol. 18, 7, s. 4–6, 2007.
- [32] Tilastokeskus, ”Polttoaineluokitus 2010,” *Tilastokeskus - Polttoainemerkkien ja muiden energialähteiden määritelmät 2010*, 2010. [Online].  
Saataavilla: [http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_maaritykset\\_2010.html](http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_maaritykset_2010.html). [Vierailtu: 7.10.2011].
- [33] E. Alakangas & C. Wiik. ”Käytöstä poistetun puun luokittelu ja hyvin käytäntöjen kuvaus”, VTT, Jyväskylä, Tutkimusraportti Nro VTT-R-04989-08, 2008.
- [34] J. Haverinen, energia-analyttikko Lahtienergia, suullinen tiedonanto, Lahti, 2011.
- [35] ”Jätteiden lajitteluohjeet”, Päijät-Hämeen jätehuolto Oy. [Online].  
Saataavilla: [http://www.phj.fi/downloadable\\_material/PHJ\\_Lajitteluohjeet11\\_10net.pdf](http://www.phj.fi/downloadable_material/PHJ_Lajitteluohjeet11_10net.pdf). [Vierailtu: 7.7.2011].
- [36] ”Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi”, Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, L 332/91, 28.12.2000. [Online].  
Saataavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:332:0091:0111:FI:PDF>. [Vierailtu: 7.7.2011].
- [37] H. Maskuniitty, ”Arinapoltto,” teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 466–489.
- [38] T. Hyppänen, R. Raiko, ”Leijupoltto,” teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, pp. 409–521.
- [39] A. F. Kirkels & G. P. J. Verbong. ”Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 471–481, 2011.
- [40] C. Wilén & E. Kurkela, *Gasification of biomass for energy production, State of technology in Finland and global market perspectives*, VTT Research Notes 1842. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1997.
- [41] P.L. Spath, & D.C. Dayton. “Preliminary Screening — Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas,” National Renewable Energy Laboratory, Golden, Canada, Technical Report, NREL/TP-510-34929, 2003.

- [42] A. van der Drift & H. Boerrigter, "Synthesis Gas from Biomass for fuels and chemicals," Energy Research Centre of the Netherlands, Biomass, Coal and Environmental research, Netherlands, ECN-C--06-001, 2006.
- [43] "Potential Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand," IEA Bioenergy: IEA Bioenergy: EXCO: 2007:02, 2007.
- [44] *Review of Finnish Biomass Gasification Technologies*. OPET Report 4.Espoo: VTT, 2002.
- [45] M. Kirjavainen, K. Sipilä, T. Savola, M. Salomón & E. Alakangas, "Small-scale biomass CHP technologies, Situation in Finland, Denmark and Sweden," VTT, VTT Processes, Espoo, OPET Report 12, 2004.
- [46] K. Salo & A. Horvath, "Biomass gasification in Skive: Opening doors in Denmark," *Renewable Energy World Magazine*, vol. 11, issue 6, Nov./Dec. 2008.
- [47] K. Salo, "Biomass gasification applications," Topsoe catalysis forum, 21.-22.8.2008, Lyngby, Denmark. [Online]  
Saataavilla: [http://www.topsoe.com/sitecore/shell/Applications/~/\\_media/PDF%20files/Topsoe\\_Catalysis\\_Forum/2008/Salo.ashx](http://www.topsoe.com/sitecore/shell/Applications/~/_media/PDF%20files/Topsoe_Catalysis_Forum/2008/Salo.ashx) [Vierailtu: 22.7.2011]
- [48] J. Nieminen & M. Kivelä, "Biomass CFB gasifier connected to a 350 MWth steam boiler fired with coal and natural gas – thermie demonstration project in Lahti in Finland," *Biomass and Bioenergy*, vol. 15, no. 3, pp. 251-257, 1998.
- [49] D. L. Granatstein, *Case study on Lahden Lämpövoima gasification project Kymijärvi power station, Lahti, Finland*, IEA bioenergy agreement – task 36. Canada: natural Resources Canada/CANMET Energy Technology Centre (CETC), 2002.
- [50] T. Pröll, R. Rauch, C. Aichernig & H. Hofbauer, "Fluidized Bed Steam Gasification of Solid Biomass – Performance Characteristics of an 8 MWth Combined Heat and Power Plant," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol. 5, article A54, 19 s., 2007.
- [51] H. Hofbauer, K. Bosch, I. Siefert, C. Aichernig, H. Tremmel, K. Voigtlaender, R. Koch & R. Lehner, "Steam gasification of biomass at CHP plant Guessing – status of the demonstration plant". [Online]. Saataavilla: [http://members.aon.at/biomasse/gue\\_rom.pdf](http://members.aon.at/biomasse/gue_rom.pdf). [Vierailtu: 22.7.2011].
- [52] P. Kilpinen, "Typen oksidien muodostuminen ja hajoaminen," teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 300–342.
- [53] K. Iisa, P. Yrjas, P. Kilpinen, "Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen," teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 343–370.
- [54] J. Huotari, R. Vesterinen, "Muut polton päästöt," teoksessa *Poltto ja Palaminen*, R. Raiko, J. Saastamoinen, M. Hupa & I. Kurki-Suonio, toim. Helsinki: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto, Teknillisten tieteiden akatemia, 2002, s. 371–395.

- [55] J. Werther, "Gaseous emissions from waste combustion," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 144, pp. 604–613, tammikuu 2007.
- [56] L.A. Ruth, "Energy from Municipal Solid Waste - A Comparison with Coal," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 24, s. 545–564, 1998.
- [57] Lahti Energia Oy, "Lahti Energian KYVO<sub>2</sub>-kaasutuslaitos," *Hankkeen kuvaus / Voimalaitos / Lahti energia*. [Online]. Saatavilla: <http://www.roskatenergiaksi.fi/voimalaitos/hankkeen-kuvaus>. [Vierailtu: 22.7.2011].
- [58] D.J. Stevens, "Hot Gas Conditioning: Recent Progress With Larger-Scale Biomass Gasification Systems, Update and Summary of Recent Progress," National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, NREL/SR-510-29952, 2001.
- [59] J. Konttinen, M. Reinikainen, A. Oasmaa & Y. Solantausta, "Thermochemical conversion of forest biomass (Chapter 8)," teoksessa *Papermaking Science and Technology*, Book 20: Biorefining of Forest Resources, R. Alén (toim.), Porvoo: Paper Engineer's Association, Bookwell Oy, 2011, s. 262–304.
- [60] S.D. Sharma, M. Dolan, D. Park, L. Morpeth, A. Ilyushechkin, K. McLennan, D.J. Harris & K.V. Thambimuthu, "A critical review of syngas cleaning technologies — fundamental limitations and practical problems," *Powder Technology* 180, s. 115–121, 2008.
- [61] B. Gardner, M. Davidson, X. Guan, H. Hendrix, Barry Shirley, Robert Dahlin, Carl Landham, & Jack Spain, "Commercial Readiness Of Hot-Gasification For Pressurized Combustion," 16th International Conference On Fluidized-Bed Combustion, Reno, Nevada, 2001.
- [62] M. Nieminen & E. Kurkela, "Filtration of biomass and waste derived gasification product gas," VTT, VTT Processes, Espoo, *Peruskaasu 2002–2004* -cd-rom.
- [63] Y. Chang, W.C. Chen & N. Chang, "Comparative evaluation of RDF and MSW incineration," *Journal of Hazardous Materials* vol. 58, s. 33–45, 1998.
- [64] C.C. Wiles, "Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge," *Journal of Hazardous Materials* 47, s. 325–344, 1996.
- [65] S.E. Sawell, A.J. Chandler, T.T. Eighmy, J. Hartlén, O. Hjelm, D. Kosson, H.A. Van der Sloot & J. Vehlow, "An International Perspective on the Characterisation and Management of Residues from MSW Incinerators," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 9, Nos 1–5, s. 317–386, 1995.
- [66] J.M. Chimenos, M. Segarra, M.A. Fernández & F. Espiell, "Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator," *Journal of Hazardous Materials*, A:64 s. 211–222, 1999.
- [67] A. Jakob, S. Stucki & P. Kuhn, "Evaporation of Heavy Metals during the Heat Treatment of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 29, s. 2429–2436, 1995.
- [68] D.E. Balampanis, "Comparative Study on the Combustion and Combustion and Gasification of solid Recovered Fuels. Emphasis on Residues Characterisation and Chlorine Partitioning," PhD Thesis, Cranfield University, Bedfordshire, England, 2009.

- [69] P. Vainikka, S. Enestam, J. Silvennoinen, R. Taipale, P. Yrjas, A. Frantsi, J. Hannula & M. Hupa, "Bromine as an ash forming element in a fluidised bed boiler combusting solid recovered fuel" *Fuel* 90, s. 1101–1112, 2011.
- [70] J. Innes & A. Innes, *Plastic Flame Retardants Technology and Current Developments*. Shrewsbury, UK: Smithers Rapra, 2003. [E-kirja] Saatavilla: Ebrary.
- [71] C. A. Harper, *Modern Plastics Handbook*. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2000. [E-kirja] Saatavilla: Ebrary.
- [72] *Plastics – the Facts 2010, An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2009*, PlasticsEurope, EUPC, Epro & EUPR, *Plastics – The Material for the 21st Century*, 2010, 45 s.
- [73] "Valtioneuvoston asetus vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa," *FINLEX*® - Säädökset alkuperäisinä: 853/2004, 9.9.2004. [Online]. Tarjolla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2004/20040853>. [Vierailtu: 26.7.2011].
- [74] "Novel coated fillers enhance flame-retardant properties," *Plastics Additives & Compounding*, July/August, s. 26–29, 2007.
- [75] *An Introduction to Brominated Flame Retardants*, Bromine Science and Environmental Forum (BSEF), 2000. [E-kirja] Saatavilla: Docstoc.
- [76] "Risk Assessment Report on HEXABROMOCYCLODODECANE (HBCDD), Human Health Part," Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER), Health & Consumer Protection, Directorate-General, European Commission, CAS No.: 25637-99-4, EINECS No.: 247-148-4, 2008.
- [77] J. Vehlow, F.E.Mark "Electrical and electronic plastics waste co-combustion with municipal solid waste for energy recovery," Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), Technical report, 1997.
- [78] A. Moilanen, H. Ollila & L.H. Sørensen, "Kierrätyspoltoaineiden sisältämät metalli-, halogeeni- ja muut epäpuhtaudet SFS-standardia ja kaasutusta varten", VTT Prosessit, Projektiraportti PRO2/T5009/02, Luottamuksellinen, 2002.
- [79] J. Bart, *Additives in Polymers: Industrial Analysis and Applications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005. [E-kirja] Saatavilla: Ebrary.
- [80] L.S. Morf, J. Tremp, R. Gloor, F. Schuppisser, M. Stengele & R. Taverna, "Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – Actual levels in Switzerland," *Waste Management* vol. 27 s. 1306–1316, 2007.
- [81] "Valtioneuvoston päätös pakkauksista ja pakkausjätteistä 23.10.1997/962," *FINLEX*® - Säädökset alkuperäisinä: 23.10.1997/962, 1997. [Online] Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1997/19970962>. [Vierailtu: 7.10.2011]

- [82] P. Vainikka, D. Lindberg, A. Moilanen, H. Ollila, M. Tiainen & M. Hupa, "Trace Elements Found in the Fuel and In-furnace Aerosols Collected from 80 MW BFB Combusting Solid Recovered Fuel," seminaarissa: Impact of Fuel Quality on Power Production & Environment, 2010.
- [83] H. Manninen, K. Peltola & J. Ruuskanen, "Co-combustion of Refuse-derived and Packaging-derived Fuels (RDF and PDF) with Conventional Fuels, *Waste Management & Research* Vol. 15, s. 137–147, 1997.
- [84] H. Manninen, A. Perkiö, J. Palonen, K. Peltola & J. Ruuskanen, "Trace metal emissions from co-combustion of refuse derived and packaging derived fuels in a circulating fluidized bed boiler," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 12, s. 2457-2469, 1996.
- [85] M. Frankenhaeuser, A. Klarin-Henricson, A. Hakulinen & F.E. Mark, "Co-combustion of Solid Recovered Fuel and Solid Biofuels in a Combined Heat and Power plant at Seinäjoki, Finland," *PlasticsEurope, Pöyry Energy Oy & Vaskiluodon Voima Oy, Technical Report*, 2008.
- [86] R. Vesterinen, "Kierrätyspolttoainenäytteiden rengastesti 2000," VTT energia, Jyväskylä, Tutkimusselostus ENE3/T0A21/2001, Luottamuksellinen, 2001.
- [87] A. Perälä & E. Nippala, *Rakentamisen jätteet ja niiden hyötykäyttö*, VTT tiedotteita 1936. Espoo: VTT rakennustekniikka, 1998.
- [88] "Valtioneuvoston asetus arseeniyhdisteellä ja sitä sisältävällä valmisteella käsitellyn puun, elohopeayhdisteen ja dibutyylitinavetyboraatin sekä niitä sisältävien tuotteiden markkinoille luovuttamisen ja käytön rajoittamisesta," *FINLEX*® - Säädökset alkuperäisinä: 440/2003, 5.6.2003. [Online].  
Saataavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030440>. [Vierailtu: 26.7.2011].
- [89] Ö. Topçuoğlu, S. A. Altinkaya & D. Balköse, "Characterization of waterborne acrylic based paint films and measurement of their water vapor permeabilities," *Progress in Organic Coatings*, vol. 56, s. 269–278, 2006.
- [90] P. Roper, R. Walker & Ph. Quevauviller, "Collaborative study for the quality control of trace element determinations in paint coatings. Part 2. Certification of alkyd resin paint reference materials for the migratable contents of trace elements (CRMs 620 and 623)," *Fresenius J Anal Chem*, vol. 366, s. 289–297, 2000.
- [91] L. Bowman, D. Spencer, C. Muntele, I. Muntele & D. Ila. "Cyclic voltammetry and RBS study of paint components," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B, vol. 261, s. 557–560, 2007.
- [92] S. V. Vassilev & C. Braekman-Danheux, "Characterization of refuse-derived char from municipal solid waste, 2. Occurrence, abundance and source of trace elements," *Fuel Processing Technology*, vol. 59, s. 135–161, 1999.
- [93] G. Z. Lin, R. F. Peng, Q. Chen, Z. G. Wu & L. Du, "Lead in housing paints: An exposure source still not taken seriously for children lead poisoning in China," *Environmental Research*, vol. 109, s. 1–5, 2009.



- [94] A. Kumara & P. Gottesfeld, "Lead content in household paints in India," *Science of the Total Environment*, vol. 407, s. 333–337, 2008.
- [95] H. W. Mielke & C. Gonzales, "Mercury (Hg) and lead (Pb) in interior and exterior New Orleans house paint films," *Chemosphere*, vol. 72, s. 882–885, 2008.
- [96] Z. Wang, S. Wang & M. Cai, "Determination of cadmium in paint samples by graphite furnace atomic absorption spectrometry with optical temperature control," *Talanta*, vol. 72, s. 1723–1727, 2007.
- [97] L. Helsen, E. Van den Bulck, S. Mullens & J. Mullens, "Low-temperature pyrolysis of CCA-treated wood: thermogravimetric analysis," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol. 52 s. 65–86, 1999.
- [98] K. Nakamura, S. Kinoshita & H. Takatsuki, "The Origin and Behavior of Lead, Cadmium and Antimony in MSW Incinerator," *Waste Management*, vol. 16, nos 5/6, s. 509–517, 1996.
- [99] J. Konttinen, kirjallinen tiedonanto, jossa luovutettiin tutkimuksen (J. Konttinen, R. Backman, M. Hupa, A. Moilanen & E. Kurkela, *Trace element behavior in the fluidized bed gasification of solid recovered fuels -A thermodynamic study*, Turku: Åbo Akademi, Processkemiska Centret, Report 05-02, 2005) aineisto käyttöön, 2011.
- [100] J. Vehlow, B. Bergfeldt, H. Hunsinger & K. Jay, "Recycling of bromine from plastics containing brominated flame retardants in state-of-the-art combustion facilities," Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), Bryssel, Belgia, Technical paper.
- [101] S. Salhofer, M. Tesar, "Assessment of removal of components containing hazardous substances from small WEEE in Austria," *Journal of Hazardous Materials* vol. 186 s. 1481–1488, 2011.
- [102] F.E. Mark, H. Dresch, B. Bergfeld, B. Dima, M.M. Fisher, W. Grüttner, F. Kleppmann, K. Kramer, T. Lehner & J. Vehlow, "Large Scale Demonstration of the Treatment of Electrical and Electronic Shredder residue by Co-incineration in the Würzburg Municipal Solid Waste incinerator," PlasticsEurope, Technical Report, 2006.
- [103] T. Tasaki, M. Oguchi, T. Kameya & K. Urano, "Screening of Metals in Waste Electrical and Electronic Equipment Using Simple Assessment Methods," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, number 4, 2007.
- [104] "Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/95/EY," *Euroopan unionin virallinen lehti*, L 37/19, 13.2.2003. [Online].  
Saataavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:fi:PDF>. [Vierailtu: 26.7.2011].
- [105] P. Vainikka, kirjallinen tiedonanto, 2011.
- [106] Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, *Industrial minerals and their uses, A Handbook & Formulary*. New Jersey: Noyes Publication, 1996.

[107] N.V. Lalykin, O.V. Mikhaleva, E.G. Kulapina & S.N. Eremenko, “Separate Identification of Copper (II) and Zinc (II) in Tinted Crystal Glass”, *Glass and Ceramics* vol. 61, nos. 7– 8, 2004.

[108] J. Kontinen, R. Backman, M. Hupa, A. Moilanen & E. Kurkela, *Trace element behavior in the fluidized bed gasification of solid recovered fuels -A thermodynamic study*, Turku: Åbo Akademi, Processkemiska Centret, Report 05-02, 2005.

## LIITE 1

### Muovien valmistuksessa käytettäviä lisäaineita

Oheinen lista on muodostettu etsimällä muovikirjallisuudesta [71] yksittäisten alkuaineiden käyttöä. Lista ei ole kattava, eikä ota kantaa käytettäviin pitoisuuksiin.

Al	alumiinialkyylit polymeroinnin katalyyttejä polyeteenissä (HDPE)
As	
Ba	stabilisaattori PVC:ssä (bariumkloridi)
Br	
C	
Ca	kalsiumkarbonaatti tärkeä täyteaine
Cd	
Cl	antistaattisena aineena jäykässä PVC:ssä ja styreeneissä, metyylikloridi paisutteena, kloorattu kumi: esim. maaleissa
Co	kobolttinaftenaatti katalyyttinä tietyissä polyestereissä
Cr	pinoitteena, kromioksidi polymerisaation katalyyttinä
Cu	
F	pinoitteissa, fluoroelastomeereissa, fluoropolymeereissa
Fe	rautaoksidit pigmentteinä polytetrafluoroeteenissä (PTFE), rautaoksidipuna parantaa fluoroelastomeren lämmönkestoa
H	
Hg	
K	kaliumsuolat polyuretaanin (PUR, PU) katalyyttinä, kaliumstearaatti polyeteenin (PE) ydintämisaineena
Mg	
Mn	mangaaniasetaatti katalyyttinä PET:issä
N	paisutteissa
Na	CMC-kumit esim. elintarvikepakkauksissa, Natriumalkyyli-sulfonaatit antistaattisina aineina styreeneissä, PVC:ssä, polyetylenitereftalaatissa ja polykarbonaatissa, Natriumboorihybridi ja natriumbikarbonaatti polymeerien solutusaineina, natriumantimonaatti palonestoaineiden tehostimena, natriumbentsoaatti ydintämisaineena polyamideissa ja polypropeenissä
Ni	pinoitteena, nikkelikelaatti jäädytysaineena kertamuoveissa, nikkeliyhdisteet (org.) stabilisaattoreina polyolefiinikuitusovelluksissa
O	

P	
Pb	
S	vulkanointiaine polykarylaateille ja luonnon kumille
Sb	lämpöstabilisointiainetta jäykässä PVC:ssä
Sn	tinasaippuat katalyytteinä polymeerien muodostuksessa, tinayhdisteet PVC:n stabilisointiaineina
Tl	
V	
Zn	pinnoitteena, stabilisointiainetta, sinkkialkythiofosfaatti vanhenemisenestoaine (anti-aging) kertamuoveissa, sinkkistearaatti virtausparanteena (flow enhancer) elastomeereissa, sinkkioksidi lämmönjohtoaineena fluoroelastomeereissa sekä paisutteenä PVC-plastisoleissa sinkkikloridi selluloosamuovien hyytelöimisaineena