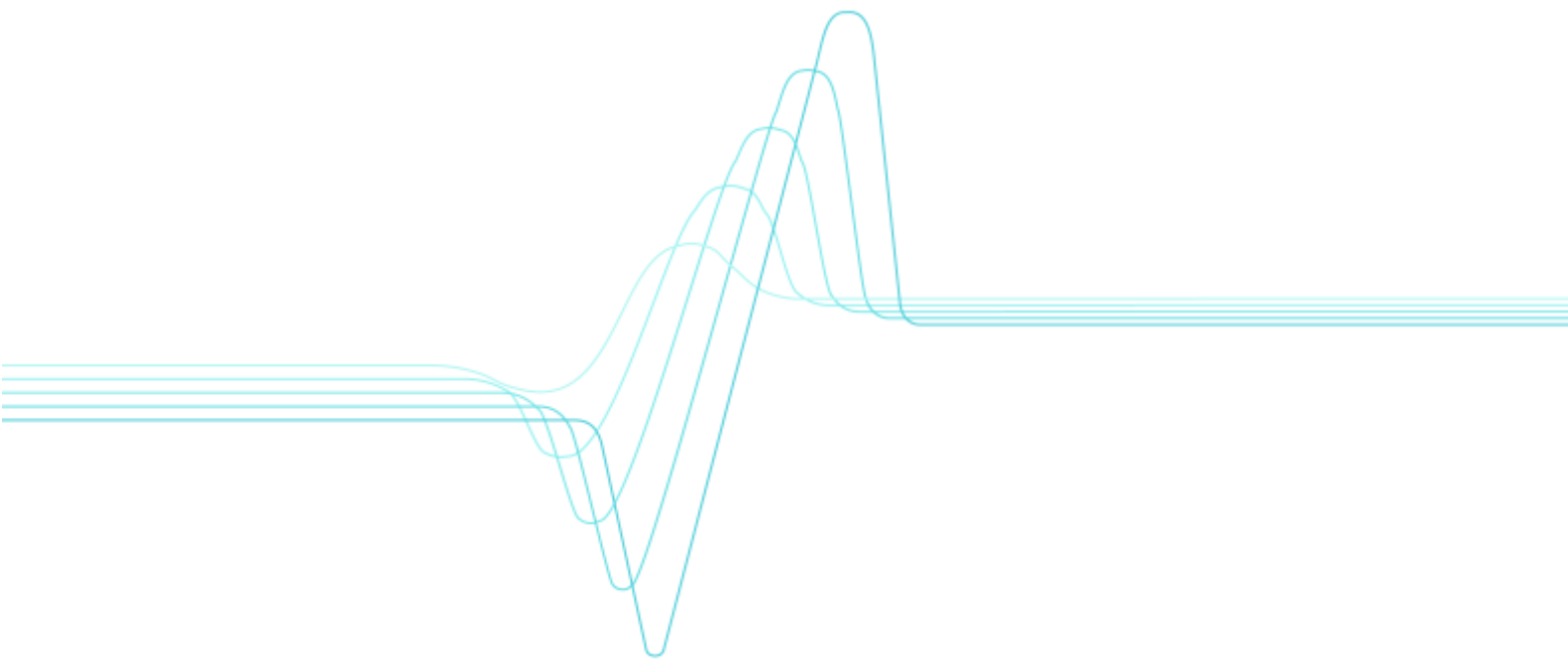


Jouko Hepola

Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa



Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa

Jouko Hepola

VTT Prosessit



ISBN 951-38-6175-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6176-7 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosesstit, Biologinkuja 3-5, PL 1601, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 460 493

VTT Processer, Biologgränden 3-5, PB 1601, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 460 493

VTT Processes, Biologinkuja 3-5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 460 493

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2003

Hepola, Jouko. Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa [Mercury emissions in energy production based on fossil fuels and wastes]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2212. 37 s.

Avainsanat mercury, energy production, combustion, cofiring, gasification, IGCC, fossil fuels, wastes, recovered fuels, solid fuels

Tiivistelmä

Fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvalla energiantuotannolla on merkittävä vaikutus elohopean leviämisessä ympäristöömme. Huoli elohopean leviämisestä ja vaikutuksesta ympäristöömme ja terveyteemme edistää elohopeapäästöjen valvontaa ja uusien päästörajoitusten voimaantuloa. Jätteenpolton elohopeapäästöjä voidaan kontrolloida parhaiten vähentämällä elohopean käyttöä sekä poltettavan jätteen lajittelua, kuten kierrätyspolttoaineen valmistusta, lisäämällä. Hiilen poltto on globaalisti merkittävin ihmisen aiheuttaman elohopeapäästön lähde. Monissa maissa hiilen polton elohopeapäästöille on tulossa rajoituksia.

Polttolaitosten elohopeapäästöihin vaikuttavat monet eri tekijät. Erityisen merkittäviä ovat polttoaineen koostumus ja polttolaitoksen toiminta-arvot sekä kaasun puhdistuksessa käytettävät lisäaineet. Tärkeimpiä näistä ovat: polttoaineen laatu, tuhkan koostumus, polttotapa, savukaasun lämpötila ja viipymä kaasun eri puhdistusyksiköissä sekä käytettävien lisäaineiden laatu ja määrä. Tutkimus- ja kehitystyöllä pyritään parantamaan olemassa olevia ja kehittämään uusia menetelmiä elohopean kontrolloimiseksi.

Kaasutuksessa elohopea vapautuu lähes täydellisesti metallisena höyrynä tuotekaasuun eikä elohopea pidäty tavanomaisessa kaasun kuumasuodatuksessa. Pitkäaikaisia käyttökokemuksia aktiivihiileen perustuvista kaasutuskaasun elohopean pidätysprosesseista on vähän. Kehitteillä olevilla kaasutuskombivoimalaitoksilla (IGCC) pyritään kaasutuskaasun kuumapuhdistuksella poistamaan kaasun sisältämät epäpuhtaudet, kuten hiukkaset, rikki- ja klooriyhdisteet, ennen kaasun polttoa. Elohopean pidättäminen samoissa olosuhteissa vaatii uusien elohopeaa adsorboivien sorbenttien kehittämistä.

Helsingin kivihiiivoimaloissa elohopeapäästöt ovat mittausten mukaan olleet erittäin alhaisia, ja elohopean pidätysaste savukaasun puhdistimissa on ollut n. 60–70 %. Myös suomalainen kierrätyspolttoaine sisältää elohopeaa vain murto-osan verrattuna ulkomailla jätteenpolttolaitoksilla käytettävään sekajätteeseen. Laskelmien mukaan, kierrätyspolttoaineesta peräisin olevan kuumasuodatetun kaasutuskaasun rinnakkaispoltossa hiilen tai turpeen kanssa, muodostuvat elohopeapäästöt alittavat selvästi EU:n jätteenpolttodirektiivin elohopeapäästön raja-arvon.

Hepola, Jouko. Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa [Mercury emissions in energy production based on fossil fuels and wastes]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2212. 37 p.

Keywords mercury, energy production, combustion, cofiring, gasification, IGCC, fossil fuels, wastes, recovered fuels, solid fuels

Abstract

Energy production based on fossil fuels and wastes has made an important contribution to mercury emissions. The concern about ways of controlling the mercury emissions from waste incineration plants are to decrease the mercury consumption in various applications and sort the waste, leading to increasing the production of solid recovered fuel (SRF). New flue gas purification technology can also be used efficiently to compensate for the sudden increase of the mercury content in waste. Coal combustion is a dominant source of anthropogenic global mercury emissions. In many countries mercury emissions from coal-fired plants are to be restricted.

There are many factors that contribute to the mercury emissions from combustion plants. The most important are the fuel content, the operational parameters of the combustion plant and the additives used in gas purification. The most relevant of these are fuel and ash quality, combustion mode, flue gas temperature and residence time in different gas purification units, and the amount and quality of additives used. Research and development work will improve the existing methods and produce new mercury control systems for combustion plants.

In gasification mercury is almost entirely liberated as elemental mercury in product gas and no mercury capture occurs during hot gas filtration of the gas. There are very few long-term operational experiences of the gasification atmosphere in activated-carbon-based-mercury-capture processes. The purpose of the IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) plants under development is the hot gas cleaning of particulate, sulphur and chlorine compounds from the product gas before gas combustion. The capture of mercury under the same conditions needs the development of new type of sorbent materials.

According to the mercury measurements at coal-fired power plants in Helsinki, the mercury emissions have been very low. The capture of mercury in flue gas purification has been about 60–70 %, and the recovered fuel in Finland contains only a fraction of the mercury found in municipal wastes incinerated abroad. Based on the calculations performed, the mercury emissions in co-firing of hot-filtered SRF-based gasification gas with coal and peat, are clearly under the EU WID emission limit for mercury.

Alkusanat

Julkaisun tarkoituksena on luoda ajankohtainen yleiskäsitys fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvan energiantuotannon elohopeapäästöistä. Työssä arvioidaan elohopeapäästöjen kontrollointivaihtoehtoja ja kehitteillä olevaa tekniikkaa. Erityistarkastelussa on suomalaisen kierrätyspolttoaineen kaasutuskaasun elohopean vaikutus hiili- ja turvekattilan elohopeapäästöihin polttoaineiden rinnakkaispoltossa. Kaasutuskaasun sisältämän elohopean osalta tarkastelun lähtökohtana ovat VTT:n tekemien kierrätyspolttoaineen kaasutuskokeiden tulokset. Arvioituja elohopeapäästöjä verrataan EU:n jätteenpolttodirektiivin asettamaan päästöraja-arvoon. Työn johtopäätöksiä tarkasteltaessa on huomioitava, että saadut tulokset perustuvat e.m. lähtöaineistoon eivätkä sellaisenaan ole suoraan sovellettavissa jonkin tietyn suunnitteilla tai toiminnassa olevan laitoksen päästöjen laskentaan.

Työ tehtiin keväällä 2003 projektin " Kaasutustekniikan kehittäminen kierrätyspolttoaineille" yhteydessä. Projektin päärahoittajat olivat Teknologian kehittämiskeskus, Tekes, ja VTT. Lisäksi projektin rahoitukseen ja johtoryhmään osallistuivat Carbona Oy, Condens Oy, Fortum Oil and Gas Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Pohjolan Voima Oy sekä Vapo Oy. Projektin vastuullisena johtajana toimi Esa Kurkela VTT Prosesseista.

Espoo, kesäkuu 2003

Jouko Hepola

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	7
2. Polttoaineiden elohopeapitoisuus.....	10
3. Elohopean kontrollointi hiilen ja jätteen poltossa.....	12
3.1 Elohopea poltossa.....	12
3.2 Elohopeapäästöjen kontrollointi.....	14
3.2.1 Polttoaineen puhdistus ja lajittelu.....	14
3.2.2 Elohopean pidätys hiilen poltossa.....	15
3.2.3 Elohopean pidätys jätteenpoltossa.....	22
3.2.4 Polttoaineiden rinnakkaispoltto.....	24
4. Elohopean kontrollointi kaasutuksessa.....	26
4.1 Elohopea kaasutuksessa.....	26
4.2 Kaasutuskaasun elohopean vaikutus hiili- ja turvekattilan elohopeapäästöihin rinnakkaispoltossa.....	27
5. Johtopäätökset.....	31
Lähdeluettelo.....	33

1. Johdanto

Ympäristöömme elohopeaa joutuu sekä luonnon että ihmisen toiminnan seurauksena. Luonnosta ilmaan emittoituvan elohopean määrä, so. elohopeakierto, tunnetaan huonosti. Arviot elohopeaemissioista vaihtelevat eri luonnonlähteistä riippuen (Seigneur 2002): valtameret, 770–2 300 t/a; tulivuoret, 20–447 t/a; maaperä, 850–2 000 t/a; kasvillisuus, 850–2 000 t/a ja tulipalot, < 100t/a.

Ihmisen aiheuttamien elohopeapäästöjen arvioidaan olevan nykyisin noin 2 300 tonnia vuodessa (Freeley 2002), mikä lienee 10–50 % maailman elohopean kokonaisemissioista (Sloss 1995, 2002; Senior ym. 2002, Chen ym. 2002). Ihmisen toiminnasta johtuvat, ympäristöön leviävät, elohopeapäästöt ovat suurimmaksi osaksi ilmaemissioiden seurausta. Lisäksi teollisuuden elohopeapitoiset jätevedet ja elohopeaa sisältävien kiinteiden jätteen loppusijoitus voivat paikallisesti olla merkittäviä elohopean päästölähteitä. Yksittäisistä lähteistä peräisin olevista elohopeapäästöistä on epävarmuutta, koska päästöarviot perustuvat tunnetusti epätarkkojen päästökertoimien käyttöön. USA:n hiilivoimalaitosten elohopeapäästöt (48 t/a, 1999, n. 34 % USA:n ihmisen aiheuttamista kokonaispäästöistä (Freeley 2002, Freeley ym. 2003)) tunnetaan tarkimmin, koska USA:ssa mm. EPA (Environmental Protection Agency) on selvittänyt tilannetta intensiivisesti seuraavina vuosina tulevien päästörajoitusten vuoksi. Arviot (Position Paper 2001) Euroopan (250 t/a) ja Pohjois-Amerikan (215 t/a) elohopeapäästöistä ovat todennäköisimmin paljon tarkempia kuin arviot muiden maanosien elohopeapäästöistä. Viimeisen vuosikymmenen aikana ihmisen aiheuttamat elohopeapäästöt ympäristöön (Seigneur 2002) ovat pienentyneet Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Samaan aikaan päästöjen on kuitenkin arvioitu lisääntyneen Intiassa (27 %) ja Kiinassa (55 %). Suomessa (Ilma 3/2001) elohopeapäästöt ovat vähentyneet noin kolmanneksen 1990-luvun aikana. Noin kaksi kolmasosaa vuoden 1999 elohopeapäästöistä (n. 0,4 t/a) oli peräisin energiantuotannosta. Koko maailmassakin energiantuotannon ja erilaisten polttoainesten polton osuus elohopeapäästöistä on vähintäänkin samaa suuruusluokkaa kuin Suomessa.

Ilmakehässä elohopea voi olla kaasuna (metallisena ($\text{Hg}(0)$) ja/tai kahden arvoisena (Hg^{2+})) ja sitoutuneena hiukkasiin ($\text{Hg}(p)$). Luonnonlähteiden (Seigneur 2002) elohopeaemissionot ovat pääasiassa kaasumaisia ($\text{Hg}(0)$). Ihmisen aiheuttamat elohopeapäästöt voivat olla sekä kaasumaisia että hiukkaspäästöjä. Päästöjen koostumus vaihtelee suuresti päästölähteestä riippuen. Suhteellisen tarkasti tutkituilla USA:n hiilivoimalaitoksilla on havaittu usein suuria vaihteluja elohopeapäästöjen laadussa. Elohopean esiintymismuoto ja sen pidätysmahdollisuudet riippuvat hiilen koostumuksesta, polttotekniikasta ja käytetyistä savukaasun puhdistuslaitteistoista. Elohopeaemission laadulla on myös tärkeä merkitys elohopean käyttäytymiseen ilmakehässä. Metallinen elohopea voi pysyä ilmakehässä jopa vuoden, kun sitä vastoin Hg^{2+} vain korkeintaan muutamia päiviä, koska se liukenee ilman kosteuteen (Position Paper 2001, Chen ym. 2002). Metalli-

nen elohopea voi siis levitä ilmajvirtojen mukana laajoille alueille. Hapettunut elohopea (Hg^{+2} , $\text{Hg}(\text{p})$) puolestaan jää lähelle päästölähdettä. Maaperään ja veteen joutuessaan elohopea voi muuntua orgaaniseksi metyylielohopeaksi, joka päätyy lopulta ravintoketjuun. Ihmiset saavat elohopeaa todennäköisimmin kalan syönnin yhteydessä. Suurin sallittu elohopeapitoisuus (Komulainen & Tuomisto 2001) kalassa tai kalasäilykkeissä on 1 mg/kg. Herkimmille yksilöille on arvioitu tulevan ensimmäisiä oireita, kun päivittäinen kokonaisannos ylittää 0,3 mg (4,3 $\mu\text{g}/\text{kg}$). Ajoittain Suomessakin on tavattu petokaloissa niin suuria pitoisuuksia, että muutamien vesistöjen kalaa ei suositella käytettäväksi jokapäiväisenä ravintona.

Komulaisen & Tuomiston (2001) mukaan metyylielohopea on hyvin neurotoksista. Se imeytyy lähes täydellisesti ja kumuloituu elimistöön helposti. Kroonisen altistuksen oireet ovat keskushermostoperäisiä, ja ne ilmenevät vasta jopa kuukausien kuluttua altistumisesta. Suun alueen ja raajojen parestesiat, ruokahaluttomuus ja hämärtynyt näkö ovat ensimmäiset oireet. Voimakkaat altistukset aiheuttavat lisäksi näkökentän kaventumista, hapuilua, puhevaikeuksia, kuuroutta ja lihasveltoutta, jopa kuoleman. Vauriot aivoissa ovat paikallisia, näköalueella ja pikkuaivoissa. Lievät oireet voivat korjaantua altistuksen päätyttyä, mutta useimmiten muutokset ovat pysyviä. Kehittyvä keskushermosto on herkintä toksisuudelle. Sikiöön syntyy vaurioita, vaikka äidillä ei olisikaan oireita tai ne ovat lieviä. Metyylielohopea estää aivojen kehittymistä estämällä hermosolujen siirtymistä ja kypsymistä. Aivojen kokokin voi jäädä normaalia pienemmäksi. Vauriot ovat pysyviä, ja ne vaihtelevat lievistä käytöshäiriöistä kehitysvammaisuuteen, altistuksen voimakkuuden mukaan. Metyylielohopea on lisäksi mutageenista ja aiheuttaa koe-eläimissä munuaiskasvaimia.

Viimeaikaisten tutkimusten mukaan elohopeapitoisuudet maapallon arktisilla alueilla ovat lisääntyneet. Äskettäin julkistetun raportin (YM 2002) mukaan elohopea kertyy alueille lumeen sitoutuneena, ja ajoittaiset elohopeakertymät voivat olla runsaita. Prosessiin liittyy vielä auringon valon vaihtelu, joka on voimakasta vain maapallon korkeilla leveysasteilla. Maapallon arktisten alueiden on todettu olevan merkittävä globaalinen elohopeanielu. Siksi on ilmeistä, että arktisten alueiden elohopeakuormituksen kasvu vaikuttaa eläimien ja niitä ravinnoksi käyttävien ihmisten terveyteen. Suomen Lapissa mitatut elohopeapitoisuudet ovat olleet kuitenkin alhaisempia kuin muilla arktisilla alueilla. Siksi elohopean vaikutuksista siellä ei toistaiseksi olla huolestuneita.

Tutkijat, viranomaiset ja kansalaiset ovat kuitenkin huolestuneita erilaisista polttoprosesseista, so. erilaisten fossiilisten polttoaineiden ja jätteiden poltosta, ympäristöön leviävien raskasmetallien aiheuttamista ympäristö- ja terveysvaikutuksista. Elohopea on raskasmetalleista erityisen huolestuttava, koska se herkästi höyrystyvänä metallina vapautuu poltossa ja kaasutuksessa lähes täydellisesti savu- tai tuotekaasuun. Jätteen sekapolton yhteydessä elohopeapäästöjä kontrolloidaan kehitetyillä erityistekniikoilla jo

monissa maissa. Yhdyskuntajätteiden energiahyötykäytön lisääntyessä uusia jätteen prosessointitapoja ja elohopeapäästöjen kontrollointivaihtoehtoja kehitetään. USA:ssa akuutti kysymys on hiilivoimaloiden elohopeapäästöjen rajoittaminen.

EU:n jätteenpolttodirektiivin mukaan (WID-direktiivi 2000) yhdyskuntajätteen polton elohopeapäästöraja on $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ (11 % O_2). Rajoitus koskee myös jätteen rinnakkaispolttolaitoksia. Myös useissa USA:n osavaltioissa on yhdyskuntajätteen polton elohopeapäästöille rajoituksia (Vidic ym. 2002, Position Paper 2001). USA:ssa sallitut päästötasot ovat $80\text{--}130 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ (7 % O_2). U.S.EPA:n (Fact Sheet 2000) tavoitteena on säätää elohopean päästörajat USA:n hiilivoimaloille vuoden 2004 loppuun mennessä. Rajoitukset tulisivat täysimääräisesti voimaan vuoden 2008 alusta lähtien. Kanadassa suuntaus hiilivoimaloiden elohopeapäästörajoitusten suhteen on samansuuntainen kuin USA:ssa. Myös EU:ssa, Australiassa ja Japanissa on käynnistymässä ohjelmia (Sloss 2002), joissa hiilivoimaloiden elohopeapäästöihin kiinnitetään yhä enemmän huomiota mahdollisten tulevien päästörajoitusten johdosta.

Tässä julkaisussa käsitellään elohopeapäästöihin liittyviä kysymyksiä fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa. Aluksi tarkastellaan fossiilisten polttoaineiden ja jätteiden elohopeapitoisuuksia ja selvitetään elohopean käyttäytymistä ja kontrollointivaihtoehtoja kivihiilen ja jätteiden poltossa. Elohopean käyttäytymisestä ja kontrollointivaihtoehdoista kaasutuksessa esitetään lyhyt yhteenveto. Lopuksi tarkastellaan esimerkkilaskelmin Suomessa kehitteillä olevan kierrätyspolttoaineen kaasutuskasun rinnakkaispolton vaikutusta hiili- ja turvekattilan elohopeapäästöihin.

2. Polttoaineiden elohopeapitoisuus

Erilaisten kivihiilien elohopeapitoisuus vaihtelee Ericksonin ym. (1999) mukaan välillä 0,01–1 mg/kg (keskimäärin 0,1 mg/kg). Elohopea on yleensä sitoutunut hiilissä esiintyvään sulfidimineraaliin, pyriittiin (FeS_2), kiinteänä liuoksena. Pohjolan ym.(1983) mukaan Suomessa käytettävien puolalaisten, venäläisten ja länsihiilien (USA, Iso-Britannia) elohopeapitoisuus vaihtelee välillä 0,005–0,15 mg/kg (keskimäärin 0,09 mg/kg). Alakankaan (2000) mukaan Suomessa käytettävien hiilien elohopeapitoisuus vaihtelee välillä 0,03–0,23 mg/kg (keskimäärin 0,11 mg/kg). Turpeen raskasmetallipitoisuudet vaihtelevat jonkin verran alueellisesti. Mittausten (Pohjola ym. 1983) mukaan turpeen elohopeapitoisuudet ovat vaihdelleet Suomessa välillä 0,06–0,075 mg/kg (keskimäärin 0,07 mg/kg). Puhtaassa puupolttoaineessa elohopeapitoisuus on alhainen, so. 0,01–0,02 mg/kg. Kyllästetyllä puulla pitoisuus voi olla jopa kymmenen kertaa suurempi kuin em. puhtaalla puulla (Alakangas 2000). Öljytuotteiden elohopeapitoisuudet (Position Paper 2001) ovat pieniä, koska raakaöljyn elohopeapitoisuus on yleensä vain ~ 0,01 mg/kg (satunnaisesti pitoisuus voi olla yli 30 mg/kg). Maakaasun elohopeapitoisuustasoksi on ilmoitettu (Position Paper 2001) 0–5 mg/m³. Ennen käyttöä maakaasun elohopeapitoisuus tulee kuitenkin laskea alle 0,01 mg/m³.

Yhdyskuntajätteen (MSW (Municipal Solid Waste) ja RDF (Refused Derived Fuel)) ja teollisuusjätteen sekä erilaisten jätevesilietteiden elohopeapitoisuus voi vaihdella suuresti (0,1–15 mg/kg) ajallisesti ja paikallisesti (Van Velzen ym. 2002, Sloss 2002). Kuitenkin erot esim. USA:ssa ja Euroopassa syntyvien sekajätteiden elohopeapitoisuuksissa ovat Van Velzenin ym. (2002) mukaan pieniä. Jätteiden elohopeapitoisuuksien sekä elohopean tuotanto- ja jätemäärien perusteella on arvioitu jätteiden keskimääräisen elohopeapitoisuuden olevan luokkaa 3–4 mg/kg (Van Velzen ym. 2002). Sekajätteen elohopea on peräisin pääasiassa jätteen sisältämistä elohopeapitoisista paristoista. Joidenkin tutkimusten (Van Velzen ym. 2002) mukaan jopa yli 90 % jätteen elohopean kokonaispitoisuudesta on peräisin paristoista. Helpoin keino pienentää elohopeapitoisuutta jätteissä onkin erottaa paristot tai pienentää paristojen elohopeapitoisuutta. Em. toimenpiteet 1990-luvulla ovat laskeneet Van Velzenin ym. (2002) katsauksen mukaan elohopeapitoisuutta jätteissä. Nykyään jätteen elohopeapitoisuus on keskimäärin n. 2 mg/kg. Koska sekajätteen joukkoon voi joutua hetkellisesti paljon elohopeaa sisältävä ainesosia, kuten paristoja, muuntajia tai lämpömittareita, voi myös jätteenpolton savukaasun elohopeapitoisuus vaihdella suuresti. Tämä seikka tuo ongelmia ja haasteita savukaasun puhdistustekniikalle ja samalla sallitujen elohopean päästörajojen noudattamiselle.

Sekajätteenpoltto on yleisin jätteenkäsittelytapa maailmalla, kun taas Suomessa sekajätteenpoltosta on vähän kokemuksia. Koska energiahuolto perustuu Suomessa pitkälti yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon, on luonnollista yhdistää jäte- ja energiahuolto kierrätyspolttoaineen valmistukseen ja käyttöön olemassa olevissa kattiloissa.

Kierrätyspolttoaineella (SRF (Solid Recovered Fuel)) tarkoitetaan yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua tasalaatuista polttoainetta (Juvonen & Moilanen 2002). Kierrätyspolttoaineen elohopeapitoisuus on mittausten mukaan (Juvonen & Hyvönen 2001) vaihdellut välillä 0,1–0,6 mg/kg, keskimääräinen pitoisuus on ollut 0,3 mg/kg. Yhteenveto em. polttoaineiden ja jätteiden elohopeapitoisuuksista on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Polttoaineiden ja jätteiden elohopeapitoisuuksia kuiva-aineessa, mg/kg.

MSW, RDF, Lietteet	Hiili	SRF	Turve	Puupolttoaine	Öljy	Maakaasu
0,1–15	0,01–1	0,1–0,6	0,06–0,08	0,01–0,02	~0,01	0,01*

* mg/m³

3. Elohopean kontrollointi hiilen ja jätteen poltossa

Elohopea on herkästi höyrystyvä metalli (kiehumispiste 357 °C), joka vapautuu elohopeaa sisältävän polttoaineen poltossa lähes kokonaan höyryfaasiin. Elohopean pidätystekniikan kehittämisen kannalta on oleellista tuntea elohopean käyttäytyminen polttoolosuhteissa. Elohopean kaksi pääasiallista esiintymismuotoa, metallinen ja hapettunut muoto, käyttäytyvät eri tavalla savukaasun puhdistuslaitteistoissa.

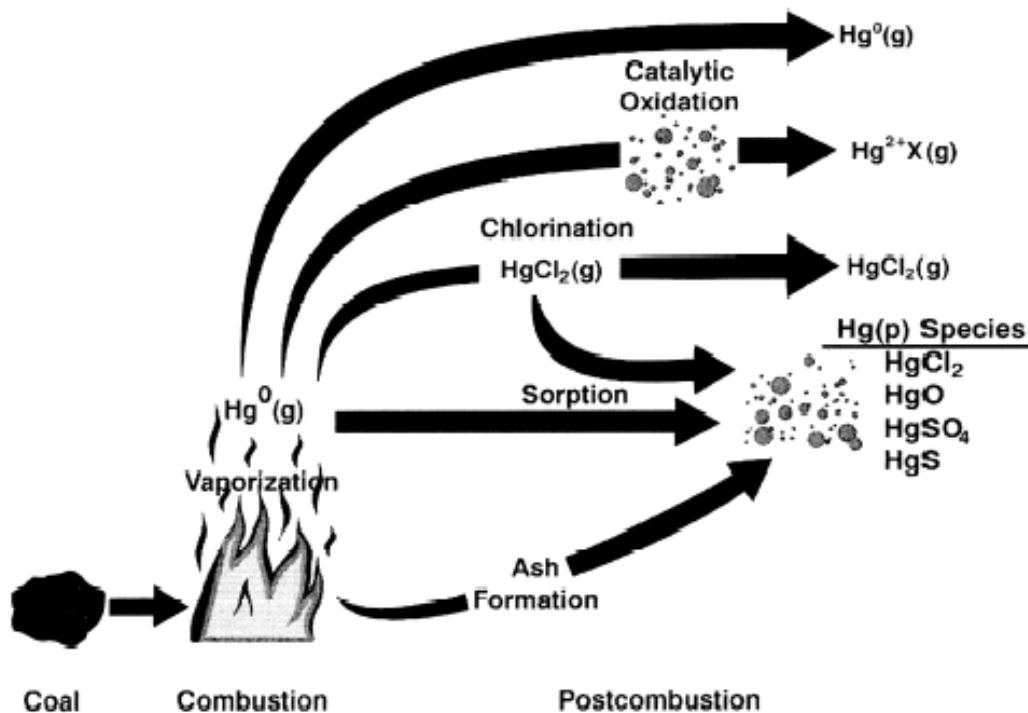
Elohopean pidätys jätteen sekapolton yhteydessä on onnistuttu toteuttamaan kehitetyillä tekniikoilla, vallitsevien elohopeapäästörajoitusten puitteissa, jo monissa maissa. Käytettyjä elohopean pidätystekniikoita ei voida kuitenkaan siirtää helposti hiilen polttoon, johtuen savukaasumäärien ja savukaasun koostumusten erilaisuudesta. Hiilivoimaloiden savukaasumäärät ovat paljon suurempia ja savukaasun elohopeapitoisuudet vain korkeintaan kymmenesosa jätteenpolton savukaasun elohopeapitoisuuksista. Hiilen poltossa myöskin savukaasun kloorin ja elohopean määrien suhde on pienempi kuin jätteenpoltoissa. Nämä ja muut eroavuudet kaasun koostumuksessa aiheuttavat yleensä sen, että helpommin pidätettävissä olevan hapettuneen elohopean määrä hiilen poltossa on pienempi kuin jätteen poltossa (Sloss 2002). Monilla jätteenpolttolaitoksilla on myös erillinen klooripesuri. Tämä saattaa edistää elohopean pidätystä. Lisäksi savukaasun viipyminen, jolla on vaikutusta myös elohopean pidätyksessä, on jätteenpolttolaitosten savukaasupuhdistimissa pitempi kuin hiilivoimaloiden puhdistimissa.

Seuraavissa kappaleissa esitetään yhteenveto elohopean käyttäytymisestä ja sen kontrollointivaihtoehdoista hiilen ja jätteen poltossa.

3.1 Elohopea poltossa

Polttolämpötilassa (> 700 °C) elohopea lienee metallisena termodynamiikan mukaisesti. Kaasun lämpötilan laskeessa sen kulkiessa kohti savukaasupuhdistimia voi tapahtua hapettavia reaktioita, jotka alentavat merkittävästi metallisen elohopean määrää kaasussa. Chen ym. (2002) mukaan hiilen poltossa, ennen savukaasun puhdistuslaitteistoja, Hg^{2+} :n määrä on kuitenkin eri tutkimuksissa vaihdellut suuresti (0–95 %). Elohopea voi hapettua sekä homogeenisesti että heterogeenisesti tai adsorboitua lentotuhkaan. Elohopean hapettuminen tapahtuu, esimerkiksi tyypillisessä ekonomaisemmin ulostulolämpötilassa (n. 380 °C), pääasiassa kaasufaasireaktioiden kautta. Tutkimukset osoittavat (Senior ym. 2000) kuitenkin, että lentotuhkan eri komponentit voivat katalysoida elohopean hapettumista varsinkin matalammassa lämpötiloissa, kuten sähkösuodattimen sisäänmenolämpötilassa (n. 130 °C). Rautaoksidin on todettu edistävän hapettumista ja palamattoman hiilen sekä kalsiumyhdisteiden on havaittu vaikuttavan hapettumiseen. Myös

happamien kaasujen (HCl, SO₂, NO_x) läsnäololla savukaasussa, yhdessä lentotuhkan kanssa, on merkitystä elohopean hapettumiskäyttäytymiseen (Galbreath & Zygarrlicke 2000, Pavlish ym. 2003) (kuva 1). Termodynaamisten tarkastelujen perusteella elohopea on savukaasussa pääasiassa HgCl₂:a lämpötilan ollessa 300–700 °C. Useiden tutkijoiden (Chen ym. 2002) mielestä hiilen klooripitoisuus onkin tärkein elohopean hapettumiseen vaikuttava tekijä. Elohopeakloridin muodostuminen tapahtuu atomaarisen kloorin ja metallisen elohopean välisten reaktioiden kautta. Suoritetut mittaukset ja kineettiset laskelmat kuitenkin osoittavat, että johtuen savukaasun nopeasta jäähtymisestä ja lyhyestä viipymästä em. lämpötila-alueella, elohopeayhdisteet eivät ole kaasussa keskenään tasapainossa ennen hiukkaserotinta.



Kuva 1. Elohopean oletettu käyttäytyminen hiilen poltossa (Galbreath & Zygarrlicke 2000).

Hapettunut elohopea (Hg^{2+}) liukenee mm. vesiliuoksiin, ja sen pidättäminen on suhteellisen tehokasta kaasun puhdistuksen, kuten hiukkaserotuksen ($\text{Hg}(\text{p})$) sekä märän tai puolikuivan rikinpoiston, yhteydessä. Sitä vastoin metallinen elohopea läpäisee herkästi tavanomaiset puhdistuslaitteet ja vapautuu savupiipun kautta ilmakehään. Esimerkiksi sekajätteen poltossa (Van Velzen ym. 2002) hapettunut elohopea (elohopeakloridi) adsorboituu yli 90 %:sti hiukkaserotuksessa aktiivihiiipohjaisia sorbentteja käytettäessä. Sitä vastoin metallisesta elohopeasta adsorboituu vain alle 30 %. Vastaavasti märkäpeseurissa hapettuneen elohopean pidätystehokkuus on yli 95 % mutta metallisen elohopean adsorboituminen on hyvin vähäistä (< 10 %). Toisaalta sekä sekajätteen että hiilen

polton yhteydessä on havaittu (Senior ym. 2000, Van Velzen ym. 2002), että osa hapettuneesta elohopeasta pelkistyy märkäpesureissa metalliseksi elohopeaksi ja vapautuu savukaasuun. Van Velzen ym. (2002) mukaan sekajätteen polton käsittelemättömän savukaasun elohopeapitoisuus on keskimäärin $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ (Hg: määrä jätteessä $2 \text{ mg}/\text{kg}$). EU:n jätteenpolttodirektiivin elohopeapäästörajan ollessa $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ täytyy elohopean pidätystehokkuuden olla n. 90 %.

EPA:n selvitysten mukaan (Sloss 2002) keskimäärin vain 40 % USA:n hiilivoimalaitoksilta vapautuvasta elohopeasta pidättyy lentotuhkaan ja savukaasupesureilta tuleviin poistovirtoihin. Loput 60 % emittoituu ilmakehään. Erot eri voimaloiden elohopean pidätystehokkuudessa ovat kuitenkin suuria. Pidätystehokkuus on vaihdellut välillä 10–90 %. Koska hapettunut elohopea on helpommin poistettavissa savukaasusta ja koska bitumista hiiltä polttavien laitosten on todettu tuottavan enemmän hapettunutta elohopeaa (mm. hiilen korkeasta klooripitoisuudesta johtuen) kuin muita hiililaatuja käyttävien laitosten, ovat bitumista hiiltä polttavat laitokset kaikkein parhaita kohteita elohopeapäästöjen kontrolloimisessa. Joillakin laitoksilla voi olla mahdollista myös hiililaadun vaihtaminen tai eri hiililaatujen sekoittamisvaihtoehdot. Tavanomaisella hiilivoimalaitoksella käsittelemättömän savukaasun elohopeapitoisuus on vain luokkaa $1\text{--}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Senior ym. 2000). Vaikka näin alhainenkin pitoisuustaso on nykyisillä mittalaitteilla havainnoitavissa, on eri elohopeayhdisteiden mittaaminen kuitenkin vielä hankalaa. Mittalaitteiden kehittyessä lisääntynee hiilen poltosta vapautuvan elohopean käyttäytymisen ymmärtäminen.

Elohopean käyttäytymistä on tutkittu eniten hiilen pölypolton sekä sekajätteen arinapolton yhteydessä. Sen sijaan elohopean käyttäytymisestä leijukerrospolton yhteydessä on vähemmän tietoa (Sloss 2002). Leijukerrospoltoissa (erityisesti kiertoleijukerros) elohopeapäästöt voivat olla kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin pölypolttolaitoksilla, mikä johtuu kaasun pidemmistä kontaktiajoista käytettävän patjamateriaalin (sorbentin) ja tuhkan sisältämän palamattoman hiilen kanssa.

3.2 Elohopeapäästöjen kontrollointi

3.2.1 Polttoaineen puhdistus ja lajittelu

Hiilen fysikaalinen puhdistus perustuu hiilen orgaanisten ja epäorgaanisten komponenttien erottamiseen toisistaan tiheyden tai pintaominaisuuksien perusteella. Hiilen kemialliseen puhdistukseen kuuluvia prosesseja ovat mm. liotusuutto ja lämpökäsittely (Sloss 1995). Ainoastaan hiilen fysikaalinen puhdistustekniikka on nykyään kaupallisessa käytössä. Hiilen kemiallisia puhdistustekniikoita tutkitaan mm. elohopean poistamisen kannalta, ja ne voivat kaupallistua. US DOE (Department of Energy):n tutkimuk-

sen (Sloss 2002) mukaan keskimäärin 37 % hiilen sisältämästä elohopeasta voidaan poistaa tavanomaisessa hiilen fysikaalisessa puhdistuksessa. Prosessissa hiilen sisältämä pyriitti, jonka yhteydessä elohopeakin usein esiintyy, voidaan poistaa suurimmaksi osaksi. Puhdistusprosessin tehokkuus, joka riippuu kuitenkin suuresti puhdistettavan hiilen laadusta, voi vaihdella 4–70 %. Kohtuullisella hiilen lämpökäsittelyllä (290 °C) on päästy 70–80 %:n elohopean poistotehokkuuksiin (Guffy ym. 2002). Vaikkakin mahdollisuudet alentaa hiilen elohopeapitoisuutta hiilen puhdistuksella ovat merkittävät (Sloss 1995), ovat puhdistuksen tehokkuuden vaihtelut ja sen huono ennustettavuus menetelmän haittoja. Hiilen puhdistus vaikuttaa myös voimalaitoksen lentotuhkamäärään ja tuhkan kemialliseen koostumukseen, mikä puolestaan voi vaikuttaa mm. sähkösuodattimen toimintaan. Näin ollen hiilen ja savukaasun puhdistus liittyvät toisiinsa, mm. elohopean kontrolloinnin suhteen. Vaikka hiilen puhdistus vähentää kaasumaisia elohopeapäästöjä, se lisää elohopean määrää mm. puhdistusprosessin jätevesissä ja voi näin luoda toisen elohopeapäästöongelman.

Sekajätteen poltossa polttoaineen elohopeapitoisuutta voidaan helpoiten vähentää poistamalla jätteen joukosta ennen polttoa tunnetusti paljon elohopeaa sisältävät komponentit kuten paristot, muuntajat ja lämpömittarit. Toisena luonnollisena vaihtoehtona on vähentää elohopean käyttöä em. tuotteiden valmistuksessa. Kierrätyspolttoaineen valmistuksella ja sen laadun valvonnalla voidaan estää paljon elohopeaa sisältävien ainesosien pääsy polttoaineen joukkoon ja saadaan myös elohopeapitoisuuden suhteen tasalaatuista polttoainetta.

3.2.2 Elohopean pidätys hiilen poltossa

Hiilen pölypoltossa käytetään savukaasun puhdistukseen erilaisia puhdistimia. Toiminnassa olevilla laitoksilla on hiukkaserottimet, ja useilla laitoksilla on käytössä myös erilaisia rikin ja typen oksidien poistotekniikoita. Näissä puhdistusprosesseissa on mahdollista erottaa savukaasusta myös raskasmetallit, kuten elohopea. Hiilivoimaloiden elohopeakysymyksiä koskevia ajankohtaisia tutkimustuloksia on esitetty kootusti amerikkalaisissa konferensseissa: Air Quality III Conference, 2002 & Pittsburgh Coal Conference, 2002. Yhteenvetoja hiilen polton elohopeakysymyksistä on esitetty myös IEA (International Energy Agency):n raporteissa (Sloss 1995 & 2002). Uusimman ajankohtaiskatsauksen aiheesta ovat julkaisseet Pavlish ym. (2003).

NO_x:n muodostumisen ehkäisyyn käytetään yleisesti ilmaylimäärällä toimivia Low NO_x-polttimia, joissa palaminen tapahtuu alemmassa lämpötilassa kuin tavanomaisissa polttimissa. Low NO_x -polttimet voivatkin vaikuttaa elohopeaemissioihin muuttamalla hapettuneen elohopean ja metallisen elohopean suhteellisia määriä kaasussa. Toisaalta Low NO_x -polttimet voivat lisätä palamattoman hiilen määrää tuhkassa. Onkin ilmeistä,

että jos palamattoman hiilen määrä lisääntyy polttimien käytön seurauksena, myös elohopean hapettuminen ja adsorboituminen hiukkasiin lisääntyy. Kokeellista tietoa elohopean käyttäytymisestä Low NO_x -polttimien yhteydessä on kuitenkin vähän (Sloss 2002). Lissianskin ym. (2002) mukaan nyt kokeiluvaiheessa olevalla prosessilla voidaan hiilen vaiheistuspolttoa apuna käyttäen vähentää kattilan NO_x- ja Hg-päästöjä merkittävästi. Vaiheistuspoltoissa syntyvä hiilipitoinen lentotuhka pystyy adsorboimaan savukaasun sisältämää elohopeaa tehokkaasti. Tämän jälkeen savukaasusta erotettu elohopeapitoinen lentotuhka poltetaan leijukerrosreaktorissa, ja syntyvästä savukaasusta vapautuva elohopea sidotaan aktiivihiileen.

Taulukossa 2 on esitetty, USA:n hiilivoimalaitoksilta kerättyjen tietojen perusteella, elohopean pidättyminen erilaisissa savukaasun puhdistusprosesseissa (Sloss 2002) erilaisia hiililaatuja käytettäessä. Yhteenvetona tuloksista voidaan todeta (Sloss 2002, Sjostrom ym. 2002a, Pavlish ym. 2003):

- Elohopean pidätys hiilivoimalaitosten savukaasupuhdistimissa vaihtelee suuresti. Jopa 90 % hiilen sisältämästä elohopeasta voi pidättyä. On myös tapauksia, joissa elohopeaa ei pidäty juuri lainkaan. Hapettunut elohopea on helpommin poistettavissa savukaasusta kuin metallinen elohopea.
- Hiukkaserottimista tehokkain elohopean pidätyksessä on kuitusuodatin. Kuitusuodattimet poistavat elohopeaa tehokkaammin kuin sähkösuodattimet, mikä johtuu mm. elohopean pidemmästä adsorptioajasta kuitusuodattimella. Kuitusuodattimien elohopean pidätys riippuu lisäksi mm. savukaasun lämpötilasta, tuhkan sisältämästä hiilimäärästä ja poltetun hiilen laadusta. Lämpötilan laskiessa ja tuhkan hiilimäärän lisääntyessä elohopean pidätys paranee. Myös matalassa lämpötilassa toimivat sähkösuodattimet pidättävät tehokkaammin elohopeaa kuin korkeassa lämpötilassa toimivat suodattimet.
- Hiilen klooripitoisuudella on suuri merkitys elohopean pidätyksessä. Klooripitoisuuden kasvaessa elohopean hapettuminen ja pidätys hiukkaserottimissa lisääntyy. Hiilillä, joiden klooripitoisuus on korkeampi kuin 200 ppmw, suuri osa elohopeasta on adsorboitunut partikkeleihin ennen hiukkaserottimia. Hiilen sisältämät rautamieneraalit katalysoivat elohopean hapettumista. Toisaalta hiilen rikki- ja/tai kalsiumpitoisuuden lisääntyessä elohopean hapettuminen ja pidätys voi heiketä. Kuitusuodattimelle tulevasta metallisesta elohopeasta hapettuu 40–85 %. Tällöin eniten hapettumista tapahtuu bitumisia hiiliä käytettäessä. Sähkösuodattimelle tulevasta metallisesta elohopeasta hapettuu vai 25–40 %. Tällöin huonommilla (subbitumiset, ligniitit) hiililaaduilla metallisen elohopean hapettumista ei juurikaan tapahdu.

- Märet rikinpoistotekniikat poistavat yleisesti vähintään 50 % savukaasun sisältämästä elohopeasta. USA:n hiilivoimaloissa määrällä rikinpoistotekniikalla voidaan poistaa keskimäärin 90 % savukaasun sisältämästä hapettuneesta elohopeasta. Elohopeen pidätyksessä hiililaadulla on tärkeämpi merkitys kuin käytetyllä rikinpoistotekniikalla. Bituumista hiiltä polttavilla laitoksilla, jolloin hiilen klooripitoisuus on korkea, elohopean pidätys rikinpoiston yhteydessä on tehokkainta. Tällöin myös hiilen rikki- ja klooripitoisuuden lisääntyessä elohopeanpidätys paranee. Kuitusuodattimella varustetulla puolikuivalla rikinpoistotekniikalla voidaan saavuttaa 90 %:n elohopean pidätystehokkuus. Puolikuivaprosessissa pesurin elohopean pidätystehokkuus vaihtelee laajoissa rajoissa (0–99 %) ollen keskimäärin n. 38 %.
- Selektiivisessä katalyyttisessä, toisin kuin ei-katalyyttisessä, NO_x:n pelkistysprosessissa (SCR, selective catalytic reduction) osa metallisesta elohopeasta hapettuu. Hiililaadulla on ilmeisesti tässäkin prosessissa merkittävä vaikutus.

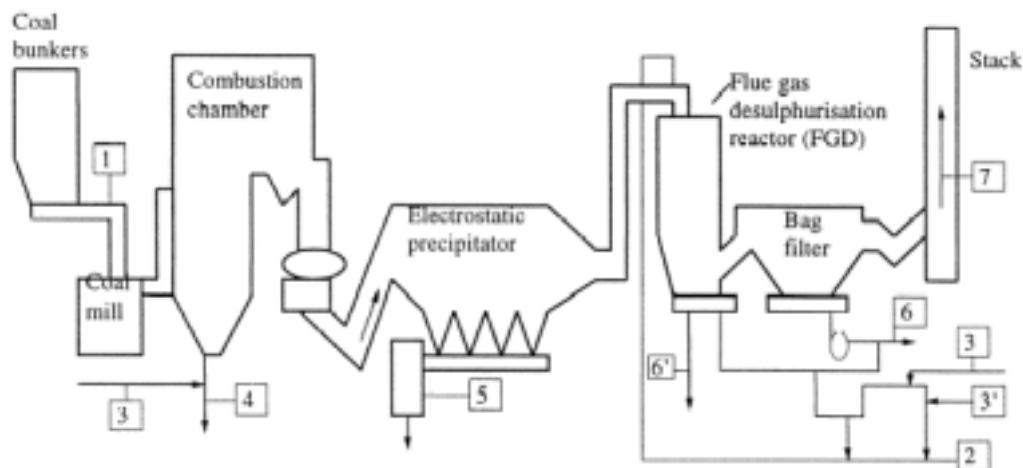
Taulukko 2. Elohopeen erotustehokkuuksia hiililaaduittain erilaisilla savukaasupuhdistimilla varustetuissa hiilivoimaloissa (Sloss 2002).

Control device	Temp. °C	Bituminous coal Hg removal data* %		Subbituminous coal Hg removal data %		Lignite Hg removal data %		All coals %	
Cold side ESP	130–170	56	9	12	4	47	1	42	14
Hot side ESP	250–400	27	3	9	2			20	3
Baghouse	130–170	85	7	75	2	58	1	82	10
Wet scrubbers	130–170							26	2
Wet FGD + cold ESP	130–170	51	7	27	3	48	4	45	14
Wet FGD + hot ESP	130–170			35	3			35	3
Wet FGD + baghouse	130–170					73	2	73	2
Wet FGD + wet scrubber	130–170	12	1	18	2			16	3
Spray dry FGD + ESP	130–170			53	2			53	2
Spray dry FGD + baghouse	130–170	83	5	22	2	25	3	53	10

* number of plants studied

VTT on mitannut ja tutkinut (Aunela-Tapola ym. 1998, ECSC 2000) raskasmetallien, mm. elohopean, käyttäytymistä Helsingin hiilivoimalaitoksilla, joissa käytetään puolikuivaa rikinpoistomenetelmää (kuva 2). Polttoaineena on ollut puolalainen bituminen kivihiili, jonka elohopeapitoisuus on vaihdellut 0,08–0,15 mg/kg. Suomessa käytettävän puolalaisen hiilen rikki- ja klooripitoisuus vaihtelee (Karjalainen 2002) tyypillisesti 0,4–0,8 p-% ja vastaavan venäläisen hiilen 0,3–0,5 p-%. Venäläisen hiilen klooripitoisuus on alhainen n. 0,01 p-%. Sen sijaan puolalaisen hiilen klooripitoisuus on huomattavasti kor-

keampi, vaihtelun ollessa 0,15–0,4 p-%. Tyypillinen arvo on n. 0,2 p-%. Mitatut elohopean päästötasot laitoksilta ovat olleet alle $5 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$, mikä on alle kymmenesosa EU:n jätteenpolttodirektiivin raja-arvosta ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$). Kaasumaisesta elohopeasta on todettu olevan likimain yhtä suuret määrät metallisessa ja hapettuneessa muodossa. Elohopean kokonaispidätysaste laitoksilla on ollut luokkaa 60–70 %. Sähkösuodattimessa laitosten elohopean erotusaste on ollut 50–60 %. Rikinpoistoyksikön (pesuri + kuitusuodatin) osuus elohopean kokonaispidätyksestä on ollut noin 10–15 %. Kuitusuodattimelle tulevasta elohopeasta pidättyy mittausten mukaan 40–50 %.



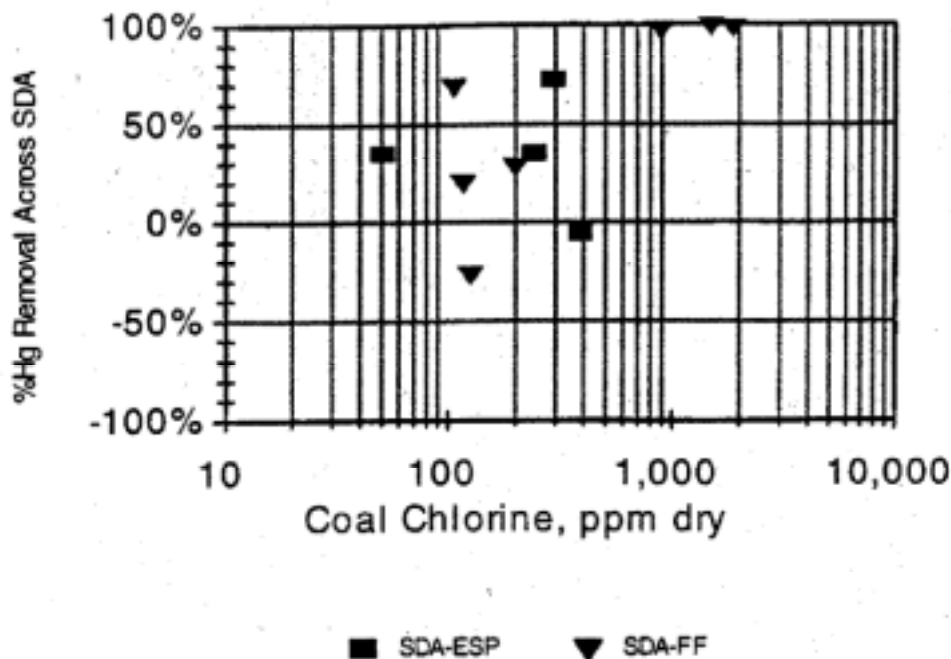
Kuva 2. Kaavio hiilivoimalaitoksesta, jossa käytetään puolikuivaa rikinpoistotekniikkaa. Sisään syötettävät ainevirrat: 1. hiili, 2. kalkki, 3. merivesi, 3' raakavesi. Ulostulevat ainevirrat: 4. pohjatuhka, 5. sähkösuodattimen tuhka, 6. rikinpoiston lopputuote, 6' rikinpoistotuote, 7. savukaasu. (Aunela-Tapola ym. 1998).

Kuten edellä todettiin, USA:ssa tehtyjen laitosmittausten perusteella hiilen klooripitoisuudella (kuva 3) ja hiilen laadulla (kuva 4) on suuri merkitys elohopean pidättymiseen hiukkaserottimissa ja rikinpoistolaitteistoissa. Korkea klooripitoisuus lisää hapettuneen (Hg^{2+}) elohopean määrää savukaasussa suhteessa metalliseen elohopeaan. Hapettunut elohopea voidaan poistaa hiukkaserottimissa ja rikinpoistossa suhteellisen tehokkaasti metalliseen elohopeaan verrattuna. Suomessa käytettävissä bitumisissa hiilissä on yleensä korkea klooripitoisuus (puolalainen hiili), mikä selittää osaltaan mittauksissa todetun sähkösuodattimen suhteellisen korkean elohopean pidätysasteen. Myös kivihii- len tuhkan määrällä ja laadulla on vaikutusta. Subbitumisissa hiilissä ja ligniiteissä klooripitoisuus on alhaisempi kuin bitumisissa hiilissä. Siksi elohopean pidätys näissä tapauksissa onkin hankalampaa.

On siis mahdollista, että erityisesti bituumista hiiltä polttavat laitokset voivat saavuttaa jopa 90 % elohopean pidätyksen käyttämällä vain olemassa olevia savukaasun puhdistimia (Low NO_x -poltin, hiukkaserotin, rikinpoisto ja NO_x:n katalyyttinen pelkistys).

Koska elohopean pidätystehokkuutta ei vielä voida ennakoida luotettavasti, on jokainen laitos arvioitava tapauskohtaisesti. Tulevaisuudessakin hiilivoimaloiden elohopeapäästöjen kontrolloiminen perustunee pitkälti laitospuolikuivattamiseen ja laitoksella käytettävään hiililaatuun.

Vaikka hiilivoimalaitoksilla käytössä olevien puhdistuslaitteistojen on todettu poistavan huomattavia määriä savukaasun sisältämästä elohopeasta, ei laitteistoja ole kuitenkaan suunniteltu elohopean pidätyksen kannalta optimaalisiksi. Maailmalla onkin menossa paljon tutkimus- ja kehitystyötä, jolla pyritään parantamaan olemassa olevia ja kehittämään uusia menetelmiä hiilivoimaloista peräisin olevan elohopean kontrolloimiseksi. Työtä tehdään erityisesti USA:ssa, koska siellä hiilivoimaloiden elohopeapäästöt tullaan rajoittamaan ensimmäisinä.



Kuva 3. Savukaasun elohopean pidätysaste puolikuivalla rikinpoistomenetelmällä (SDA) (hiukkaserotus sähkö(ESP)- tai kuitu(FF)suodattimella) hiilen klooripitoisuuden funktiona eri laitoksilla (Senior ym. 2000).

Tärkeä huomioon otettava seikka elohopeapäästöjen kontrolloimisessa on puhdistusprosessin aiheuttamat kustannukset. Siksi monien tutkimushankkeiden päämääränä on ennemminkin parantaa olemassa olevia puhdistusprosesseja kuin kehittää aivan uusia menetelmiä. Elohopean pidätystä hiukkaserotimissa voidaan tehostaa em. perusteella polttoolosuhteita muuttamalla (Low NO_x -polttimet, ilman ja polttoaineiden vaiheistus), jolloin mm., elohopean adsorbtiota edistävän, palamattoman hiilen määrä lentotuhkassa lisääntyy. Chen ym. (2002) mukaan elohopean homogeenisen hapettumisen edis-

tämiseksi voitaisiin savukaasukanavaan, ekonomaiserin jälkeen, lisätä savukaasun viipymää pidentävä isoterminen vyöhyke.

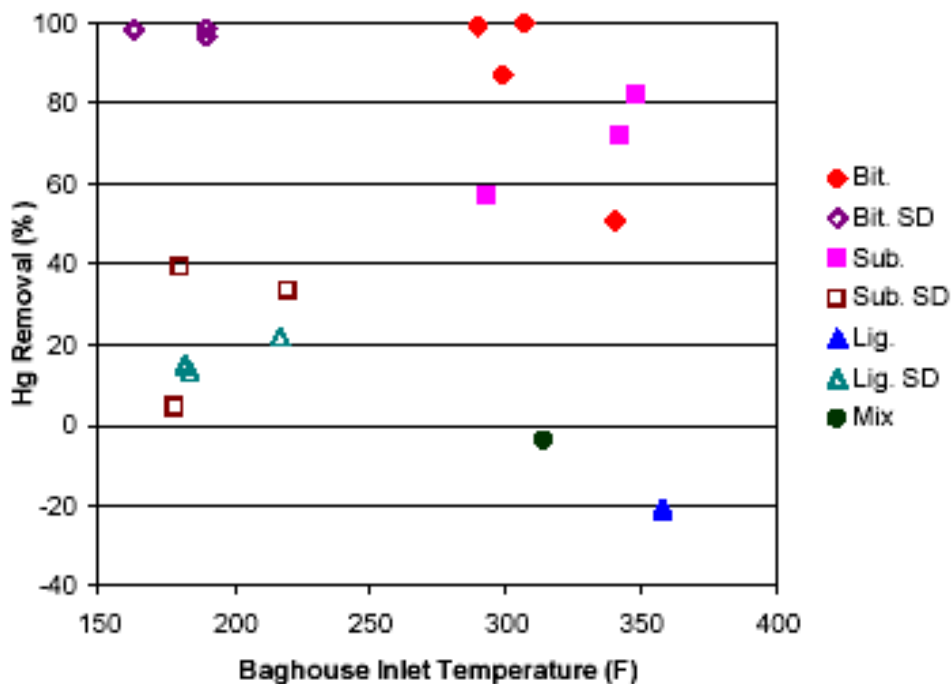
Lukuisat menetelmät, jotka perustuvat mm. erilaisten kemikaalien ja sorbenttien lisäykseen ja käyttöön savukaasuun puhdistamiseksi mm. elohopeasta, ovat kokeiluasteella. Tällöin lentotuhkan tai käytettyjen sorbenttien elohopeanpidätyksen tehokkuuden parantamiseksi savukaasun lämpötilaa pyritään alentamaan. Koska aktiivihiiltä käytetään yleisesti jätteenpolton sisältämän savukaasun dioksiinien ja elohopean pidättämisessä, on aktiivihiilen käyttö hyvä vaihtoehto myös elohopean pidättämiseksi hiilivoimalaitoksilla. Kuten edellä mainittiin, poikkeavat hiilen polton olosuhteet monessa suhteessa jätteenpolton olosuhteista. Tämän vuoksi hiilen polton olosuhteissa hiilisorbenteilla on usein ollut ongelmia saavuttaa tavoiteltuja elohopean pidätysasteita. Elohopean pidätystehokkuuden on todettu (Pavlish ym. 2003) riippuvan suuresti myös käytetyn aktiivihiilen partikkelikoosta ja sen sekoittumisesta savukaasuun. Partikkelikoon pienetessä ja sekoittumisen tehostuessa pidätys paranee. Lukuisia muita, yleensä aktiivihiiliä edullisempia, elohopean pidätykseen sopivia sorbenteja, tutkitaan. Tutkimukset ovat kuitenkin vielä alkuvaiheessa eikä parasta sorbenttia voida vielä nimetä (Sloss 2002).

Sorbenttimenetelmän haittapuolia, varsinkin aktiivihiilen tapauksessa, ovat kuitenkin menetelmän kalleus ja kiinteän jätteen sijoitusongelmat. Vaikka hiilipitoisen lentotuhkan elohopean pidätystehtävyys on vain kymmenesosa aktiivihiileen verrattuna, uskotaan sen silti olevan edullisempi vaihtoehto elohopean pidätykselle (Butz & Albiston 2000, Sloss 2002). Lissianskin ym. (2002) mukaan menetelmä, jossa hiiltä käytetään rinnakkaispolttoaineena lisäämään mm. palamattoman hiilen määrää lentotuhkassa ja näin elohopean pidätystä, on vain puolet aktiivihiilen käytön kustannuksista.

Koska tulevaisuudessa hiilivoimalaitosten lentotuhkien elohopeapitoisuus kasvaa elohopeanpidätyksen lisääntyessä, voi sijoitetuista tuhista/sorbenteista vapautua elohopeaa ympäristöön mm. sääolosuhteiden (auringon valo, lämpötila) vuoksi. Elohopeaa on todettu (Pavlish ym. 2003) vapautuvan aktiivihiilistä jo n. 135 °C:ssa. Hiilivoimaloiden lentotuhkaa käytetään usein lannoitteena ja rakennusmateriaaleissa, kuten sementissä, laasteissa ja seinälevyissä. Lentotuhkan sisältämä aktiivihiili tai palamaton hiili vaikuttaa sen stabiilisuuteen betonin valmistuksessa (Sloss 2002). Jos palamattoman hiilen osuus tuhkassa on yli 5 %, niin sitä ei voi yleensä käyttää sementin ja betonin valmistukseen.

Myös katalyyttisiä, erilaisten kemikaalien ja sähkön käyttöön (mm. koronapurkaus) perustuvia elohopean hapetusprosesseja samoin kuin märkää sähkösuodatinta, jolla voitaisiin kontrolloida tehokkaasti monia savukaasun epäpuhtauksia, kehitetään (Sloss 2002). Viimeaikainen kehitystyön suuntaus hiilen polton elohopean kontrolloimisessa onkin ollut sorbenttitekniikan lisäksi vaihtoehtoisten elohopean hapetusmenetelmien kehittämisessä. Kuten edellä on todettu, hapettunut elohopea voidaan poistaa suhteelli-

sen helposti savukaasusta olemassa olevilla puhdistuslaitteilla. USA:n hiilivoimalaitoksilta kerätyn aineiston perusteella metallisen elohopean hapetusprosesseja olisi kaikkein tehokkainta käyttää ligniittiä tai subbituumista hiiltä polttavilla laitoksilla, joissa suurin osa elohopeasta ei muutoin hapetu. Märällä rikinpoistotekniikalla varustettujen laitosten elohopean hapettumista ja pidätystä pyritään edistämään pesuliuoksiin lisättävillä hapettavilla lisäaineilla. Myös ennen pesuria käytettäviä katalyyttisiä hapetusprosesseja kehitetään. Monet kehitteillä olevat katalyyttiset menetelmät (Sloss 2002) ovat kuitenkin vielä varhaisessa vaiheessa, eikä niiden käyttökelpoisuudesta ole vielä riittävää varmuutta.



Kuva 4. Savukaasun elohopean pidätysaste kuitusuodattimessa ilman kalkkipesuria (puolikuiva) (umpinainen symboli) ja pesurin kanssa (avoin symboli) erityyppisiä hiiliä poltettaessa (Sjostrom ym. 2002b).

Erityisen lupaavia savukaasun puhdistuskeinoja ovat, tavanomaisia menetelmiä tehokkaammat, uudet hiukkaserotusprosessit (Sloss 2002). AHPC (Advanced hybrid particulate collector) -menetelmässä on yhdistetty kuitu- ja sähkösuodattimen toiminta. Menetelmällä on päästy yli 99,99 %:n hiukkaspidätyksiin partikkelikokovälillä 0,01–50 µm. Elohopean pidätyksessä, hiilisorbentteja käyttäen, menetelmällä pyritään saavuttamaan 90 %:n erotustehokkuus (Miller ym. 2002). COHPAC (Compact hybrid particulate control technology) -tekniikassa (Sloss 2002) sähkösuodattimen jälkeisellä kuitusuodattimella parannetaan hiukkasten ja elohopean pidätystä. Uudet tekniikat kestävät myös paremmin suurempia hiukkaskuormia kuin vanhat erottimet. Tällä on merkitystä erityisesti silloin, kun elohopean kontrolloimisen tehostamiseksi savukaasun puhdistamisessa joudutaan käyttämään erilaisia sorbentteja.

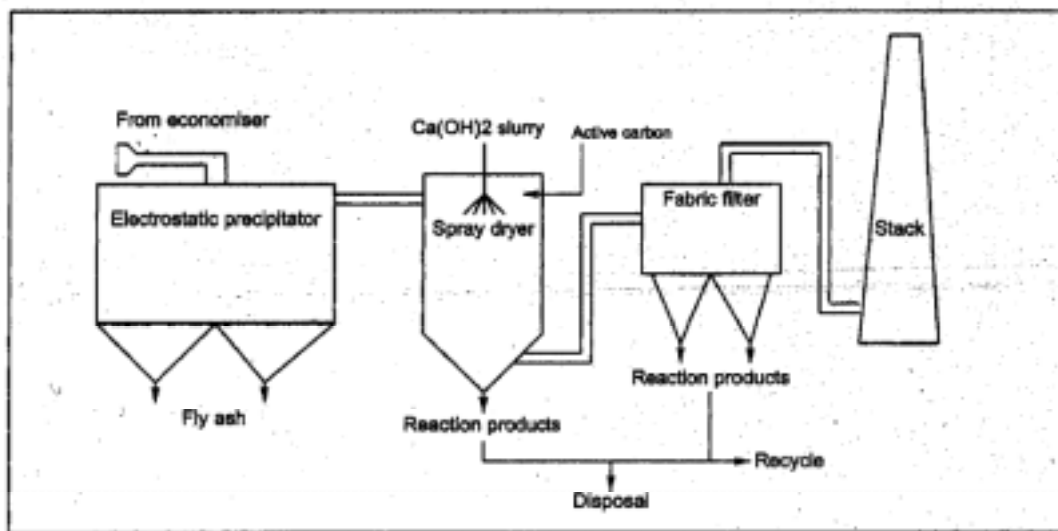
3.2.3 Elohopean pidätys jätteenpoltossa

Jätteiden elohopeapitoisuus voi vaihdella suuresti syntypaikasta ja -ajasta riippuen. Jätteenpolttolaitokset voidaan luokitella (Position Paper 2001): yhdyskuntajätteen polttoon (MWC, municipal waste combustion), sairaalajätteen polttoon (MWI, medical waste incineration) ja jätevesilietteen polttoon (SSI, sewage sludge incineration). Jätteenpolttolaitoksilta emittoituva elohopea on suurimmaksi osaksi kaasumaista. Savukaasun puhdistimien (hiukkaserottimet, pesurit) tehokkuus elohopean pidätyksessä perustuu niiden alhaiseen toimintalämpötilaan ja elohopeaa adsorboivien sorbenttien, kuten aktiivihiiilen ja natriumsulfidin, käyttöön. Aktiivihiiilen tai natriumsulfidin injektointi savukaasuun ennen hiukkaserottimia (sähkö- tai kuitusuodin) on USA:sta poiketen yleistynyt Euroopassa, Kanadassa ja Japanissa (Position Paper 2001). Jätteen polton elohopeakysymyksiä ovat käsitelleet laajemmin Van Velzen ym. (2002) tekemässään kirjallisuuskatsauksessa sekä EU:n elohopeatyöryhmä tilanneraportissaan; Position Paper 2001.

Jätteenpolttolaitoksilla, joissa käytetään savukaasun puhdistuksessa puolikuivaa rikin-/kloorinpoistomenetelmää, elohopeapäästöt hallitaan yleensä aktiivihiiilipohjaisilla sorbenteilla (kuva 5). Tavanomaiseen puolikuivaprosessiin verrattuna tällöin tarvitaan yleensä ylimääräinen laitteisto aktiivihiiლისorbentien syöttämiseksi absorptioreaktoriin. Lopullinen hiukkaserotus tapahtuu kuitusuodattimella. Elohopean kokonaispidätysaste on luokkaa 87–94 % (VanVelzen ym. 2002). Käytettäessä savukaasun puhdistukseen märkäpesureita voidaan metallisen elohopean absorptiota parantaa aktiivihiiili ja/tai rikkilisäyksillä. Kaikkein tehokkaimpana keinona on varsinaisten hapettimien, kuten vetyperoksidin tai natriumhypokloriitin (TMT-15), käyttö lisäaineina. Taulukossa 3 on esitetty yhteenveto elohopean erottumisesta jätteenpoltossa eri savukaasun puhdistustavoilla. Jätteenpolton savukaasuissa tyypillinen arvo $\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}^0$ suhteelle on välillä 70/30 ja 80/20 (VanVelzen ym. 2002).

Jätteenpolton savukaasun elohopeapitoisuuden on raportoitu (Seiffert & Lüder 2002) voivan vaihdella suuresti, jos jätteen joukkoon joutuu paljon elohopeaa sisältäviä ainesosia, kuten paristoja tai lämpömittareita. Kuvassa 6 on esitetty jatkuvatoimisen elohopeapitoisuusmittauksen tulos tällaisessa tapauksessa. Elohopean pitoisuus savukaasussa on moninkertainen tavanomaiseen verrattuna, ja lisäksi pitoisuuden tasoittuminen normaalitasolle kestää useita tunteja, jopa päiviä. Tapahtuma on lisäksi haitallinen pesureilta tulevien ainevirtojen (suolahappo, kipsi) hyödyntämiseksi elohopeakontaminaation vuoksi. Paras tapa ehkäistä em. ilmiö olisi tehokas jätteen esilajittelu. Vaihtoehtoisesti elohopeapitoisuuden vaihtelua voidaan kompensoida savukaasun puhdistuksessa pesuriratkaisuilla, joissa käytetään mm. suuria nestemääriä puhdistimen puskurikapasiteetin nostamiseksi. Esimerkkinä tällaisesta prosessiratkaisusta on MercOx-niminen pesuprosessi (Andersson 2001), jossa käytetään suurta nestevolyymia ja pesuliokseen lisätään vetyperoksidia, jolloin metallinen elohopea hapettuu ja pidättyy tehokkaasti

(99,99 %) pesussa. Samassa pesurissa myös SO_2 hapettuu rikkihapoksi ja HCl pidättyy. Prosessin etuna kuiviin puhdistusmenetelmiin verrattuna todetaan olevan myös tuotteen saatava väkevöitynyt ja pienempi elohopeapitoinen jätevirta.



Kuva 5. Kaavio jätteenpolton puolikuivasta savukaasun puhdistusprosessista (Van Velzen ym. 2002).

Jätteenpolton savukaasujen puhdistamisessa syntyy elohopeapitoisia kiinteitä ja neste-mäisiä jätevirtoja. Van Velzenin ym. (2002) mukaan savukaasun puhdistusprosessista so. märkä-, puolikuiva- ja kuivaprosessista, syntyy kolmen tyyppisiä jätteitä. Kuiva- ja puolikuivaprosesseista syntyy kattilan pohjatuhkaa ja lentotuhkaa sähkö- ja kuitusuodattimelta. Märkäprosessista syntyy kattilan pohjatuhkan lisäksi neutralointilietettä. Kuitusuodattimelta peräisin oleva jäte sekä neutralointiliete luokitellaan yleensä ongelmajätteeksi, joka loppusijoitetaan ympäristövaatimusten mukaisesti. Ainoastaan kuivaprosessissa kaikki lentotuhka päättyy ongelmajätteeksi. Siksi sen sijoituskustannukset voivat olla kalliimpia kuin muiden em. prosessien jätteiden loppusijoituskustannukset. Kaikissa kolmessa prosessissa joudutaan käyttämään aktiivihiiltä tms. sorbenttia elohopean pidättämiseksi. Käytetty sorbentti päättyy aina ongelmajätteeksi. Em. puhdistusprosessissa aktiivihiilen käyttö on määrällisesti lähes yhtä suurta, so. 0,3–0,5 kg/t jätettä ($60\text{--}100\text{ mg/m}^3\text{n}$). Tällä sorbenttimäärällä päästään 90–95 %:n elohopean pidätykseen (Van Velzen ym. 2002).

Taulukko 3. Elohopean pidätystehokkuus jätteenpoltossa (Van Velzen ym. 2002).

Equipment	Temperature (°C)	HgCl ₂ (%)	Hg(0) (%)	Overall (%)
Electrostatic precipitators	180	0–10	0–4	0–8
Wet scrubbers	65–70	70–80	0–10	55–65
Wet scrubbers with conditioning agent		90–95	20–30	76–82
Spray absorbers + fabric filter (limestone)	130	50–60	30–35	44–52
Spray absorbers + fabric filter (special absorbents added)		90–95	80–90	87–94
Entrainment flow absorbers + fabric filter (special absorbents added)	130	90–95	80–90	87–94
Circulating fluidised bed + fabric filter (special absorbents added)	130	90–99	80–95	87–98



Kuva 6. Elohopeapitoisuuden aikavaihtelu jätteenpolton savukaasussa jätteen kohonneen elohopeapitoisuuden johdosta (Seiffert & Lüder 2002).

3.2.4 Polttoaineiden rinnakkaispoltto

Rinnakkaispoltolla tarkoitetaan tässä yhteydessä tavanomaisen polttoaineen, kuten hiilen tai turpeen, polttoa yhdessä jäteperäisen polttoaineen kanssa. Tällaisessa tapauksessa elohopean pitoisuus, käyttäytyminen poltossa ja savukaasun puhdistuksessa voi muuttua yksittäisen polttoaineen polttoon verrattuna. Hollannissa jätemateriaalien poltto hiilen polton yhteydessä on jo yleistä. Myös Saksassa harkitaan jätevesilietteiden rinnakkaispolttoa hiilen kanssa (Sloss 2002). Suomessa lajiteltua jätettä poltetaan monissa

aluelämpölaitoksissa puun ja turpeen kanssa rinnakkain. EU:n jätteenpolttodirektiivi (WID, waste incineration directive) asettaa myös tällaiselle poltolle jatkossa (vuoden 2006 alussa) tiukemmat vaatimukset kaasun puhdistamiseksi ja päästöjen mittaustavoitteen noudattamiseksi mm. elohopean suhteen. Suomessa tehtyjen mittausten (Sloss 2002) mukaa voitiin puun poltolla (4 % polttaineen energiasta) hiilen pölypolton yhteydessä vähentää elohopeapäästöjä 20 %:lla. Tämän pääteltiin johtuvan puun alhaisen elohopeapitoisuuden lisäksi puun polton seurauksena syntyneen tuhkan palamattoman hiilen osuuden kasvusta, joka puolestaan edisti hapettuneen elohopean muodostumista. Paraisilla (Finnsementti Oy) (Sloss 2002) tehdyissä sementtiuunikokeissa tavanomaisesti käytetystä polttoaineesta (hiili/koksi) korvattiin 10 % vanhoilla autonrenkailla. Elohopeapäästöt alenivat $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$:sta $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$:iin, mikä johtui renkaiden tavanomaisia polttoaineita pienemmästä elohopeapitoisuudesta ja siitä, että renkaiden polton yhteydessä lähes kaikki poltossa vapautuneesta elohopeasta sitoutui partikkeleihin, jotka pystyttiin poistamaan tehokkaasti laitoksen puhdistimilla.

Polttoaineiden suorasta seospoltosta poiketen biomassasta tai kierrätyspolttoaineista peräisin olevan kaasutuskaasun käytön vaikutuksia rinnakkaispolttoaineena mm. hiilen pölypolttokattiloissa on vain vähän kokemuksia. Ajankohtaiskatsauksia eri polttoaineiden epäsuorasta rinnakkaispoltosta ovat esittäneet Fernando 2002, Padban ym. 2002 ja Belgiorno ym. 2003. Eniten kokemuksia tällaisesta toiminnasta lienee Lahdessa jo vuonna 1997 toiminnan aloittaneella rinnakkaispolttolaitoksella (Palonen & Nieminen 1999), jossa suodattamattomalla kaasutuskaasulla (biopolttoaine ja SRF) on korvattu n. 15 % pääkattilassa poltetusta polttoaineesta. Mittausten mukaan raskasmetallipäästöt eivät kaasutuskaasun rinnakkaispolton seurauksena juurikaan muuttuneet. VTT:n tekemässä projektiraportissa (Hepola & Kurkela 2002) käsiteltiin mm. haitallisten epäpuhtauksien poistomahdollisuuksia kaasutuksessa ja kaasun puhdistuksessa ennen polttoa. Raportissa arvioitiin myös laskelmin kierrätyspolttoaineen kaasutuskaasun rinnakkaispolton vaikutusta voimalan savukaasupäästöihin sekä kaasujen sisältämien epäpuhtauksien poistotarvetta EU:n WID:n päästöraja-arvoja ajatellen. Polttoaineiden poltossa elohopean oletettiin vapautuvan täydellisesti savukaasuun ja vapautuvasta elohopeasta oletettiin pidättyvän sähkösuodattimessa n. 30 %. Arvio perustui useisiin mitattuihin elohopean pidätystehokkuuksiin hiiltä polttavilla laitoksilla, joissa on käytetty hiukkaserottimena pelkästään sähkösuodatinta. VTT:n SRF:n kaasutuskokeisiin perustuen kaasutuksessa elohopea vapautui täydellisesti kaasutuskaasuun eikä pidättynyt juurikaan kaasun kuumasuodatuksessa. Tulosten mukaan elohopeapäästöt lisääntyivät kaasutuskaasun seospoltossa pelkkään hiilen tai turpeen polttoon verrattuna mutta pysyivät selvästi WID:n päästöraja-arvon alapuolella.

4. Elohopean kontrollointi kaasutuksessa

Seuraavassa esitetään lyhyt katsaus elohopean käyttäytymisestä ja pidätysmahdollisuuksista kaasutuksessa. Lisäksi arvioidaan esimerkkilaskelmin kierrätyspolttoaineesta peräisin olevan kuumasuodatetun kaasutuskaasun polton vaikutusta pääkattilan elohopeapäästöihin kivihiilen ja turpeen rinnakkaispoltoissa.

4.1 Elohopea kaasutuksessa

Kokeellisia tutkimustuloksia ja termodynaamisia tarkasteluja raskasmetallien käyttäytymisestä pelkistävässä kaasukehässä on suoritettu huomattavasti vähemmän kuin polton olosuhteissa. Lisäksi kaasutuskaasun sisältämien raskasmetallien, erityisesti elohopean, näytteenottoon ja analysointiin liittyy vielä ongelmia, jotka voivat aiheuttaa virheellisiä tuloksia ja tulkintoja. Termodynaamisten tarkastelujen perusteella kaasutuksessa herkästi höyrystyvät raskasmetallit ovat höyrymuodossa alemmissa lämpötiloissa kuin polton olosuhteissa (Erickson ym. 1999). Siksi pelkästään tasapainotarkasteluihin perustuen kaasutuskaasun puhdistuksen tulisi tapahtua alemmassa lämpötilassa kuin savukaasun puhdistuksen.

Kirjallisuudessa esitettyjen tulosten perusteella elohopea vapautuu miltei täydellisesti metallisena höyrynä kaasutuskaasuun eikä elohopean hapettumista tai pidättymistä juurikaan tapahdu tavanomaisessa kaasun suodatuksessa. Tasapainotarkastelujen ja suoritettujen kokeiden perusteella (Erickson ym. 1999, Reed ym. 2001) kaasutuskaasun sisältämän metallisen elohopean pidättämiseksi suodattimen (aktiivihiili tms.) toimintalämpötilan tulisi olla < 200 °C. Useissa nykyisissä kaasutinratkaisuissa kaasun suodatuslämpötilan laskeminen alle 200 °C:n voisi aiheuttaa kuitenkin merkittäviä ongelmia mm. kaasutuskaasun sisältämän tervan käyttäytymisestä johtuen. Kaasutuskaasun sisältämä hiilipitoinen tuhka pidättää metallista elohopeaa 110–160 °C:ssa (Reed ym. 2001). Tällöin elohopean adsorboituminen tapahtunee HgS:a kuten savukaasussa rikillä käsiteltyä aktiivihiiltä käytettäessä. Aktiivihiilen sisältämän rikin on kuitenkin todettu vapautuvan (Granite ym. 2002, Lopez-Anton ym. 2002) lämpötilan kohotessa yli 100 °C:n. Lopez-Antonin ym. (2002) mukaan tutkitut aktiivihiilet, tavanomainen ja rikillä käsitelty hiili, pidättivät elohopeaa 120 °C:ssa yhtä hyvin sekä hapettavassa että pelkistävissä kaasukehässä. USA:ssa Estman Chemical Companylla (Denton 2002, Rutkowski ym. 2002) on parinkymmenen vuoden kokemus poistaa hiilen kaasutuskaasusta elohopeaa rikillä käsitellyllä aktiivihiilellä (n. 30 °C, 60–70 bar). Elohopean pidätystehokkuus aktiivihiilipedissä on ollut 90–95 % ja pedin käyttöikä on vaihdellut välillä 18–24 kuukautta. Tehtyjen tarkastelujen (Denton 2002, Rutkowski ym. 2002) perusteella em. tyyppisen aktiivihiiliprosessin käyttäminen hiilen kaasutuskombivoimalaitoksen (IGCC) tuotekaasun elohopean puhdistamiseen (puhdistustehokkuus 90 %) on kustannuksiltaan

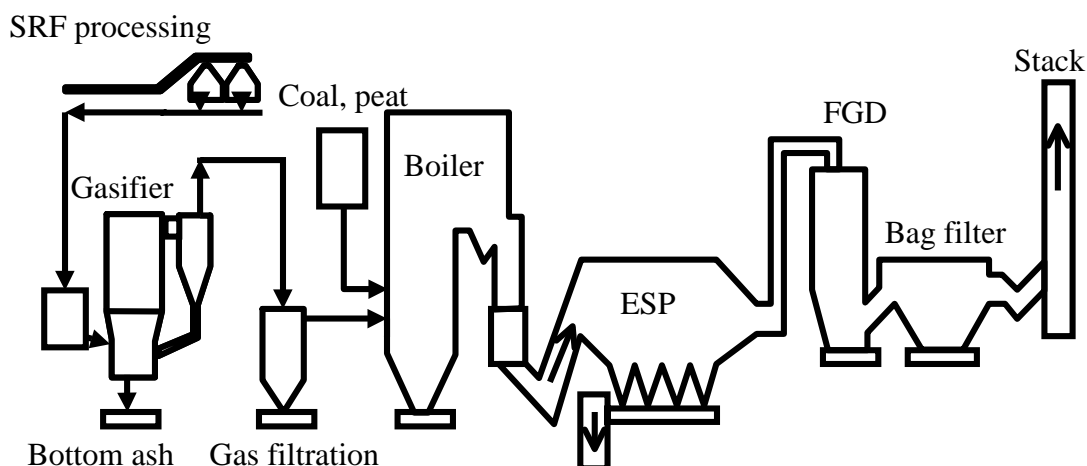
vain kymmenesosa vastaavilla menetelmillä toteutettujen tavanomaisten hiilivoimalaistosten savukaasun elohopean puhdistuksen kustannuksista. On ilmeistä, että kehitteillä olevilla IGCC-laitoksilla, joissa pyritään kaasutuskasun kuumapuhdistuksella (> 250 °C) poistamaan kaasun sisältämät epäpuhtaudet, kuten hiukkaset, rikki- ja klooriyhdisteet, ennen kaasun polttoa, tuottaisi metallisen elohopean pidättäminen ongelmia. Em. muiden epäpuhtauksien poistaminen lisää, olemassa olevan tiedon mukaan, vaikeasti poistettavan metallisen elohopean esiintymistä kaasussa. Yli 200 °C:ssa toimivia elohopeaa adsorboivia sorbentteja tutkitaan ja kehitetään (Portzer ym. 2002, Benson ym. 2002, Granite ym. 2000, 2002). Nähtäväksi jää, kuinka tässä onnistutaan. Kirjallisuudessa (Sloss 2002) on myös viitteitä siitä, että kaasun märkäpuhdistuksessa (SelectamineTM-, SulfinolTM-pesut) voi tapahtua ainakin jonkinasteista elohopean hapettumista ja pidättymistä.

4.2 Kaasutuskasun elohopean vaikutus hiili- ja turvekattilan elohopeapäästöihin rinnakkaispoltossa

Kuumasuodatetun kierrätyspolttoaineen kaasutuskasun rinnakkaispoltossa hiilen ja turpeen kanssa tarkasteltiin seuraavia tapauksia (kuva 7):

1. Suodatetun kaasutuskasun rinnakkaispoltto 300 MWth:n kivihiilikattilassa
 - Kaasuttimen teho 80 MWth
2. Suodatetun kaasutuskasun rinnakkaispoltto 150 MWth:n turvekattilassa
 - Kaasuttimen teho 40 MWth.

Laskelmien lähtöarvot on esitetty taulukossa 4. Kaasutuskasun koostumuksena on käytetty VTT kierrätyspolttoaineen (SRF) kaasutuskoeajoissa mitattua kaasutuskasun koostumusta (Hepola & Kurkela 2002). Kaasutuskokeet tehtiin huonolaatuisesta kotitalousjätteestä valmistetulla SRF:lla, jonka elohopeapitoisuus oli 0,75 mg/kg, eli hieman korkeampi kuin tyypillisen kotitalousjätteestä valmistetun kierrätyspolttoaineen elohopeapitoisuus (0,1–0,6 mg/kg, ka. 0,3 mg/kg). Kaasutuksessa SRF:n elohopea päätyi lähes 100 % kaasutuskasuun (pitoisuus: 0,21 mg/kg kuivassa kaasussa). Kivihiilen koostumus on tyypillisen puolalaisen kivihiilen, jonka epäpuhtauspitoisuuksina on käytetty kivihiilen keskimääräisiä pitoisuuksia (Erickson ym. 1999). Elohopeapitoisuutena käytettiin arvoa 0,1 mg/kg. Tyypillisen suomalaisen turpeen koostumus on peräisin lähteistä Peuravuori & Pihlaja 1988 ja Raiko ym. 1995. Elohopeapitoisuutena turpeelle on käytetty arvoa 0,07 mg/kg.



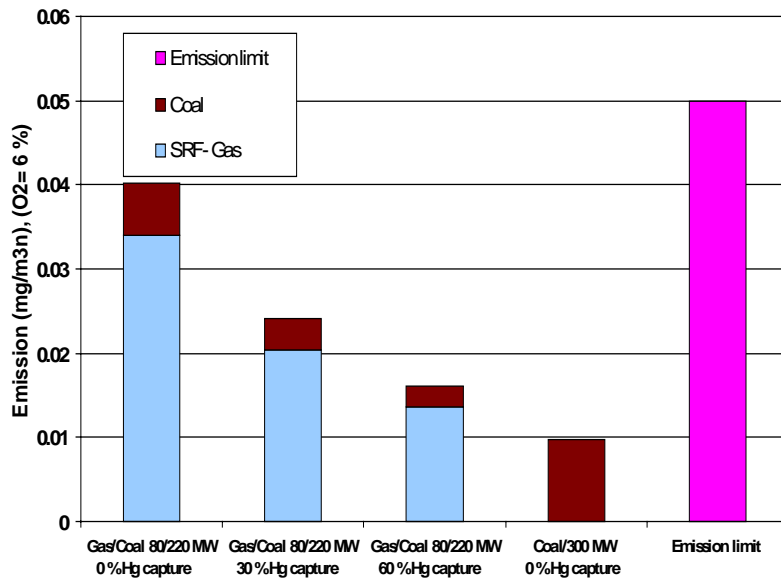
Kuva 7. Kaavio suodatetun SRF-kaasutuskaasun rinnakkaispoltosta pölypolttokattilassa, jossa savukaasun puhdistus tapahtuu sähkösuodatimella ja puolikuivalla rikinpoistotekniikalla.

Kuvissa 8 ja 9 on esitetty elohopeapitoisuudet savukaasussa sekä pelkän hiilen ja turpeen poltossa että kierrätyspoltoaineen kaasutuskaasun rinnakkaispolton (hiili, turve) yhteydessä. Laskelmissa on oletettu, että kaikki polttoaineissa oleva elohopea vapautuu eikä elohopea pidäty. Vertailun vuoksi kuvissa on esitetty tapaus, jossa poltossa vapautuvasta elohopeasta pidättyy savukaasupuhdistimissa 30 ja 60 %. Arviot perustuvat em. mitattuihin elohopean pidätystehokkuuksiin (n. 30 %) hiiltä polttavilla laitoksilla, joissa on käytetty hiukkaserottimena pelkästään sähkösuodatinta sekä puolikuivalla rikinpoistomenetelmällä varustettujen, suomalaisten hiilivoimalaitosten elohopean pidätysasteeseen (60–70 %). Lisäksi arviossa on oletettu, että kaasutuskaasun sisältämä metallinen elohopea käyttäytyy kattilassa samoin kuin hiilestä tai turpeesta peräisin oleva elohopea. Tämän oletuksen paikkansapitävyys voidaan varmistaa vasta käytännön koeajojen yhteydessä tehtävillä mittauksilla. Kuvista näkyy kuitenkin selvästi, että jätteenpolttodirektiivin päästöraja ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$) alitetaan kaikissa tarkastelluissa tapauksissa. Jos SRF:n elohopeapitoisuus on em. keskimääräinen pitoisuus ($0,3 \text{ mg}/\text{kg}$), ja kuumasuodatettua SRF-kaasutuskaasua poltettaisiin puolikuivalla rikinpoistolla (elohopean pidätysaste 60 %) varustetuissa kattiloissa: 220 (hiili)/80 MW (kaasu) tai 110 (turve)/40 MW (kaasu), olisi vapautuvan savukaasun elohopeapitoisuus vain noin kymmenesosa EU:n jätteenpolttodirektiivin päästöraja-arvosta.

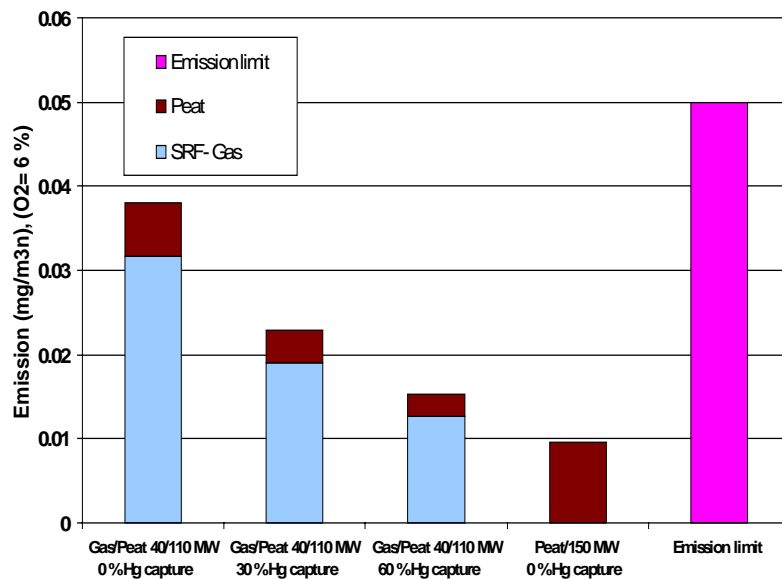
Taulukko 4. Polttoaineiden koostumus (Hepola & Kurkela 2002).

	Gasification gas	Coal	Peat
H ₂ , %	6		
CO ₂ , %	15.8		
N ₂ , %	66.6		
CO, %	5.6		
CH ₄ , %	3.5		
C ₂ H ₂ , %	0.29		
C ₂ H ₄ , %	1.63		
C ₂ H ₆ , %	0.03		
C ₃ H ₆ , %	0.03		
H ₂ S, %	0.023		
NH ₃ , %	0.418		
HCl, %	0.0041		
Tar+betzene, g/m ³ n	22.33		
Effective heating value, MJ/kg	3.1	26	9.2
C, wt.-%		73.2	55
H, wt.-%		4.7	5.5
O, wt.-%		9.1	32.6
N, wt.-%		1	1.7
S, wt.-%		0.9	0.2
Cl, wt.-%		0.1	0.04
F, wt.-%		0.015	
Ash, wt.-%		11	5
Moisture, wt.-%	23	9	50
Hg, mg/kg	0.21*	0.1	0.07
Cd, mg/kg	0.0013	0.5	0.3
Tl, mg/kg		1	
As, mg/kg	0.0036	10	3
Pb, mg/kg	0.0121	40	5
Mn, mg/kg	0.0045	70	80
Ni, mg/kg	0.0082	20	4
Cr, mg/kg	0.009	20	6
Cu, mg/kg	0.0167	15	9
Co, mg/kg	0.0045	5	1
V, mg/kg	0.0045	40	11
Sb, mg/kg	0.009	1	

* Based on mercury balance



Kuva 8. Kotitalousjätteestä valmistetun SRF:n kaasutuskaasun rinnakkaispolton vaikutus kattilan Hg-päästöihin. 300 MWth:n hiilikattila (80 MWth kaasu/220 MWth hiili). SRF:n Hg-pitoisuus 0,75mg/kg.



Kuva 9. Kotitalousjätteestä valmistetun SRF:n kaasutuskaasun rinnakkaispolton vaikutus kattilan Hg-päästöihin. 150 MWth:n turvekattila (40 MWth kaasu/110 MWth turve). SRF:n Hg-pitoisuus 0,75mg/kg.

5. Johtopäätökset

Metallinen elohopea, jota vapautuu runsaasti mm. fossiilisiin ja jätteisiin perustuvasta energiantuotannosta, on varsin stabiili alkuaine ilmakehässä. Siksi energiantuotannon elohopeapäästöt ovat globaali ongelma elohopean levitessä ilmapurtojen mukana laajoille alueille. Lisääntynyt huoli elohopean leviämisestä ja vaikutuksista ympäristöömme ja terveyteemme on edistänyt elohopeapäästöjen mittausta ja valvontaa sekä uusien päästörajoitusten voimaantumista. Monista epävarmuuksista huolimatta on ilmeistä, että ihmisen aiheuttamat elohopeapäästöt ovat kehittyneissä maissa stabiloitumassa tai vähenevässä. Sitä vastoin kehitysmaissa, kuten Kiinassa, elohopeapäästöt lisääntyvät yhä. Hiilen poltto on globaalisti merkittävin ihmisen aiheuttama elohopeapäästöjen lähde, vaikkakin jo monissa maissa hiilen polton elohopeapäästöjä ollaan rajoittamassa.

Suomessa käytössä olevien, puolikuivalla rikinpoistotekniikalla varustettujen, hiilivoimalaitosten elohopeapäästöt ovat mittausten mukaan alle kymmenesosa EU:n jätteenpolttodirektiivin raja-arvoista. Eri tutkimustulosten mukaan hiilen sisältämällä epäpuhtauksilla, hiilen hiiltymisasteella ja laitoksen toiminta-arvoilla on suuri vaikutus elohopean pidättymiseen. Erityisesti hiilen korkean klooripitoisuuden on todettu edesauttavan poltossa vapautuvan metallisen elohopean hapettumista. Hapettunut elohopea on huomattavasti helpommin poistettavissa hiukkasten poiston ja rikinpoiston yhteydessä. Bitumisilla hiilillä, joita Suomessa käytetään, klooripitoisuus on yleensä korkeampi kuin subbitumisilla hiilillä ja ligniiteillä. Toisaalta hiilen korkea klooripitoisuus lisää kloorin-/rikinpoistossa käytettävän kalkin tarvetta.

Jatkuvatoimiset elohopeamittaukset jätteen sekapoltoista osoittavat, että paljon elohopeaa sisältävän materiaalin pääsy polttoainejätteen joukkoon voi aiheuttaa elohopeapitoisuuden pitkäaikaisenkin kohoamisen savukaasussa. Jätteen lajittelu, kuten kierrätyspolttoaineen valmistus, on paras tapa ehkäistä elohopeapiikkien muodostumista. Myös lisäaineiden käytöllä sekä uusilla pesuriratkaisuilla, joilla on suurempi puskurikapasiteetti kuin tavanomaisilla puhdistimilla, voidaan elohopeapitoisuuksien äkillisiä kohoamisia kompensoida tehokkaasti.

Kaasutuksessa elohopea vapautuu lähes täydellisesti metallisena höyrynä kaasutuskaasuun eikä elohopean pidättymistä juurikaan tapahdu tavanomaisessa kaasun kuumasuodatuksessa. Kaasutuskaasun sisältämän metallisen elohopean pidättämiseksi aktiivihilittms. suodatuksen toimintalämpötilan tulee olla < 200 °C. Pitkäaikaisia käyttökokemuksia aktiivihilteen perustuvista kaasutuskaasun elohopean pidätysprosesseista on vähän. Elohopean pidätys saattaa tulla ongelmaksi kehitteillä olevilla IGCC-laitoksilla, joissa pyritään kaasutuskaasun kuumapuhdistuksella (> 250 °C) poistamaan kaasun sisältämät epäpuhtaudet, kuten hiukkaset, rikki- ja klooriyhdisteet, ennen kaasun polttoa. Siksi yli 200 °C:ssa toimivia elohopeaa adsorboivia sorbentteja tutkitaan ja kehitetään.

Tulokset eri polttoaineiden ja jätemateriaalien rinnakkaispoltoista ovat osoittaneet, että elohopeapäästöjä voidaan tällöin, useista syistä johtuen, pienentää yksittäisen elohopeapitoisen polttoaineen polttoon verrattuna. Kierrätyspolttoaine sisältää elohopeaa keskimäärin vain 10–30 % jätteenpolttolaitoksilla käytettävän sekajätteen määrästä. Siksi kierrätyspolttoaineesta peräisin olevan kuumasuodatetun kaasutuskaasun rinnakkaispoltoissa hiilen tai turpeen kanssa muodostuvat elohopeapäästöt alittavat selvästi EU:n jätteenpolttodirektiivin elohopeapäästön raja-arvon. Kaasutuskaasun metallisen elohopean hapettuminen ja adsorboituminen poltossa ja savukaasupuhdistimissa hiilestä tai turpeesta vapautuvaan elohopeaan verrattuna on epäselvää. Luotettavin keino asian selvittämiseksi on elohopeamittausten suorittaminen käytännön koeajojen yhteydessä.

Lähdeluettelo

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Energia, Espoo. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes: 2045. 172 s. + liitt. 17 s.

Andersson, S. 2001. Experiences from one year of MercOx operation: Simultaneous removal of Hg, HCl and SO₂ from Flue gases. ISWA Beacon Conference Waste-to-Energy, State of the Art and Latest News. October 25–26, 2001 in Malmö, Sweden. 6 s.

Aunela-Tapola, L., Hatanpää, E., Hoffren, H., Laitinen, T., Larjava, K., Rasila, P. & Tolvanen, M. 1998. A study of trace element behaviour in two modern coal-fired power plants. II Trace element balances in two plants equipped with semi-dry flue gas desulphurisation facilities. *Fuel Processing Technology* 55 (1998) 13–34.

Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca & Napoli, R.M.A. 2003. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management* 23 (2003) 1–15.

Benson, S., Swanson, M.L. & Olson, E.S. 2002. Trace element transformations and options for control in gasification systems. Conference on Air Quality III: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, Arligton, Virginia, September 2002.

Butz, J. & Albiston, J. 2000. Use of fly ash fractions from western coals for mercury removal from flue gas streams. Conference on Air Quality II: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, McLean, Virginia, September 2000.

Chen, Z., Senior, C.L. & Sarofim A.F. 2002. Modeling of Mercury States in Coal-Fired Utility Boilers. The proceedings of the 27th international technical conference on coal utilization and fuel systems 2002. Coal Technology Association. Clearwater, FL, 4–7 Mar. 2002. S. 549–560.

Denton, D.L. 2002. Eastman coal gasification: Industrial – Leading performance and a demonstrated syngas mercury removal process. Conference on Air Quality III: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, Arligton, Virginia, September 2002.

ECSC, 2000. Optimal utilization of coal in modern power plants with respect to control of mass flows and emissions of VOCs/PAHs and mercury. ECSC Coal Research Agreement No 7220-ED/089. Draft Final Report 30.12.2000. 238 s.

Erickson, T.A., Galbreath, K.C., Zygarlicke, C.J., Hetland, M.D. & Benson, S. A. 1999. Trace elements emissions project. Final technical progress report. 99-EERC-06-06. 137 s. + liitt.

Fact Sheet 2000. EPA to regulate mercury and other air toxics emissions from coal- and oil-fired power plants. 14 December 2000. 5 s. http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t3/fact_sheets/fs_util.pdf.

Fernando, R. 2002. Experience of indirect cofiring of biomass and coal. IEA Clean Coal Centre. ISBN 92-9029-370-9. CCC/64. 39 s.

Freeley, T.J. 2002. DOE/NETL's Mercury Emissions Control Technology R & D Program. LRC and Lignite Industry meeting. August 27–28, 2002. Bismarck, ND, USA. <http://www.netl.doe.gov/coalpower/environment/pubs/LRC082702.pdf>.

Freeley, T.J., Murphy, J., Hoffmann, J. & Renninger S.A. 2003. A review of DOE/NETL's Mercury Control Technology R & D Program for Coal Fired Power Plants. 32 s. <http://www.netl.doe.gov/>

Galbreath, K.C. & Zygarlicke, C.J. 2000. Mercury transformations in coal combustion flue gas. *Fuel Processing Technology* 65–66 (2000), s. 289–310.

Granite, E.J., King, W.P. & Pennline, H.W. 2002. Techniques for mercury control and measurement in gasification systems. Presented at the 5th international symposium on gas cleaning at high temperature, Morgantown, WV, September 2002. 5 s. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/GasCleaning/7.06paper.pdf>

Granite, E.J., Pennline, H.W. & Hargis, R.A. 2000. Novel sorbents for mercury from flue gas. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000, 39 s. 1020–1029.

Guffey, F.D., Bland, A.E. & Brown, T.H. 2002. Pre-combustion removal of mercury from coal. The proceedings of the 27th international technical conference on coal utilization and fuel systems 2002. Coal Technology Association. Clearwater, FL, 4–7 Mar 2002. S. 147–157.

Hepola, J. & Kurkela, E. 2002. Kierrätyspolttoaineen kaasutuskaasun epäpuhtauksien vaikutus kattilan savukaasupäästöihin rinnakkaispoltossa. Projektiraportti: PRO2/T5032/02. 50 s.

Ilma 3/2001. Ympäristölehden katsaus. http://www.vyh.fi/palvelut/julkaisu/elektro/katsaus/kat3_01.pdf.

Juvonen, J. & Moilanen, A. 2002. Kierrätyspolttoaineen laadunvalvonta. Tutkimisraportti: PRO/T5013/02. 49 s. + liitt. 7 s. (Luottamuksellinen).

Juvonen, J., Hyvönen, S., Syntypistelajittelujärjestelmän vaikutus kierrätyspolttoaineen laatuun ja REF -laitosten koeajot ("SPLAATU") Loppuraportti ENE1/32/2001. 2001, 70 s (Luottamuksellinen).

Karjalainen Pekka, 2002. Puhelinkeskustelu.

Komulainen, H. & Tuomisto J. 2001. (toim.) 74. Metallit ja metalloidit. Farmakologia ja toksikologia. 6. painos. s. 1065–1079. <http://www.medicina.fi/>.

Lissianski, V., Zamansky, V., Maly, P. & Seeker, R. 2002. Integration of combustion modifications with mercury control. 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23–27, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania USA.

Lopez-Anton, M., Tascon, J.M.D. & Martinez-Tarazona, M.R. 2002. Retention of mercury in activated carbon in coal combustion and gasification flue gases. *Fuel Processing Technology* 77–78 (2002) s. 353–358.

Miller, S.J., Zhuang, Y., Rinschler, R., Davis, D.W.L., & Swanson, W. 2002. Mercury control with advanced hybridTM. Conference on Air Quality III: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, Arlington, Virginia, September 2002.

Padban, N., Nilsson, T. & Berge, N. 2002. Energi ur avfall genom förgasning. TPS-02/16. Studsvik, Nyköping. 47 s.

Palonen, J. & Nieminen, J. 1999. Biomass CFB gasifier-demonstration project: Kymi-järvi power station at Lahti, Finland. http://www.fwc.com/publications/heat/heat_html/summer99/biomass.cfm.

Pavlish, J.H., Sondreal, E.A., Mann, M.D., Olson, E.S., Galbreath, K.C., Laudal, D.L. & Benson, S.A. 2003. Status review of mercury control options for coal-fired power plants. *Fuel Processing Technology* 82 (2003) s. 89–165.

Peuravuori, J. & Pihlaja, K. 1988. Turvesoiden kemiallinen kartoitus energiatuotantoa silmälläpitäen. KTM Sarja D:148.

Pohjola, V., Hahkala, M. & Häsänen E. 1983. Kivihiltä, turvetta ja öljyä käyttävien lämpövoimaloiden päästöselvitys. VTT Tutkimuksia 231. VTT, Espoo. 125 s.+ liitt.131 s.

Portzer, J.W., Allen, C.C. & Gupta, R.P. 2002. Development of novel sorbents for mercury control at elevated temperatures in coal-derived syngas. Conference on Air Quality III: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, Arlington, Virginia, September 2002.

Position Paper 2001. Ambient Air Pollution by Mercury (Hg). 2001. The Technical Report of the European Air Quality Directive on Mercury. European Commission-DG Environment. CNR-Institute for Atmospheric Pollution (CNR-IIA) I-87036 Rende. http://www.iia-cnr.unical.it/position_paper.htm.

Raiko, R., Kurki-Suonio, I. Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. IFRF Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-448-2. 629 s.

Reed, G.P., Ergudenler, J.R., Grace, J.R., Watkinson, A.P., Herod, A.A., Dugwell, D. & Kandiyoti, R.. 2001. Control of gasifier mercury emissions in a hot gas filter: the effect of temperature. *Fuel* 80 (2001) 623–634.

Rutkowski, M.D., Klett, G. & Maxwell, R.C. 2002. The cost of mercury removal in an IGCC plant. 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23–27, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania USA.

Seiffert, M. & Lüder, K. 2002. Inputs of mercury into a domestic refuse incineration plant. MVB Mullverwertung Bordigstrasse GMBH. 7 s.

Seigneur, C. 2002. Global Emissions Inventory Activity. Review: Mercury. <http://weather.engin.umich.edu/geia/reviews/mercury.html>.

Senior, C., Shim, H. & Davis, K. 2002. Emissions of hazardous air pollutants and acid gases from coal-fired power plants: Issues and impacts related to low rank fuels. 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23–27, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania USA.

Senior, C.L., Helble, J.J. & Sarofim, A.F. 2000. Predicting the speciation of mercury emissions from coal-fired power plants. Conference on Air Quality II: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, McLean, Virginia, September 2000.

Sjostrom, S., Bustard, J. Durham, M. & Chang, R. 2002a. Mercury removal trends and options for coal-fired power plants with full-scale ESPs and fabric filters. 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23–27, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania USA.

Sjostrom, S., Ebner, T. Slye, R., Chang, R., Strohfus, M., Pelerine, J. & Smokey, S. 2002b. Full-scale evaluation of mercury control at great river energy's stanton generating station using injected sorbents and spray dryer/baghouse. Conference on Air Quality III: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter, Arligton, Virginia, September 2002.

Sloss, L.L. 1995. Mercury emissions and effects – the role of coal . IEA Coal Research, London. 39 s.

Sloss, L.L. 2002. Mercury-emissions and control. IEA Coal Research, London. 43 s.

Velzen, van D., Langenkamp, H. & Herb, G. 2002. Review: Mercury in waste incineration. Waste manage Res. 2002, 20, 556–568.

WID-direktiivi. 2000. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 200/EY jätteenpoltosta. PC-CONS 3641/00. Bryssel, 2000. 44 s. + liitt. 16 s.

Vidic, R.D., Kwon, S. & Borguet, E. 2002. Impact of Surface Heterogeneity on Mercury Uptake by Carbonaceous Sorbents: Bridging the pressure gap from UHV to Atmospheric Conditions. 19th Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23–27, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania USA.

YM. 2002. International environment researchers at Rovaniemi, Finland: Accumulation of environmental toxics in the arctic – mercury a particular threat to human health. Press releases of the ministry of the environment October 2002. [http:// www.vyh.fi/eng/current/press/moe/moe02149.htm](http://www.vyh.fi/eng/current/press/moe/moe02149.htm).

Tekijä(t) Hepola, Jouko			
Nimeke Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa			
Tiivistelmä Fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvalla energiantuotannolla on merkittävä vaikutus elohopean leviämässä ympäristöömme. Huoli elohopean leviämisestä ja vaikutuksesta ympäristöömme ja terveyteemme edistää elohopeapäästöjen valvontaa ja uusien päästörajoitusten voimaantuloa. Jätteenpolton elohopeapäästöjä voidaan kontrolloida parhaiten vähentämällä elohopean käyttöä sekä poltettavan jätteen lajittelua, kuten kierrätyspolttoaineen valmistusta, lisäämällä. Hiilen poltto on globaalisti merkittävin ihmisen aiheuttaman elohopeapäästön lähde. Monissa maissa hiilen polton elohopeapäästöille on tulossa rajoituksia. Polttolaitosten elohopeapäästöihin vaikuttavat monet eri tekijät. Erityisen merkittäviä ovat polttoaineen koostumus ja polttolaitoksen toiminta-arvot sekä kaasun puhdistuksessa käytettävät lisäaineet. Tärkeimpiä näistä ovat: polttoaineen laatu, tuhkan koostumus, polttotapa, savukaasun lämpötila ja viipymä kaasun eri puhdistusyksiköissä sekä käytettävien lisäaineiden laatu ja määrä. Tutkimus- ja kehitystyöllä pyritään parantamaan olemassa olevia ja kehittämään uusia menetelmiä elohopean kontrolloimiseksi. Kaasutuksessa elohopea vapautuu lähes täydellisesti metallisena höyrynä tuotekaasuun eikä elohopea pidä tavanomaisessa kaasun kuumasuodatuksessa. Pitkäaikaisia käyttökokemuksia aktiivihiileen perustuvista kaasutuskaasun elohopean pidätysprosesseista on vähän. Kehitteillä olevilla kaasutuskombivoimalaitoksilla (IGCC) pyritään kaasutuskaasun kuumapuhdistuksella poistamaan kaasun sisältämät epäpuhtaudet, kuten hiukkaset, rikki- ja klooriyhdisteet, ennen kaasun polttoa. Elohopean pidättäminen samoissa olosuhteissa vaatii uusien elohopeaa adsorboivien sorbenttien kehittämistä. Helsingin kivihiihivoimaloissa elohopeapäästöt ovat mittausten mukaan olleet erittäin alhaisia, ja elohopean pidätysaste savukaasun puhdistimissa on ollut n. 60–70 %. Myös suomalainen kierrätyspolttoaine sisältää elohopeaa vain murtoosan verrattuna ulkomailla jätteenpolttolaitoksilla käytettävään sekajätteeseen. Laskelmien mukaan, kierrätyspolttoaineesta peräisin olevan kuumasuodatetun kaasutuskaasun rinnakkaispoltossa hiilen tai turpeen kanssa, muodostuvat elohopeapäästöt alittavat selvästi EU:n jätteenpolttodirektiivin elohopeapäästön raja-arvon.			
Avainsanat mercury, energy production, combustion, cofiring, gasification, IGCC, fossil fuels, wastes, recovered fuels, solid fuels			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Biologinkuja 3–5, PL 1601, 02044 VTT			
ISBN 951–38–6175–9 (nid.) 951–38–6176–7 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero C3SU00137	
Julkaisuaika Syyskuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 37 s.	Hinta A
Projektin nimi Kaasutekniikan kehittäminen kierrätyspolttoaineille		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus Tekes, Carbona Oy, Condens Oy, Fortum Oil and Gas Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Pohjolan Voima Oy, Vapo Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235–0605 (nid.) 1455–0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Hepola, Jouko			
Title Mercury emissions in energy production based on fossil fuels and wastes			
Abstract Energy production based on fossil fuels and wastes has made an important contribution to mercury emissions. The concern about ways of controlling the mercury emissions from waste incineration plants are to decrease the mercury consumption in various applications and sort the waste, leading to increasing the production of solid recovered fuel (SRF). New flue gas purification technology can also be used efficiently to compensate for the sudden increase of the mercury content in waste. Coal combustion is a dominant source of anthropogenic global mercury emissions. In many countries mercury emissions from coal-fired plants are to be restricted. There are many factors that contribute to the mercury emissions from combustion plants. The most important are the fuel content, the operational parameters of the combustion plant and the additives used in gas purification. The most relevant of these are fuel and ash quality, combustion mode, flue gas temperature and residence time in different gas purification units, and the amount and quality of additives used. Research and development work will improve the existing methods and produce new mercury control systems for combustion plants. In gasification mercury is almost entirely liberated as elemental mercury in product gas and no mercury capture occurs during hot gas filtration of the gas. There are very few longterm operational experiences of the gasification atmosphere in activated- carbon- based- mercury- capture processes. The purpose of the IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) plants under development is the hot gas cleaning of particulate, sulphur and chlorine compounds from the product gas before gas combustion. The capture of mercury under the same conditions needs the development of new type of sorbent materials. According to the mercury measurements at coal-fired power plants in Helsinki, the mercury emissions have been very low. The capture of mercury in flue gas purification has been about 60–70 %, and the recovered fuel in Finland contains only a fraction of the mercury found in municipal wastes incinerated abroad. Based on the calculations performed, the mercury emissions in co-firing of hot-filtered SRF-based gasification gas with coal and peat, are clearly under the EU WID emission limit for mercury.			
Keywords mercury, energy production, combustion, cofiring, gasification, IGCC, fossil fuels, wastes, recovered fuels, solid fuels			
Activity unit VTT Processes, Biologinkuja 3–5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6175-9 (soft back ed.) 951-38-6176-7 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number C3SU00137	
Date September 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 37 p.	Price A
Name of project Kaasutekniikan kehittäminen kierrätyspoltoaineille		Commissioned by National Technology Agency of Finland (Tekes), Carbona Oy, Condens Oy, Fortum Oil and Gas Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Pohjolan Voima Oy, Vapo Oy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT PROSESSIT – VTT PROSESSER –VTT PROCESSES

- 2138 Ranta, Jussi & Wahlström, Margareta. Tuhkien laatu REF-seospoltossa. 2002. 53 s. + liitt. 13 s.
- 2139 Lohiniva, Elina, Sipilä, Kai, Mäkinen, Tuula & Hietanen, Lassi. Jätteiden energiakäytön vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin. 2002. 119 s.
- 2141 Laine-Ylijoki, Jutta, Wahlström, Margareta, Peltola, Kari, Pihlajaniemi, Miina & Mäkelä, Esa. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. 2002. 51 s. + liitt. 59 s.
- 2142 Tuhkanen, Sami. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. 2002. 46 s.
- 2143 Meinander, Harriet & Varheenmaa, Minna. Clothing and textiles for disabled and elderly people. 2002. 58 p. + app. 4 p.
- 2145 Helynen, Satu, Flyktman, Martti, Mäkinen, Tuula, Sipilä, Kai & Vesterinen, Pirkko. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. 2002. 110 s. + liitt. 2 s.
- 2153 Hänninen, Seppo & Lehtonen, Matti. Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay. 2002. 40 p.
- 2155 Hepola, Jouko & Kurkela, Esa. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. 2002. 65 s.
- 2163 Miettinen, Jaakko & Hämäläinen, Anitta. GENFLO - A general thermal hydraulic solution for accident simulation. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2163. 75 p. + app. 4. p.
- 2164 FINNUS, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 1999-2002. Final Report. Ed by Riitta Kyrki-Rajamäki & Eija Karita Puska. 267 p. + app. 68 p.
- 2165 FINNUS, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 1999-2002. Executive Summary. Ed. by Riitta Kyrki-Rajamäki. 2002. 26 p. + app. 18 p.
- 2177 Mäkelä, Kari, Laurikko, Juhani & Kanner, Heikki. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2001.1 -laskentajärjestelmä. 2002. 63 s. + liitt. 42 s.
- 2186 Syri, Sanna & Lehtilä, Antti. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin. 2003. 69 s.
- 2187 Siltanen, Satu. Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palautettavuudesta. Kirjallisuusselvitys. 2003. 72 s.
- 2196 Lehtilä, Antti & Syri, Sanna. Suomen energiajärjestelmän ja päästöjen kehitysarvioita. Climtech-ohjelman skenaariotarkastelu. 2003. 62 s.
- 2199 Alanen, Raili, Koljonen, Tiina, Hukari, Sirpa & Saari, Pekka. Energian varastoinnin nykytila. 2003. 169 s. + liitt. 60 s.
- 2209 Monni, Suvi & Syri, Sanna. Uncertainties in the Finnish 2001 Greenhouse Gas Emission Inventory. 2003. 101 p. + app. 27 p.
- 2212 Hepola, Jouko. Elohopeapäästöt fossiilisiin polttoaineisiin ja jätteisiin perustuvassa energiantuotannossa. 2003. 37 s.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FIN-02044 VTT, Finland
Puh. (09) 456 4404	Tel. (09) 456 4404	Phone internat. + 358 9 456 4404
Faksi (09) 456 4374	Fax (09) 456 4374	Fax + 358 9 456 4374