

# **Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa**

Mikael Ohlström  
VTT Energia



ISBN 951-38-5403-5 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5404-3 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)  
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

**JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER**

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000,  
FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energiajärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Maini Manninen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1998

Ohlström, Mikael. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. [Finpartikelutsläp-pen inom energiproduktionen i Finland. The fine particle emissions of energy production in Finland]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1934. 114 s. + liitt. 33 s.

## TIIVISTELMÄ

Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena on selvittää energiantuotannon pienhiukkaspäästöt (PM<sub>2.5</sub>, halkaisija alle 2,5 µm) ja verrata laskettuja päästökertoimia eri energiantuotantomuotojen kesken. Tarkoituksena on myös selvittää, mitä pienhiukkaspäästöistä tiedetään ja mitä pitäisi vielä tutkia tai mitata. Lisäksi tarkoituksena on verrata lyhyesti energiantuotannon ja liikenteen pienhiukkaspäästöjä sekä niiden keskinäistä osuutta kaupunki-ilman pienhiukkaspitoisuuksiin.

Työn teoriaosassa on perehdytty kirjallisuuskatsauksessa energiantuotannon pienhiukkasiin, erityisesti niiden muodostumiseen sekä erottamiseen savukaasuista. Lisäksi siinä on esitetty lyhyesti pienhiukkasten aiheuttamia terveysvaikutuksia sekä eri mittauslaitteet. Tulososassa on pyritty selvittämään eri energiantuotantoprosessien pienhiukkaspäästöt laskemalla niille Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-tietokantajärjestelmästä saaduista kattilalaitosten vuotuisista kokonaishiukkaspäästöistä (t/a) ominaispäästökertoimet (mg/MJ<sub>pa</sub>) ja arvioimalla käytettävissä olleiden mittaustulosten avulla pienhiukkasten osuus kokonaispäästöistä. Energiantuotantoprosesseista on käsitelty vain ne, jotka aiheuttavat merkittävästi suoria kiintoainepäästöjä (poltinpoltosta pölypoltto ja öljypolttimet, leijukerrosprosessit, arinakattilat, soodakattilat ja dieselmootorit). Prosessit on pyritty erottelemaan paitsi kattilatyypin, kokoluokan ja käytetyn pääpolttoaineen, myös hiukkasten erotuslaitteiston mukaan, jotta mahdollisimman samankaltaisille osaprosesseille on saatu yhteinen ominaispäästökerroin vertailun mahdollistamiseksi erilaisten energiantuotantoprosessien välillä.

Pienhiukkasten ominaispäästöt riippuvat voimakkaimmin kattilan kokoluokasta ja käytetystä polyn-erotuslaitteistosta. Käytetyllä polttoaineella tai -tekniikalla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Kivihiilen pölypoltossa hiukkasten erotuslaitteena käytetään yleensä vähintään sähkösuodatinta, jolloin hiukkaspäästö koostuu pääasiassa halkaisijaltaan alle 10 µm:n hiukkasista. Noin puolet kokonaispäästön massasta on pienhiukkasia (PM<sub>2.5</sub>). Kattilan kokoluokasta ja hiukkasten erotuslaitteista riippuen ominaispäästökerroin pienhiukkasille on 1–30 mg/MJ. Turpeen pölypoltossa noin 20–25 % hiukkaspäästön massasta on pienhiukkasia, jolloin ominaispäästökerroin on välillä 5–8 mg/MJ. Soodakattiloiden pienhiukkasosuus kokonaishiukkaspäästön massasta on n. 50–60 %, ja ominaispäästökerroin pienhiukkasille vaihtelee melkoisesti kokoluokan mukaan ollen 12–77 mg/MJ.

Öljykattiloille, arinakattiloille ja leijukerrosprosesseille ei voitu määrittää pienhiukkasosuuksia kokonaispäästöistä, sillä soveltuvia mittaustuloksia ei ollut käytettävissä. Näiden polttotekniikoiden julkisia mittauksia tarvittaisiin enemmän, jotta pienhiukkasten määrä ja koostumus selviäisivät eri polttoainevalikoimilla. Myös pienpolttoa tulisi tutkia ja mitata enemmän, sillä sen aiheuttama pienhiukkasaltistus voi olla matalan päästökorkeutensa ja puuttuvien hiukkaserotuslaitteistojen vuoksi merkittävää esim. taajamissa, joissa vallitseva lämmitysmuoto on talokohtainen puun tai öljyn poltto.

Liikenteellä on matalan päästökorkeutensa vuoksi selvästi suurempi vaikutus kaupunki-ilman pienhiukkaspitoisuuteen kuin paikallisella energiantuotannolla. Suurimmat ominaispäästöt on dieselkäyttöisillä ajoneuvoilla, erityisesti raskaalla liikenteellä (linja- ja kuorma-autot).

Ohlström, Mikael. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. [Finpartikelutsläppen inom energiproduktionen i Finland. The fine particle emissions of energy production in Finland]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1934. 114 s. + bil. 33 s.

## REFERAT

Det främsta ändamålet med diplomarbetet var att ta reda på finpartikelutsläppen (PM<sub>2.5</sub>, diameter under 2,5 µm) inom energiproduktionen och jämföra för olika energiproduktionsformer beräknade emissionsfaktorer. Ändamålet var också att ta reda på vad man vet om finpartiklarnas utsläpp och vad som ännu borde undersökas/mätas. Också energiproduktionens och trafikens finpartikelutsläpp och deras andel i stadsluftens finpartikelkoncentration jämfördes.

Diplomarbetet inleddes med en litteraturstudie över energiproduktionens finpartiklar, särskilt hur de uppstår och hur de avskiljs från rökgaserna. Därtill har finpartiklarnas hälsoeffekter och olika mätinstrument presenterats i korthet. I resultatdelen har finpartikelutsläppen för olika energiproduktionsprocesser utretts genom att beräkna specifika emissionsfaktorer (mg/MJ<sub>br</sub>) för dem utgående från pannanläggningarnas årliga totala partikelutsläpp (t/a) som har fått från VAHTI-databassystemet (Finlands miljöcentrum), och genom att uppskatta finpartiklarnas andel av de totala utsläppen med hjälp av existerande mätningresultat. Av energiproduktionsprocesserna har behandlats endast de som producerar anmärkningsvärt direkta utsläpp av suspenderade ämnen (pulverförbränningen, oljeförbränning, virvelbäddprocesser, rostpannor, sodapannor och dieselmotorer). Processerna har sorterats enligt pannotyp, storlekskategori, huvudbränsle och också enligt dammavskiljningsanläggning för att få en gemensam specifik emissionsfaktor för liknande delprocesser, vilket gör det möjligt att jämföra olika energiproduktionsprocesser med varandra.

Finpartiklarnas specifika emissioner beror mest på pannstorleken och typen av använd dammavskiljningsanläggning. Det använda bränslet eller förbränningstekniken påverkar inte lika mycket. I pulverförbränning av stenkolk används oftast minst elektrostatiske filter som dammavskiljningsanläggning, då partikelutsläppet består mestadels av partiklar som är under 10 µm av diameter. Ca. hälften av partikelutsläppets totalvikt är finpartiklar (PM<sub>2.5</sub>). Beroende på pannstorleken och partiklarnas avskiljningsanläggningar är den specifika emissionsfaktorn för finpartiklarna 1–30 mg/MJ. I pulverförbränning av torv är ca. 20–25 % av partikelutsläppets totalvikt finpartiklar, då den specifika emissionsfaktorn är mellan 5–8 mg/MJ. Finpartiklarnas andel i sodapanornas totala partikelutsläpp är ca. 50–60 % (av massa) och den specifika emissionsfaktorn varierar mycket enligt storlekskategori, från 12–77 mg/MJ.

För oljeförbränning, rostpannor och virvelbäddprocesser kunde man inte definiera finpartiklarnas andel av det totala utsläppet, för att det inte fanns lämpliga mätningresultat. Man skulle behöva mera allmänt tillgängliga mätningresultat för dessa förbränningstekniker för att kunna utreda finpartiklarnas andel och kemiska komposition för olika bränslesorter. Också småskalig förbränning borde forskas och mätas mera eftersom den förorsakade finpartikelexpositionen kan vara betydande (på grund av låg utsläppshöjd och bristande dammavskiljningsanläggningar) t.ex. i tätorter där den dominerande uppvärmningsformen är individuell ved- och oljeeldning.

Trafiken påverkar på grund av den låga utsläppshöjden betydligt mera stadsluftens finpartikelkoncentration än den lokala energiproduktionen. Dieseldriftiga fordon, särskilt den tunga trafiken (bussarna, lastbilarna), har de största specifika utsläppen.

Ohlström, Mikael. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. [Finpartikelutsläp-pen inom energiproduktionen i Finland. The fine particle emissions of energy production in Finland]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1934. 114 p. + app. 33 p.

## ABSTRACT

The main purpose of this master's thesis was to define the fine particle (PM<sub>2.5</sub>, diameter under 2,5 µm) emissions of the energy production and to compare the calculated emission factors between different energy production concepts. The purpose was also to define what is known about fine particle emissions and what should still be studied/measured. The purpose was also to compare briefly the fine particle emissions of energy production and vehicle traffic, and their correlations to the fine particle concentrations of urban air.

In the theory part of this work a literature survey was made about fine particles in energy production, especially how they form and how they are separated from the flue gas. In addition, the health effects caused by fine particles, and different measuring instruments were presented briefly. In the experimental part of this work, the aim was to find out the fine particle emissions of different energy production processes by calculating specific emission factors (mg/MJ<sub>fuel</sub>) from powerplants' annual total particulate matter emissions (t/a), which were obtained from VAHTI-database system maintained by the Finnish Environmental Institute, and by evaluating the share of fine particles from total emissions with the help of existing measurement results. Only those energy production processes which produce significantly direct emissions of solid particles have been treated (pulverized combustion and oil burners from burner combustion, fluidized bed combustion processes, grate boilers, recovery boilers and diesel engines). The processes have been classified according to boiler type, size category, main fuel and also according to dust separation devices. To be able to compare different energy production processes, shared specific emission factor have been calculated for the similar subprocesses.

The fine particle emissions depend strongest on the boiler size category and dust separation devices used. Spent fuel or combustion technique does not have as big influence. In pulverized coal combustion, at least an electrostatic precipitator is used as a fly ash collector and therefore particle emission is composed mainly of particles under 10 µm in diameter. About half of the total mass of particle emission is fine particles (PM<sub>2.5</sub>). Depending on boiler size category and particle separation devices, the specific emission factor for fine particles is 1–30 mg/MJ. For pulverized combustion of peat, ca. 20–25 % of the total mass of particle emission is fine particles, and then the specific emission factor is between 5–8 mg/MJ. For recovery boilers, the fine particle portion of the total particle emission is 50–60 % (by mass) and the specific emission factor for fine particles varies considerably according to the boiler size category, being between 12 and 77 mg/MJ.

For oil burners, grate boilers and fluidized bed combustion processes, the fine particle portion of the total particle emission could not be determined, because there were no applicable measurement results to hand. For these combustion techniques, more public measurements would be needed in order to clarify the amount and composition of fine particles with different fuel varieties. Also small-scale combustion should be studied and measured more, because the fine particle exposure which it causes can be significant (due to the low emission height and absent dust separation devices), for example in densely populated areas, where the dominant heating form is individual wood or oil burning.

Due to the low emission height traffic has clearly a larger influence on the fine particle concentration of urban air than the local energy production. Diesel-driven vehicles, especially heavy duty traffic (buses, trucks), have the biggest specific emissions.

# ALKUSANAT

Diplomityö on tehty 1.3.1998 – 23.10.1998 välisenä aikana VTT Energiassa Espoon Otaniemessä. Esitän kiitokset VTT Energian tutkimusjohtaja Mikko Karalle, jonka aloitteesta tämä työ on tehty.

Valvojalleni professori Carl-Johan Fogelholmille ja ohjaajilleni dosentti Jorma Jokiniemelle sekä tekn. toht. Kari Lehtiselle esitän lämpimät kiitokset hyvistä ohjeista ja neuvoista. VTT Aerosoliteknikan ryhmästä kiitokset erityisesti Juha Kurkelalle, Terttaliisa Lindille, Jussi Lyyräselle ja Pirita Mikkaselle näyttävistä pienhiukkasten elektronimikroskooppikuvista ja muista käyttööni antamistaan tutkimusraporteista sekä henkilökohtaisesta avusta.

Suomen ympäristökeskuksesta esitän kiitokset dipl.ins. Marko Ekqvistille VAHTI-tietokannan hiukkaspäästödatasta ja hyvistä neuvoista. Tampereen teknillisestä korkeakoulusta kiitän tekn. lis. Mikko Moisiota hänen antamistaan hiukkaskokajakau- ma- ym. mittausdatoista, jotka on mitattu SIHTI 2 -projektin puitteissa (Energia- ja ympäristöteknologian tutkimusprojekti SIHTI 2: Pienhiukkaspäästöjen seuranta). Ilmatieteen laitoksen henkilökunnasta kiitän Tuomo Pakkasta ja Veli-Matti Kermistä neuvoista ja tutkimusraporteista sekä Timo Salmea mittausverkoston kuvauksesta. Kansanterveyslaitoksen henkilökunnasta kiitokset Kirsi Timoselle ja Jouko Tuomis- tolle. Kiitokset myös Lauri Taipaleelle (Helsingin Energia), Veli-Antti Kivilinnalle (Metsä-Botnia Oy, Kemin tehtaat) ja Erkki Jämsenille (Kemira Pigments Oy, Pori) sekä kaikille niille eri alueellisten ympäristökeskusten henkilöille, jotka minua tie- dontarpeessani auttoivat.

Omistan tämän diplomityön vanhemmilleni Rauhalle ja Stigulle. Lämpimät kiitok- set heille sekä Katjalle saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Espoossa 26.10.1998

Mikael Ohlström

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	3
REFERAT	4
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	6
DIPLOMITYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET	9
1 JOHDANTO	10
2 PIENHIUKKASET	17
2.1 Hiukkaskoko ja -jakaumat	17
2.1.1 Lognormaalijakauma	18
2.1.2 Diskreetti jakauma	19
2.2 Pienhiukkasten terveysvaikutukset	20
3 PIENHIUKKASTEN MUODOSTUMINEN ENERGIANTUOTANNOSSA	22
3.1 Poltinpoltto	22
3.1.1 Kivihiilen pölypoltto	22
3.1.2 Turpeen pölypoltto	24
3.1.3 Öljykattilat	25
3.2 Leijupetikattilat (CFB/BFB)	26
3.3 Arinakattilat	28
3.3.1 Pienpoltto	29
3.4 Soodakattilat	31
3.5 Dieselmoottorit	33
3.6 Kaasumaisten päästökomponenttien SO <sub>2</sub> ja NO <sub>x</sub> muutunta hiukkasiksi	34
4 PIENHIUKKASPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISTEKNIIKAT	36
4.1 Syklonit	37
4.2 Sähkösuodatin	40
4.2.1 Koronavaraaja	41
4.2.2 Sähkösuodattimen rakenne ja erotusaste	42
4.2.3 Mitoitus ja erityispiirteet	44
4.3 Kuitusuodattimet	45
4.4 Märkäpesurit	49
4.4.1 Pesutorni	50
4.4.2 Venturipesuri	51
4.5 Yhteenveto pienhiukkaspäästöjen puhdistuslaitteista	52
5 PIENHIUKKASTEN MITTAAMINEN SAVUKAASUISTA	54
6 HIUKKASPÄÄSTÖMÄÄRÄT KATTILATYYPEITTÄIN	57
6.1 Kivihiilen pölypoltto	58
6.1.1 Esimerkki kivihiilen pölypoltosta: Salmisaaren voimalaitokset	60
6.1.2 Kivihiilen pölypolttokattilat kokoluokittain	63
6.1.3 Yhteenveto hiilipölykattiloiden ominaishiukkaspäästöistä	69

6.2 Turpeen pölypoltto	70
6.2.1 Esimerkki turpeen pölypoltosta: Naistenlahden voimalaitokset	72
6.2.2 Turpeen pölypolttokattilat kokoluokittain	74
6.2.3 Yhteenveto turvepölykattiloiden ominaishiukkaspäästöistä	76
6.3 Öljykattilat	76
6.3.1 Painehajotteiset öljypolttimet	77
6.3.2 Pyöriväkuppiset öljypolttimet	78
6.4 Kuplivat leijukerroskattilat (BFB)	78
6.4.1 Esimerkki kuplivasta leijupetikattilasta: Kiimassuon voimalaitos	79
6.4.2 Yhteenveto BFB-prosessien ominaishiukkaspäästöistä	81
6.5 Kiertoleijukerroskattilat (CFB)	82
6.5.1 Esimerkki kiertopetikattilasta: Ahlströmin Pyroflow (Kemira Pigments Oy, Pori)	83
6.5.2 Yhteenveto CFB-prosessien ominaishiukkaspäästöistä	86
6.6 Arinakattilat	86
6.6.1 Pienpoltto	87
6.6.2 Arinakattilat kokoluokittain	88
6.6.3 Yhteenveto arinakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä	89
6.7 Soodakattilat	90
6.7.1 Esimerkki soodakattilasta: Metsä-Botnia Oy, Kemin tehtaot	91
6.7.2 Soodakattilat kokoluokittain	94
6.7.3 Yhteenveto soodakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä	96
6.8 Dieselmoottorit	97
6.9 Yhteenveto eri kattiloiden ominaishiukkaspäästöistä	99
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	103
LÄHDEKIRJALLISUUS	108
LIITTEET:	
LIITE 1. PAINEHAJOTTEISET ÖLJYPOLTTIMET	
LIITE 2. PYÖRIVÄKUPPISET ÖLJYPOLTTIMET	
LIITE 3. KUPLIVAT LEIJUPEDIT (BFB)	
LIITE 4. KIERTOLEIJUPEDIT (CFB)	
LIITE 5. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 0...5 MW <sub>pa</sub>	
LIITE 6. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 5...50 MW <sub>pa</sub>	
LIITE 7. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 50...300 MW <sub>pa</sub>	
LIITE 8. VAHTI-JÄRJESTELMÄN KATTILAT JA OMINAISPÄÄSTÖ- LASKENNASSA MUKANA OLEVAT KATTILAT	
LIITE 9. VAHTI-TIETOKANNAN KOKONAISHIUKKASPÄÄSTÖT (t/a) VUOSINA 1988–1995	
LIITE 10. PRIMÄÄRIENERGIAN KOKONAISKULUTUS ENERGIA- LÄHTEITTÄIN VUONNA 1995	
LIITE 11. PRIMÄÄRIENERGIALÄHTEET SUOMEN SÄHKÖN- TUOTANNOSSA VUONNA 1995	



## DIPLOMITYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET

APS	aerodynaaminen hiukkaskokoluokittelija
BFB	bubbling fluidized bed, kupliva leijupeti
CFB	circulating fluidized bed, kierto-leijupeti
CNC	condensation nuclei counter, kondensaatioydinlaskuri
DeNO <sub>x</sub>	katalyyttinen typenpoistoyksikkö
DMA	differential mobility analyzer, differentiaalinen liikkuvuus-analysaattori
EAS	electrical aerosol spectrometer, sähköinen aerosolispektrometri
ELPI	electrical low pressure impactor, sähköinen alipaineimpaktori
EPA	Environmental Protection Agency, USA:n ympäristönsuojeluvirasto
ESP	electrostatic precipitator, sähkösuodatin
HR-SEM	korkean erotuskyvyn pyyhkäisyelektronimikroskooppi
NAAQS	the national ambient air quality standards, USA:n kansalliset ilmanlaatustandardit
NMD	lukumääräjakauman mediaanihalkaisija
PAH	polyaromaattiset hiilivedyt
PDF-pelletti	peat derived fuel pellet, turvejohdannainen polttoainepelletti
PM	particulate matter, hiukkasaines
PM2.5	halkaisijaltaan 2,5 µm ja sitä pienempien hiukkasten kokonaismassa
PM10	halkaisijaltaan 10 µm ja sitä pienempien hiukkasten kokonaismassa
POK	kevyt polttoöljy
POR	raskas polttoöljy
ppm <sub>v</sub>	parts per million (volume), tilavuuden miljoonasosa (1/10 <sup>6</sup> )
QCM	kvartsikidemikrovaaka
REF	syntypaikkalajiteltu yhdyskuntajäte
SCR	selective catalytical reduction, katalyyttinen typenpoisto
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskooppi
SIHTI	energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelma
SMPS	scanning mobility particle sizer, skannaava liikkuvuusanalysaattori
SYKE	Suomen ympäristökeskus
TEOM	tapered element oscillating microbalance, värähtelevään elementtiin perustuva mikrovaaka
TSP	total suspended particles, hiukkasten kokonaisleijuma (kokonaismassapitoisuus)
VAHTI	ympäristöhallinnon lupa- ja ilmoitusvelvollisten (≥ 5 MW <sub>pa</sub> ), ympäristöä kuormittavien asiakkaiden seurantaan tarkoitettu asiakastietojärjestelmä (sisältää mm. energia- ja teollisuuslaitosten ilmapäästöt)
YTV	pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta
YVA	ympäristövaikutusten arviointi, lakisääteinen selvitys rakennettavaksi aiotun laitoksen aiheuttamista ympäristövaikutuksista.

# 1 JOHDANTO

Leijuva pöly on merkittävimpiä ilmanlaatuongelmia Suomen kaupunkialueilla ja koko pääkaupunkiseudulla. Pitoisuudet kohoavat erityisesti keväisin lumen sulamisen jälkeen, kun maa kuivuu ja talven aikana kaduille ja jalkakäytävälle levitetty jauhautunut hiekoitushiekka pölyää ilmassa liikenteen ja tuulen nostattamana. Hiekoitushiekan lisäksi leijuva pöly sisältää mm. tien pinnasta, autojen renkaista ja pakokaasuista sekä energiantuotannon ja teollisuuden päästöistä peräisin olevia hiukkasia. Hiukkasia muodostuu myös kaasumaisista yhdisteistä ilmakehän kemiallisissa reaktioissa.

Kaikesta ilmassa leijuvasta materiaalista käytetään termiä kokonaisleijuma (TSP, total suspended particles). Halkaisijaltaan alle 10  $\mu\text{m}$ :ä ( $\leq 0,01 \text{ mm}$ ) hienojakoisemmista hiukkasista käytetään termiä hengitettävät hiukkaset (respirable particulates, PM10, PM = particulate matter). Nykyään hiukkaset jaotellaan vielä tarkemmin kahteen luokkaan, pieniin ja suuriin (tai karkeisiin) hiukkasiin (fine and coarse particles) kokorajan ollessa 2,5  $\mu\text{m}$ . *Pienhiukkasista* puhuttaessa tarkoitetaan siis hiukkasia, joiden halkaisija on alle 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ). Englanninkielisessä kirjallisuudessa puhutaan lisäksi yleisesti submicron- ja supermicron-hiukkasista, jolloin kokorajana on 1  $\mu\text{m}$ .

Liikenteen ja tuulen maasta nostattamat hiekoitushiekasta ja tien sekä renkaiden kulumisesta peräisin olevat hiukkaset ovat valtaosin suuria (siis  $> 2,5 \mu\text{m}$ ). Niitä on lukumääräisesti vähän, mutta kokonsa vuoksi niillä on suurin vaikutus hiukkasten massapitoisuuksiin. Energiantuotannon ja liikenteen suorat hiukkaspäästöt koostuvat hyvin pienistä hiukkasista, eikä niillä ole suurta vaikutusta leijuman kokonaisuutensa. Niiden lukumäärä sen sijaan on suuri verrattuna karkeampiin hiukkasiin.

## Ilman epäpuhtauksien mittayksiköt

*Hiukkaspäästö* on tietyn pistemäisen päästölähteen aiheuttama kiintoainemäärä, joka leviää ympäröivään ilmaan. Ilman epäpuhtauksien päästöt ilmoitetaan tavallisesti niiden massana aikayksikköä kohti (esimerkiksi g/s, kg/tunti tai tonnia/vuosi). Tässä työssä hiukkaspäästöt ovat yksikössä tonnia/vuosi (t/a). Hiukkaspäästöä lasketaan *ominaispäästö* yksikössä  $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{pa}}$  (ns. ominaispäästökerroin), joka ilmoittaa tietyn yksittäisen päästölähteen (esim. kattilan) aiheuttaman kiintoainemassan kulutettua energiayksikköä (polttoainetehoa) kohti. Absoluuttiset hiukkaspäästöt kuten tonnia/vuosi eivät kerro mitään päästön suuruudesta verrattuna muihin päästölähteisiin, sillä niistä ei nähdä prosessin käyttötunteja, käytettyä polttoainemäärää, kattilahyötysuhdetta jne. Siksi tarvitaan esimerkiksi käytettyä polttoainemäärää kohti laskettuja ominaispäästökertoimia, jotta vertailu eri päästölähteiden välillä olisi mahdollista. Syötettäessä sama energiamäärä erilaisiin kattiloihin saadaan eri määrä palamisen haitallisia sivutuotteita, kuten hiukkasia. Suurimman hiukkaspäästön aiheuttaneella kattilalla on silloin suurin ominaispäästökerroin ja päinvastoin, eli suurimman ominaispäästökertoimen omaava kattila tuottaa eniten hiukkasia.

Päästölähteestä leviävä hiukkaspäästö aiheuttaa tietyn hiukkaspitoisuuden ympäröivään ilmaan. Pitoisuus ilmassa (tai savukaasukanavassa) voidaan ilmoittaa massana tilavuusyksikköä kohti, esimerkiksi  $\text{mg}/\text{m}^3$  tai  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Näin ilmoitettu pitoisuus riippuu paineesta ja lämpötilasta. Pitoisuus voidaankin selvyiden vuoksi ilmoittaa ns. normaaliolosuhteissa (esim.  $\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$ ,  $\text{m}^3\text{n}$  = normaalikuutio), jolloin kyseessä on 1,013 bar (1 atm) paine ja  $0^\circ\text{C}$  (273,15 K) lämpötila. Kun jonkin epäpuhtauden pitoisuus ilmoitetaan tilavuutta käyttäen (esim.  $\text{ppm}_\text{v}$  = parts per million =  $1/10^6$ ), on se riippumaton paineesta ja lämpötilasta. Hiukkaspitoisuus ilmassa tai savukaasussa ilmoitetaan melkein aina yksikössä  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tai  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Mittauslaitteiden ilmoittama savukaasun hiukkaspitoisuus voidaan muuntaa (SFS 5624, s. 2) ominaispäästöluvuksi sisäänsyötettyä energiayksikköä kohti ( $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{pa}}$ ).

### Päästön leviäminen

Ilman epäpuhtauksien leviäminen ilmakehässä määräytyy pääasiassa lämpötilan pystysuuntaisesta jakaumasta siinä ilmakehässä, mihin päästö tulee (ilmakehän stabiiliudesta) sekä tuulen suunnasta ja nopeudesta. Lämpötilan pystysuuntainen jakauma määrää sen, miten hyvin päästö leviää pystysuunnassa. Tuulen nopeus ja ilmakehän stabiilius määräävät puolestaan sen, kuinka paljon ilmaa sekoittuu päästöön. Nouseva ilma (esim. savukaasu piipusta) tekee työtä ympäröivää ilmaa vastaan (paine pienenee, tilavuus kasvaa). Tähän tarvittava energia otetaan ilmassa sisäisestä energiasta, jolloin ilman lämpötila laskee noin  $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$  (ns. kuiva-adiabaattinen lämpötilagradientti). Ilma, joka ei ole vesihöyryn kyllästämä, on (Pleym ym. 1989):

- *epästabiili*, kun  $dT/dz < -1^\circ\text{C}/100\text{ m}$
- *neutraali*, kun  $dT/dz = -1^\circ\text{C}/100\text{ m}$
- *stabiili*, kun  $dT/dz > -1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ .

Stabiili tilanne syntyy, kun lämpötila nousee ylöspäin mentäessä (*inversio*). Voimakkaita matalainversioita syntyy selkeällä ja melko tyynellä säällä talvella. Inversio syntyy, kun maa jäähtyy voimakkaasti pitkäaaltosen säteilyn vuoksi ja alimmat ilmakerrokset jäähtyvät. Erityisen voimakkaita matalainversioita syntyy laaksoissa, koska kylmä ilma valuu alaspäin ja kerääntyy maaston alimpiin kohtiin. Selkein tyyninä kevät- ja syysöinä sekä lyhyinä kesäöinä voi myös syntyä paikallisia matalainversioita. Aamupäivän kuluessa ne kuitenkin hajoavat nopeasti auringon lämmittäessä. (Pleym ym. 1989).

Inversiokerroksessa epäpuhtauksien pystysuuntainen sekoittuminen on mitättömän pientä. Päästön tapahtuessa inversiokerroksen alapuolelle voi maanpinnalle syntyä korkeita epäpuhtauspitoisuuksia. Inversiokerroksen yläpuolelle tapahtuva päästö ei sen sijaan aiheuta maanpinnalle epäpuhtauksia, koska inversio estää alaspäin tapahtuvan sekoittumisen.

Kun kyseessä on syvä kattilamainen laakso, voi matalainversion hajoaminen auringon lämmön johdosta häiriintyä. Useimmat ja pahimmat saastetilanteet kehittyvät syksyllä ja talvella. Selkeällä ilmalla muodostuu hyvin stabiili ilmassa maasta yöllä tapahtuvan lämpösäteilyn seurauksena. Yön aikana kylmää ilmaa valuu

laaksoon asettuen maaston alimpiin kohtiin. Näin voi syntyä kylmän ilman “järvi” kylmimmän ilman ollessa pohjalla ja lämpimämmän asteittain tämän päällä. Ilman suhteellinen kosteus on usein suuri, ja aamutuntien aikana voidaan todeta vahva saastesumu, jossa on tiivistynyttä vesihöyryä, savukaasuja ja pöly- ym. hiukkasia. Osa on syntynyt ilmassa kemiallisten reaktioiden tuloksena. Auringonsäteet, jotka tavallisesti hajottavat inversion, absorboituvat saastesumuun ja tunkeutuvat vain osaksi maanpinnalle saakka. Mikäli maa on vielä lumen peittämä, heijastuu suurin osa auringon säteilystä takaisin. Absorption vuoksi vain saastuneen ilman ylin kerros lämpenee, mikä vahvistaa inversiota. Kohdalle sattunut korkeapaine voimistaa paikallista inversiota. Esimerkiksi Los Angelesissa on läpi vuoden tällaisia korkeapaineita, jonka vuoksi siellä esiintyy toistuvasti suuria saastepitoisuuksia. (Pleym ym. 1989).

Hiukkasten viipymäaika ilmakehässä riippuu niiden koosta. Suurimmat hiukkaset (yli 10  $\mu\text{m}$ ) laskeutuvat nopeasti eivätkä kulkeudu kovinkaan kauaksi päästölähtees-tään. Pienten hiukkasten (0,1–1  $\mu\text{m}$ ) viipymäaika on pisin. Nämä voivat levitä laajoille alueille ennen laskeutumistaan (kuiva- tai märkälasseuma), jopa yli tuhannen kilometrin päähän (kaukokulkeutuma). (Pleym ym. 1989)

#### Pienhiukkasten haittavaikutukset

Terveydelliseltä kannalta pienet hiukkaset ovat merkittävämpiä, sillä yli 10  $\mu\text{m}$ :n hiukkaset jäävät pääasiassa ylähengitysteiden limakalvoille, kun taas sitä pienemmät hengitettävät hiukkaset eli PM10-hiukkaset kulkeutuvat syvemmälle. Alle 2,5  $\mu\text{m}$ :n pienhiukkaset (PM2.5) pääsevät tunkeutumaan aina keuhkorakkuloihin saakka (ks. viitteet alempana). Lisäksi pienhiukkaset poikkeavat kemialliselta koostumukseltaan luonnon tyypillisestä hiukkaspölystä enemmän kuin suuremmat hiukkaset. Tähän on syynä mm. se, että pienten hiukkasten kokonaispinta-ala on suurempi, joten niiden pinnalle tiivistyy ja reagoi enemmän haitallisia aineita, kuten raskasmetalleja. Kansainvälisissä epidemiologisissa tutkimuksissa (suurilla väestöryhmillä tehdyt tutkimukset) onkin todettu pienhiukkasten aiheuttavan mm. oireiden lisääntymistä astmaatikoilla sekä keuhko- ja sydänsairailta (ks. viitteet alempana). Ilmanlaadun episoditilanteiden (esim. talvella heikkotuuliset inversiot, kesällä voimakkaat korkeapainetilanteet) aiheuttamalla korkeilla hiukkaspitoisuuksilla on todettu olevan yhteyttä myös keuhko- ja sydänsairaiden kuolemiin ja sairaalakäyntien lisääntymiseen. (Esim. Schwartz 1993, 1994; Schwartz & Morris 1995; Burnett ym. 1995; Dockery ym. 1992; Dockery & Pope 1994).

Suomessa hiukkasten koostumus on keväisen katupölyn takia erilaista kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa, jolloin myös hiukkasten vaikutukset saattavat olla jossain määrin erilaisia eikä sikäläisiä tutkimustuloksia pystytä yleistämään Suomen olosuhteisiin. Suomessa onkin käynnissä useita omia tutkimuksia pienhiukkasten terveysvaikutuksista (esim. Kansanterveyslaitos). Niiden valmistuttua tiedetään jo paljon enemmän Suomen olosuhteissa tapahtuvasta pienhiukkasaltistuksesta. Muutamasta tutkimuksesta on jo esitetty tuloksiakin: esimerkiksi Timonen (1997) osoitti talvikauden pienhiukkasten (peräisin lähinnä polttoprosesseista) aiheuttavan hengitysoireita astmaattisille lapsille Kuopiossa jo pienilläkin ulkoilman pitoisuuksilla.

Ilmassa leijuvilla hiukkasilla on terveydellisten näkökohtien ohella myös muita vaikutuksia. Ne heikentävät näkyvyyttä, likaavat pintoja ja aiheuttavat muita materiaali-vaikutuksia (esim. korroosio, syöpyminen) sekä heijastavat auringon säteilyä takaisin avaruuteen viilentäen siten ilmakehää ja hidastaen kasvihuoneilmiötä.

#### Ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot

Ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot eivät ole sitovia, vaan ne ovat luonteeltaan ohjeita alueiden käyttöä, kaavoitusta ja rakentamista sekä liikenteen suunnittelua valvovalle viranomaiselle. Suomessa ilman pilaantumisen ehkäisemisessä on ohjeena, että rikkidioksidin, typpidioksidin, hiilimonoksidin ja hiukkasten keskimääräinen pitoisuus ulkoilmassa ei saa ylittää raja-arvoin määritettyjä sallittuja enimmäispitoisuuksia. Toistaiseksi hiukkasista ainoastaan TSP-hiukkasille on annettu raja-arvot (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vuosikeskiarvona ja 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vuoden vrk-mittausarvojen 95. prosenttipisteenä, ts. vähintään 95 % kaikista mittausarvoista tulee olla pienempiä kuin 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot hiukkasille on laadittu niiden haitallisten vaikutusten takia (ensisijaisesti terveydelliset syyt). Valtioneuvoston päätöksellä vuonna 1996 hyväksyttiin uusitut ohje- ja raja-arvot, joissa oli mukana myös hengitettävät hiukkaset (PM10). Aikaisemmin seurattiin vain TSP-arvoa. Nykyiset ohje- ja raja-arvot (1.9.1996 lähtien) Suomessa ovat:

- kokonaisleijuma (TSP): 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (vuoden vrk-arvojen 98. prosenttipiste) ja 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (aritmeettinen vuosikeskiarvo)
- hengitettävät hiukkaset: 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (kuukauden 2. suurin vuorokausiarvo).

TSP-ohje- ja raja-arvot ylittyvät säännöllisesti useissa Suomen kaupungeissa. PM10-ohje- ja raja-arvo ylittyi YTV:n Töölön mittauspisteessä vuoden 1996 helmi-, maaliskuun ja huhtikuussa (Aarnio ym. 1997). Vuonna 1997 hengitettävien hiukkasten ohje- ja raja-arvo ylittyi maaliskuussa sekä Töölössä että Vallilassa (Aarnio ym. 1998). Pienhiukkasille (PM2.5) ei Suomessa ole ohje- ja raja-arvoa eikä niitä vielä edes mitata muualla kuin YTV:n Vallilan mittauspisteessä (huhtikuusta 1997 lähtien) sekä yksittäisissä tutkimusprojekteissa. Sen sijaan Yhdysvalloissa uusittiin vuonna 1997 kansalliset ilmanlaatustandardit (NAAQS, the national ambient air quality standards) siten, että myös pienhiukkaset (PM2.5) otettiin epidemiologisissa tutkimuksissa havaittujen aiheuttamiensa terveyshaittojen vuoksi mukaan standardiin. Uudet standardit ovat (EPA 1997):

- PM2.5: 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (aritmeettinen vuosikeskiarvo (kolmen vuoden keskiarvotus)) ja 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (vrk-arvojen (24 h keskiarvo) 98. prosenttipiste (3 vuoden ka.))
- PM10-arvot pysyvät ennallaan ollen 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vuosikeskiarvona ja 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vuorokausiarvojen kolmen vuoden 99. prosenttipisteiden keskiarvona.

Jatkuvasti tiukentuvien ohje- ja raja-arvojen (erityisesti PM2.5-pienhiukkaset) valvonta tuottaa kuitenkin ongelmia, sillä mittauslaitteet ja -menetelmät eivät toistaiseksi ole riittävän kehittyneitä ja yhdenmukaisia. Uudet ilmanlaatustandardit ovat aiheuttaneet

Yhdysvalloissa paljon kiistaa, sillä joillakin alueilla taustapitoisuuskin ylittää säädetty arvot. EPA:n on kuitenkin jo lainkin mukaan säädettävä sellaiset ilmanlaadun ohjearvot, että ihmisten terveyttä suojellaan “riittäväällä turvallisuusmarginaalilla” kustannuksia säästämättä. Ohjearvot nähdään siis tavoitearvoina, joihin olisi hyvä päästä, jotta laajojen väestöryhmien terveys ei vaarantuisi. Ongelmana pienhiukkasten tapauksessa on kuitenkin se, ettei ole löydetty mitään erillistä kynnsarvoa, jonka ylittyessä vasta ilmenisi terveysvaikutuksia, vaan vaikutukset alkavat näkyä heti kun pitoisuudet kasvavat taustapitoisuudesta, joka vaihtelee alueellisesti paljonkin.

Yhdysvalloissa ollaan siis pisimmällä pienhiukkasten rajoittamisaikeissa kuten myös ilmanlaatumittauksissa ja terveysvaikutustutkimuksissa. Nyt myös EU:ssa on asetettu tavoiteaikatauluja pienhiukkasten rajoittamiseksi kiristyvin PM10-raja-arvoin. EU:n komissio ehdotti lokakuussa 1997 kaksivaiheista direktiiviä PM10-hiukkasille: vuonna 2005 vuosikeskiarvoksi  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja vuonna 2010  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tiuri 1998). Kesäkuussa 1998 EU:n ympäristöneuvosto hyväksyi raja-arvo-ehdotuksen, jossa vuosikeskiarvot ovat  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (v. 2005) ja  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (v. 2010). Erillistä PM2.5-direktiiviä ei ole, mutta se olisi perusteltu terveydellisten syiden takia. Ehdotetuissa PM10-rajoissa on otettu PM2.5-pienhiukkaset kuitenkin huomioon siten, että karkeasti n. 60 % PM10-hiukkasista on arvioitu olevan alle  $2,5 \mu\text{m}$ :n pienhiukkasia. Tällöin vuoden 2010 raja-arvo tarkoittaisi n.  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM2.5-pienhiukkasille. Nämä rajat ovat erittäin tiukkoja, sillä nykyisin lähinnä vain Pohjoismaissa (maaseudulla) alitetaan nämä pitoisuudet. Keski-Euroopassa PM2.5-pitoisuudet ovat  $10\text{--}60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (laajoilla alueilla  $20\text{--}30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) perustuen PM10-mittauksista tehtyihin arvioihin. (Tiuri 1998 (alkuper. lähde: Environmental Statistics 1996 (Eurostat))).

### Hiukkaslähteet

Ilmakehän hiukaspitoisuuksiin (PM10 ja PM2.5) vaikuttavat sekä luonnollista alkuperää olevat että ihmisten toiminnasta aiheutuvat hiukkaset. Tärkeimmät hiukkaslähteet ovat:

#### A. luonnon lähteet:

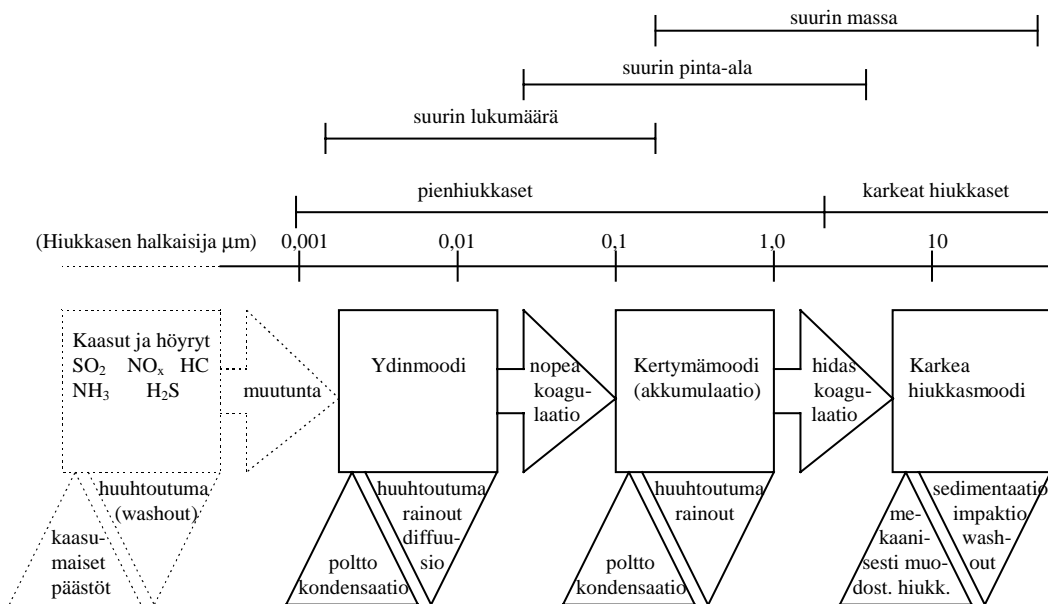
- meren roiskeiden aerosolit (tuulen ja haihtumisen aiheuttamat)
- tuulen nostattama maaperän pöly (erosio, rapautuminen)
- eloperäiset aerosolit (virukset, bakteerit, sienet, levät, itiöt, siitepöly)
- tulivuorten purkaukset
- metsäpalot

#### B. ihmisen aiheuttamat (antropogeeniset) lähteet:

- tieliikenteen päästöt
- työkoneiden ja kuljetusvälineiden päästöt (maansiirto- ja maatalouskoneet, lentokoneet, rautatiet, laivat jne.)
- kiinteiden polttoprosessien pistelähteet (hiilen, öljyn, puun, turpeen polttoprosessit, jätteenpoltto jne.)
- teollisuusprosessit (terästehtaat, sulatot jne.)
- maatalousjätteen poltto.

Lisäksi merkittävä osuus ilmakehän hiukkasmassapitoisuudesta aiheutuu kaasumais-  
ten aineiden muuttunasta hiukkasiksi ilmakehän reaktioissa. Näin muodostuneita  
aerosolihiukkasia kutsutaan sekundäärisiksi aerosoleiksi. Sekundääristen aerosoli-  
hiukkasten edeltäjäkaasut voivat olla alkuperältään sekä antropogeenisiä ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ )  
että luonnollisia ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ) (Hinds 1982).

Kaiken kaikkiaan vain runsas 10 % ilmakehän kokonaishiukkasmassasta (n. 3 430  
Mt/a) on arvioitu johtuvan ihmisen toiminnasta (IPCC 1995, 1996). Tästäkin mää-  
rystä yli puolet on sekundäärisiä hiukkasia eli kaasumaisista rikin ja typen päästö-  
komponenteista ( $\text{SO}_2$  ja  $\text{NO}_x$ ) muuttunnan kautta ilmakehässä muodostuneita sulfaat-  
teja ja nitraatteja (IPCC 1996). Luonnon omista hiukkaslähteistä syntyy kuitenkin  
pääasiassa halkaisijaltaan yli  $2,5 \mu\text{m}$ :n karkeita hiukkasia, joten vaarallisimmista  
pienhiukkasista huomattavasti merkittävämpi osa on peräisin ihmisen toiminnasta  
joko suorina pienhiukkaspäästöinä tai muuttunnan kautta muodostuneina (ks. kuva  
1).



Kuva 1. Kaavamainen esitys kaupunki-ilman aerosoleista (pienhiukkasista) ja niitä muokkaavista prosesseista (Hinds 1982). Rainout-mekanismi sitoo hiukkasia sadepilven sisällä, kun taas washout-mekanismissa sade huuhtoo ilmassa pilven alapuolella olevat hiukkaset.

### Työn tarkoitus, sisältö ja rajaukset

Tämä diplomityö on tehty VTT Energian sisäisenä tutkimuksena. Työn lähtökohtana oli pienhiukkasten havaitut terveysvaikutukset. Työn tarkoituksena on selvittää energiantuotannon pienhiukkaspäästöt ja verrata näitä päästöjä eri energiantuotantomuotojen kesken. Tarkoituksena on myös selvittää, mitä pienhiukkaspäästöistä tiedetään ja mitä pitäisi vielä tutkia sekä verrata lyhyesti energiantuotannon ja liikenteen pienhiukkaspäästöjä ja niiden keskinäistä osuutta kaupunki-ilman pienhiukkaspitoisuuksiin.

Tämän työn teoriaosassa perehdytään energiantuotannon pienhiukkasiin, erityisesti niiden muodostumiseen sekä erottamiseen savukaasuista. Lisäksi siinä esitellään lyhyesti pienhiukkasten terveysvaikutustutkimuksia sekä eri mittauslaitteet. Tuloso- osassa on pyritty selvittämään eri energiantuotantoprosessien pienhiukkaspäästöt laskemalla niille vuotuisista kokonaishiukkaspäästöistä (t/a) ominaispäästökertoimet ( $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{pa}}$ ) ja arvioimalla käytettävissä olleista mittaustuloksista pienhiukkasten osuus kokonaispäästöistä. Energiantuotantoprosesseista on käsitelty vain ne, jotka aiheuttavat merkittävästi suoria kiintoainepäästöjä (poltinpoltosta pölypoltto ja öljypolttimet, leijukerrosprosessit, arinakattilat, soodakattilat ja dieselmoottorit). Prosessit on pyritty erottamaan paitsi kattilatyypin, kokoluokan ja käytetyn pääpolttoaineen, myös pölynerotuslaitteiston mukaan, jotta mahdollisimman samankaltaisille osaprosesseille saadaan yhteinen ominaispäästökerroin vertailun mahdollistamiseksi erilaisten energiantuotantoprosessien välillä.

Puhtaan energiantuotannon (sähkö- ja kaukolämpölaitokset) ja teollisuuden päästöjä on vaikea erottaa toisistaan, sillä teollisuus tarvitsee usein suuria energiamääriä ja käyttää runsaasti fossiilisia polttoaineita kuten öljyä ja hiiltä. Kun lisäksi tässä työssä hiukkaspäästötietojen lähteenä on käytetty Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-järjestelmän tietokantoja, joissa on kaikkien energiaa tuottavien ilmoitusvelvollisten laitosten ( $\geq 5 \text{ MW}_{\text{pa}}$ ) päästötiedot, on hiukkaspäästötarkasteluun otettu mukaan myös prosessiteollisuuden energiantuotantokattilat.

Huolimatta  $\text{SO}_2$ - ja  $\text{NO}_x$ -päästöjen ilmakeemiallisen muutunnan kautta aiheuttamien pienhiukkasten merkittävästä osasta (yli puolet polttoprosessien aiheuttamasta ilmakehän pienhiukkaspitoisuudesta, IPCC 1996) ei näitä kaasumaisia päästöjä tässä työssä tarkastella. Sen sijaan ilmakehässä tapahtuvaa muutunutta käsitellään lyhyesti teoriaosassa.

Aikaisemmin tällaista laajaa energiantuotannon pienhiukkaskartoitusta ei Suomessa ole tehty. Kansainvälisiä tutkimuksia sen sijaan jo löytyy erityisesti PM10-hiukkasta, mutta myös joitakin PM2.5-pienhiukkasia käsitteleviä raportteja on olemassa (esim. Berdowski ym. 1996).



## 2 PIENHIUKKASET

Pienhiukkasista puhuttaessa käytetään yleisesti nimitystä *aerosolihiukkaset*. Aerosoli on perusmääritelmän mukaan kaasumaisen väliaineen ja siinä leijuvan kiinteän tai nestemäisen aineen muodostama seos (Hinds 1982). Esimerkiksi pöly, tupakansavu ja sumu ovat tyypillisiä aerosoleja. Voimalaitosprosesseissa muodostuva savukaasu-aerosoli sisältää mm. orgaanisia pienhiukkasia, epäorgaanisia pienhiukkasia (mm. metallioksidit, kloridit, sulfaatit, karbonaatit), nokihiukkasia (amorfista hiiltä), joiden pinnoille tiivistyy polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH), sekä hiilen, rikin, kloorin, alkali- ja raskasmetallien höyrystyneitä kaasumaisia yhdisteitä (Jokiniemi & Kauppinen 1995).

Aerosoleista puhuttaessa tärkeä ominaisuus on hiukkaskoko, tavallisimmin hiukkasen halkaisija ( $D_p$ ). Hiukkasten alarajana pidetään molekyyliyrppäitä, jotka ovat vain hieman kaasumolekyylejä suurempia. Kaasumolekyylien ja pienten hiukkasten ero on mm. se, että kaasumolekyylien törmäykset ovat kimmoisia, kun taas hiukkaset tarttuvat törmätessään kiinni pintaan (esim. lämmönsiirrindepositio). Ylärajaksi voidaan määritellä esimerkiksi hiukkaskoko, joka painovoimakentässä pysyy ilmassa sekunnin ajan. Hiukkaskoko kattaa viisi kertaluokkaa muutamasta nanometristä noin sataan mikrometriin. Karkeasti hiukkaset luokitellaan pienhiukkasiin (fine particles) ja karkeisiin hiukkasiin (coarse particles). Kokoluokkien välinen raja kulkee 1–2,5  $\mu\text{m}$ :n kokoluokassa lähdekirjallisuudesta riippuen. Terveysvaikutuksista puhuttaessa ns. hengitettävät hiukkaset ovat halkaisijaltaan alle 10  $\mu\text{m}$ :n kokoisia (PM10), mutta vielä näitäkin haitallisemmiksi on todettu alle 2,5  $\mu\text{m}$ :n pienhiukkaset (PM2.5).

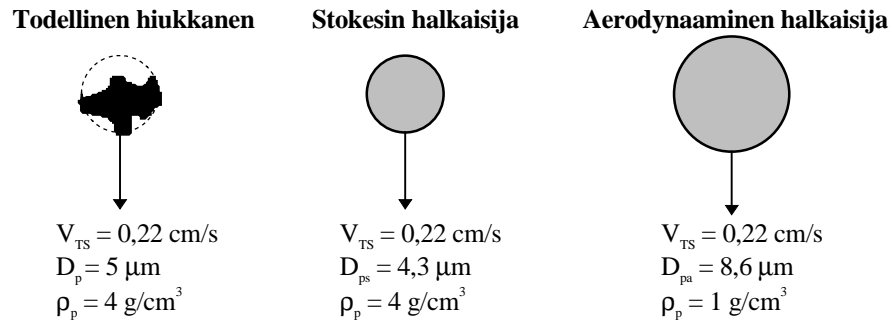
### 2.1 HIUKKASKOKO JA -JAKAUMAT

Laajan skaalan ja suuren lukumäärän (per kokoluokka) vuoksi on pienhiukkasia käsiteltävä tilastollisesti kokojakaumien avulla. Jakauman tietty kokoluokka määritellään hiukkasten halkaisijoiden avulla. Tämä ei kuitenkaan ole yksiselitteinen asia, sillä usein todellisen aerosolihiukkasen muotoa ei voida määrittää. Muoto ei myöskään ole vakio tietyllä hiukkaskokoalueella. Hiukkasten tiheys on vaikeasti mitattavissa ja se vaihtelee hiukkasen rakenteesta ja koosta riippuen. Hiukkasten koostumus ja ulkomuoto vaihtelevat siis sekä koon funktiona että myös kokoluokittain (Jokiniemi & Kauppinen 1995). Näiden ongelmien vuoksi on kehitetty erilaisia hiukkaskokomääritelmiä kuvaamaan todellista hiukkasta ideaalihiukkasen liikeominaisuuksien avulla. Tärkeimmät ovat (Hinds 1982):

– **aerodynaaminen halkaisija ( $D_{pa}$ )**, joka kuvaa sellaisen vakiotiheyksisen ( $1 \text{ g/m}^3$ ) pallomaisen hiukkasen halkaisijaa, jolla on sama laskeutumisnopeus kuin tarkastelun kohteena olevalla hiukkasella.  $D_{pa}$  lasketaan Stokesin halkaisijasta.

– **Stokesin halkaisija ( $D_{ps}$ )** on sellaisen pallomaisen hiukkasen halkaisija, jolla on sama tiheys ja laskeutumisnopeus kuin tarkastelun kohteena olevalla hiukkasella. Pallomaiselle hiukkaselle pätee  $D_p = D_{ps}$ .

Nämä halkaisijat kuvaavat hiukkasen aerodynaamisia ominaisuuksia (kuva 2). Aerodynaaminen halkaisija standardisoi hiukkasten muodon lisäksi myös niiden tiheyden. Aerodynaamiselta kannalta samanlaiset hiukkaset voivat olla kooltaan, muodoltaan ja tiheydeltään vaihtelevia. Useat eri mittauslaitteet jaottelevat hiukkaset juuri aerodynaamisen koon mukaan.



Kuva 2. Todellista hiukkasta vastaava Stokesin ja aerodynaaminen halkaisija (Hinds 1982).

Aerosolit voivat periaatteessa olla monodispersiivisiä eli koostua vain yhdestä hiukkaskoosta. Käytännössä aerosoli on kuitenkin aina polydispersiivinen koostuen useiden kertaluokkien kokoalueesta. Suuren molekyyylimäärän (esim.  $0,01 \text{ }\mu\text{m}$  hiukkanen voi koostua  $10^{14}$  molekyylistä) vuoksi hiukkasten kokojakauma voidaan kätevästi kuvata jatkuvana funktiona (Jokiniemi & Kauppinen 1995):

$$n(D_p)dD_p = dN = \text{hiukkasten lkm yksikkötilavuudessa}$$

välillä  $D_p, D_p+dD_p$

tai  $n(\log D_p)d(\log D_p) = dN$  välillä  $\log D_p, \log D_p+d(\log D_p)$ . (1)

Hiukkasten kokonaislukumäärä hiukkaskokoalueella (0, a) on kertymäfunktio  $N(a)$ :

$$N(a) = \int_0^a n(D_p)dD_p = \int_0^{\log a} n(\log D_p)d(\log D_p) \quad (2)$$

$$N_{\text{tot}} = N(\infty) = N \quad (\text{kpl/cm}^3 = 1/\text{cm}^3)$$

Vastaavalla tavalla saadaan kokojakaumafunktiot pinta-alalle, tilavuudelle ja massalle ( $D_p$ :n potensseja). Näiden käyttö rajoittuu kuitenkin vain tiettyihin erikoissoveluksiin.

### 2.1.1 Lognormaalijakauma

Aerosolihiukkasten kokojakaumia voidaan usein kuvata ns. lognormaalijakaumalla, joka on täysin määrätty, kun tunnetaan kolme parametria: geometrinen keskihalkaisija  $D_g$ , geometrinen keskihajonta  $\sigma_g$  ja kokonaispitoisuus. Lognormaalijakauman on todettu kuvaavan melko hyvin useiden aerosolien kokojakaumaa, vaikkei tieteellistä todistusta sen käytölle olekaan olemassa.

Lognormaalisti jakautuneen  $D_p$ :n logaritmi ( $\ln D_p$ ) noudattaa normaalijakaumaa:

$$n(\ln D_p) = \frac{N}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} * \exp \left[ -\frac{(\ln D_p - \ln D_g)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right]. \quad (3)$$

Tällöin jakauman geometrinen keskihalkaisija  $D_g$  on sama kuin sen mediaanihalkaisija ( $D_g = \text{NMD}$  lukumääräjakauman mediaanihalkaisija). (Hinds 1982).

### 2.1.2 Diskreetti jakauma

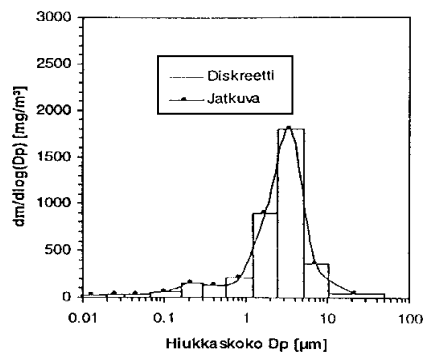
On kuitenkin monia käytännön tilanteita, joissa aerosolin kokojakauma poikkeaa lognormaalijakauman muodosta. Tällöin kokojakauma ei ole minkään tietyn funktion muotoa, vaan on käytettävä diskreettiä jakaumaa (Hinds 1982): lukumääräjakaumalle:

$$n(\log D_p) = \frac{\Delta N}{\Delta(\log D_p)} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (4)$$

ja massajakaumalle:

$$n_M(\log D_p) = \frac{\Delta M}{\Delta(\log D_p)} \quad (\text{gcm}^{-3}). \quad (5)$$

Jatkuvan ja diskreetin jakauman ero on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Jatkuva (yhtenäinen viiva) ja diskreetti jakauma.

## 2.2 PIENHIUKKASTEN TERVEYSVAIKUTUKSET

Tämänhetkisen tietämyksen mukaan pienhiukkasten aiheuttamat terveysvaikutukset riippuvat niiden kemiallisesta koostumuksesta sekä siitä, mihin ne kertyvät ja miten ne käyttäytyvät hengityselimistössä. Näin ollen pienimmät hiukkaset ovat vaarallisimpia, sillä ne pääsevät keuhkorakkuloihin saakka ja voivat pienen kokonsa vuoksi kulkeutua aina verenkiertoon asti. Lisäksi niiden kemiallinen koostumus poikkeaa karkeammista luonnon omista hiukkasista, koska ne ovat muodostuneet polttoprosesseissa (energiantuotanto, liikenne, teollisuusprosessit). Pienhiukkasten (PM<sub>2.5</sub>) ominaispinta-ala on suuri, joten niiden pinnalle voi tiivistyä runsaasti haitallisia aineita, kuten kattilassa polttoaineesta höyrystyneitä raskasmetalleja. Näiden vieraiden aineiden kertyminen elimistöön aiheuttaa oireita ja sairauksia, jotka ovat joko äkillisiä (esim. astma- ja sydänkohtaukset) tai pidemmän ajan kuluttua ilmeneviä (esim. syöpä ja keuhkosairaudet) (esim. Schwartz 1993, 1994; Schwartz & Morris 1995; Burnett ym. 1995; Dockery ym. 1992; Dockery & Pope 1994).

Schwartz ym. (1996) mittasivat kahdeksan vuoden ajan Yhdysvaltojen kuuden itäisen suurkaupungin pienhiukkasten (PM<sub>2.5</sub>), karkeiden hiukkasten (PM<sub>10</sub>–PM<sub>2.5</sub>) ja sulfaattihiukkasten (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) pitoisuudet ja vertasivat mittaustuloksia yhdessä säätiötojen kanssa kaupunkikohtaiseen päivittäiseen kuolleisuuteen. Tulokset osoittivat, että PM<sub>10</sub>-, PM<sub>2.5</sub>- ja sulfaattihiukkaset liittyivät merkittävästi lisääntyneeseen päivittäiseen kuolleisuuteen. Sen sijaan karkealla hiukkasmassapitoisuudella (2,5...10 µm) ja hiukkasten happamuudella (H<sup>+</sup>) ei ollut osuutta kuolleisuuslukuun. Suurin vaikutus oli PM<sub>2.5</sub>-pienhiukkasilla. PM<sub>2.5</sub>:n kahden päivän keskiarvossa 10 µg/m<sup>3</sup> pitoisuuslisäykseen liittyi 1,5 %:n päivittäisen kuolleisuuden lisäys. Hieman suurempi vaikutus tällä ulkoilman pienhiukkasipitoisuuden lisäyksellä oli keuhkosairauksiin (+3,3 %) ja sydänsairauksiin (+2,1 %).

Hiukkaskoon ja kemiallisen koostumuksen lisäksi myös pienhiukkasten määrä, jolle altistutaan, vaikuttaa syntyviin terveyshaittoihin. Vielä ei kuitenkaan olla varmoja, onko altistuminen pienhiukkasten lukumäärälle vai kokonaismassalle haitallisempaa. Ilmanlaatumittaukset ja ilmanlaadun ohjearvot perustuvat massamittauksiin (esim. µg/m<sup>3</sup>). Lukumääräisesti suurin osa polttoprosessien hiukkaspäästöistä on kuitenkin pienhiukkasia (ks. luku 6), joten vaikka päästön kokonaismassaa pystytään vähentämään alle rajoitusten, ei pienhiukkasten lukumäärä välttämättä ole juuri pienentynyt. Tämän vuoksi on saatava lisää tietoa pienhiukkasten terveysvaikutusmekanismeista. Toinen keino rajoittaa aiheutuvia haittoja on laatia raja-arvot ilmanlaadun PM<sub>2.5</sub>-hiukkasille tai jopa vieläkin pienemmille hiukkasille, sillä PM<sub>2.5</sub>-hiukkastenkin massasta suurin osa saattaa olla kokoalueella 1–2,5 µm, mutta lukumääräisesti suurin osa onkin halkaisijaltaan alle yhden mikrometrin pienhiukkasia, jotka viimeaikaisissa tutkimuksissa on todettu kaikkein vaarallisimmiksi. Näiden uusien raja-arvojen käyttöönotto on kuitenkin mahdollista vasta kun mittalaitetekniikka kehittyy ja mittausmenetelmät yhdenmukaistuvat riittävästi. Lisäksi mittausverkostojen on laajennuttava, jotta saadaan tietoa merkittävistä alueellisista pitoisuuseroista.

Ilman epäpuhtauksien terveysvaikutuksille ovat altteimpia astmaatit, lapset ja vanhukset. Pienhiukkaset saattavat aiheuttaa erityisesti näille väestöryhmille astma-kohtauksien ja sydäntautien lisääntymistä. On arvioitu, että pienhiukkaset lyhentävät ihmisten keskimääräistä elinikää 1,1 vuodella (WHO 1994). Arvioitaessa ihmisten altistusta pienhiukkasille on otettava huomioon myös sisäilman hiukkaslähteet, joiden vuoksi ihmisten henkilökohtainen altistus pienhiukkasille voi vaihdella suuresti. Merkittävimpiä lähteitä kotiympäristössä ovat tupakointi, ruoanlaitto ja siivous. Myös ilmanvaihdolla on oleellinen merkitys sisäilman hiukkaspitoisuuksiin. Monn ym. (1997) ovat tutkineet Sveitsissä 17 kodissa sisäilman ja ulkoilman PM10-, PM2.5- ja NO<sub>2</sub>-suhdetta. Kodeissa, joissa ei ollut sisäisiä lähteitä ja joissa ihmisten aktiiviteetti oli vähäistä, PM10-hiukkasten sisäilma/ulkoilma -suhde oli 0,7. Kodin sisäisistä lähteistä tupakoinnilla oli merkittävin vaikutus tähän suhteeseen (sisä/ulko >1,8).

## 3 PIENHIUKKASTEN MUODOSTUMINEN ENERGIANTUOTANNOSSA

Suomen energiaintensiivisen teollisuuden sekä vaihtelevien ilmasto-olosuhteiden vuoksi maassamme tarvitaan runsaasti sähkö- ja lämpöenergiaa. Tämä energiamäärä tuotetaan monilla eri polttotekniikoilla. Palamisprosesseissa syntyviä pienhiukkaspäästöjä on siten loogista tarkastella polttotapojen mukaan. Tässä yhteydessä esitetään ne polttoprosessit, jotka ovat merkittäviä suorien pienhiukkaspäästöjen kannalta.

Palamisprosessi on kemiallinen reaktio, jossa polttoaine reagoi saatavilla olevan hapen kanssa muodostaen palamistuotteita ja lämpöenergiaa. Tuotettaessa energiaa polttoprosesseilla syntyy siis väistämättä sivutuotteita, jotka yleensä ovat haitallisia (ympäristölle, lämmönsiirrinmateriaaleille, ihmisille) kuten pienhiukkaspäästöt.

Palamisprosessin käynnistämiseksi tarvitaan siis polttoainetta, happea sekä tarpeeksi korkea lämpötila. Palamisen alettua syntyvien kuumien palokaasujen lämpötilan johtuminen ja säteily ylläpitävät tarvittavan palamislämpötilan polttokammiossa. Happea voi olla sitoutuneena polttoaineeseen, mutta useimmiten happi johdetaan polttokammioon ilmasta kaksiatomisena ( $O_2$ ). Polttoaine koostuu yleensä hiilivetyyhdisteistä, jolloin hiili hapen kanssa reagoidessaan muuttuu hiilidioksidiksi ja vety vesihöyryksi. Polttoaineen muut ainekset pyrkivät hapettumaan korkeimmalle hapestilalleen.

Palamisprosessit luokitellaan yleensä polttoaineen ja liekkityypin eli polttoaineen ja ilman sekoitustavan mukaan. Palamisolosuhteita säätelemällä (ilmakerroin, polttoaineen syöttö) päästään haluttuun lopputulokseen. Seuraavaksi esitetään ne energiantuotannon polttoprosessit, jotka ovat merkittäviä pienhiukkaspäästöjen kannalta. Näitä ovat poltinpoltto, leijupetikattilat, arinakattilat, soodakattilat ja dieselmoottorit. Maakaasua käytettäviä kaasuturbiineja ei käsitellä, sillä maakaasun palamisessa ei kiintoainepäästöjä juurikaan synny. Toisaalta ilmakehässä tapahtuvan muutunnan kautta maakaasun poltosta syntyneet  $NO_x$ -päästöt muodostavat pienhiukkasia. Täysin saasteettomia energiantuotantomuotoja pienhiukkaspäästöjen suhteen ovat vain ydinvoima, vesivoima sekä eräät muut uusiutuvat energialähteet, kuten aurinko- ja tuulivoima.

### 3.1 POLTINPOLTTO

Poltinpolttokattiloista käydään läpi kivihiili- ja turvepölypolttokattilat sekä öljykattilat.

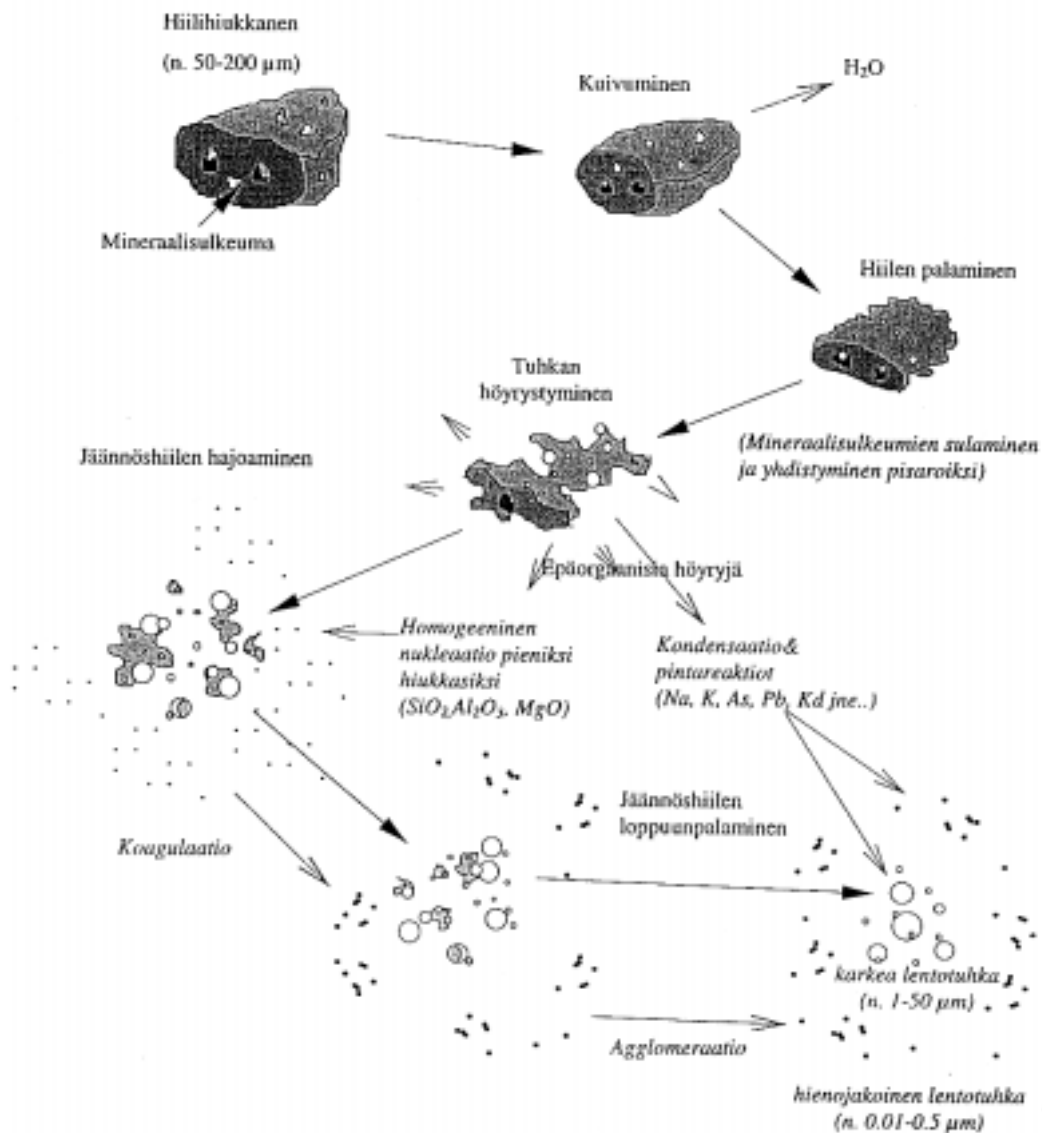
#### 3.1.1 Kivihiilen pölypoltto

Kivihiilen pölypoltossa syntyvää lentotuhkaa on tutkittu paljon ja se onkin tunnetuin polttoprosessin palamistuote. Kuitenkin itse hiilihiukkasen palamisprosessissa ae-

rosolien muodostumiseen vaikuttavien kaasumaisten yhdisteiden vapautumismekanismit ovat niin monimutkaisia, ettei niitä vielä täysin tunneta. Kaasumaisia yhdisteitä vapautuu runsaasti, sillä kaasun lämpötila kivihiilen pölypoltossa on noin 1 500–1 700 °C ja palavan hiilihiukkasen pintalämpötila vielä satoja asteita tätäkin korkeampi. Tällöin polttoainehiukkanen kuivuu, pyrolysoituu ja palaa vapauttaen hiilen, rikin ja kloorin kaasumaisia yhdisteitä sekä osan alkali- ja raskasmetalleista. Juuri metallien vapautumisen yksityiskohdat eivät vielä ole kokonaan selvinneet, sillä vaikuttavia tekijöitä on runsaasti: palamisolosuhteet, alkuaineiden sidokset hiileen, ainesuhteet, hiilen sisältämien mineraalihiukkasten koostumus, koko ja määrä sekä kemialliset reaktiot hiilihiukkasen sisällä (Jokiniemi & Kauppinen 1995). Kirjallisuudesta löytyy arvioita alkali- ja raskasmetallien kokonaisvapautumisesta (esim. Clarke 1993).

Pölypolttoprosessissa kivihiilimurske jauhetaan ensin hienojakoiseksi pölyksi (40–80 µm), joka puhalletaan polttimeen ilmaseoksen kanssa. Hiilen pölypoltossa muodostuvien yhdisteiden käyttäytyminen riippuu merkittävästi hiilen laadusta, alkuperästä ja palamisprosessin olosuhteista. Kuvassa 4 on esitetty kivihiilen pölypoltossa syntyvien hiukkasten muodostumismekanismit (Flagan & Seinfeld 1988). Vaikeasti höyrystyvät oksidit, kuten SiO<sub>2</sub>, MgO, CaO, FeO, pelkistyvät palavan hiilihiukkasen ympärille muodostuvassa happiköyhässä kerroksessa. Pelkistyneillä muodoilla on suurempi höyrönpaine kuin happeen sitoutuneilla yhdisteillä, jolloin pieni osa (n. 1 %) pelkistyneistä yhdisteistä höyrystyy ja kulkeutuu kaasumaisina pelkistävän alueen ulkopuolelle. Lämpötilan laskiessa ne lopulta hapettuvat ja muodostavat ylikylläistä höyryä. Homogeenisen nukleaation (ydintymisen) kautta oksidit muodostavat primäärihiukkasia, jotka edelleen agglomeraation ja heterogeenisen nukleaation avulla kasvavat nopeasti nanometriluokasta n. 0,1 mikrometrin kokoon muodostaen primäärihiukkasista koostuvia *ketjuagglomeraatteja* (ks. kuva 19, s. 54) (Flagan & Seinfeld 1988).

Osa (0,1–10 %) tuhkan höyrystyvistä komponenteista (As, K, Na, Pb, Cd -yhdisteitä) reagoi muodostuneiden pienhiukkasten ja kaasuuntumattoman mineraaliaineksen kanssa. Lämpötilan edelleen laskiessa yhdisteet tiivistyvät muodostuneiden pienten hiukkasten pinnoille, koska niiden ominaispinta-ala on huomattavasti suurempi kuin isojen hiukkasten. Tämä tiivistyminen aiheuttaa raskasmetalli- ja alkalikomponenttien rikastumista jo muodostuneiden pienhiukkasten pinnalle (kuva 4). (Quann ym. 1990).



Kuva 4. Kivihiilen pölypoltossa muodostuvien hiukkasten syntymekanismit (Flagan & Seinfeld 1988).

Kivihiilen pölypoltossa savukaasujen kiintoainepitoisuus ennen erotuslaitteita on noin 10–15 g/m<sup>3</sup>n. Palamattomien osuus hiukkasten kiintoaineesta on yleensä alle 5 %. (Lammi ym. 1993).

### 3.1.2 Turpeen pölypoltto

Turpeen pölypoltto on jo väistyvää tekniikkaa. Syinä tähän ovat mm. NO<sub>x</sub>-päästöjen suuruus sekä se, että turvepölykattilassa ei voida polttaa mitään muuta polttoainetta.



Nämä seikat ovat johtaneet turvepölykattiloiden korvaamiseen leijukerroskattiloilla, joilla käytettävä polttoainevalikoima on laaja ja  $\text{NO}_x$ -päästöt alhaisia. Laajasta polttoainevalikoimasta on se etu, että eri polttoaineiden toimittajia voidaan kilpailuttaa eikä olla vain yhden toimittajan varassa. Esimerkiksi Jyväskylän Rauhalahden voimalaitoksessa turvepölykattila muutettiin leijukerroskattilaksi vuonna 1992. Kattilauudistuksen myötä vähenivät hiukkas-, rikkidioksidi- ja hajupäästöt oleellisesti (Karvonen 1997).

Turpeen pölypoltossa savukaasujen kiintoainepitoisuus ennen erotuslaitteita on noin 5–10  $\text{g/m}^3$ . Palamattomien osuus hiukkasten kiintoaineesta on noin 3–10 %. (Lammi ym. 1993).

### 3.1.3 Öljykattilat

Kevytöljyn poltossa syntyvä hiukkaspitoisuus savukaasussa on huomattavasti pienempi, noin kymmenesosa, raskasöljypolton hiukkaspäästöistä (Lammi ym. 1993). Tämän vuoksi seuraavassa käsitellään nimenomaan raskasöljypoltoa. Kevytöljykattiloiden hiukkaspäästöjen rajoittamiseen riittävät säännölliset poltinhuollot.

Teholtaan noin 1–15 MW:n öljykattilat ovat tyypillisesti lämmitys- tai teollisuuskäytössä olevia tulitorvi-tuliputkikattiloita, joiden polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä (POR) (Lammi ym. 1993). Noin kolmasosa Suomen raskasöljykattilakannasta on varustettu vesiemulsiolaittein, mutta suurimmassa osassa uusista kattiloista on käytössä vesiemulsiotekniikka, jolla tehostetaan palamista ja vähennetään kiintoainepäästöä. Vesiemulsiopoltossa ruiskutetaan vettä (4–10 p-%) öljyn joukkoon, jonka jälkeen seos homogenisoidaan sekoittimessa (pumppu tai sekoituslaite). Saatavaa polttoöljyn vesiemulsiota poltetaan öljypolttimella. Tämän kokoluokan öljykattiloissa ei pääsääntöisesti ole pölynerottimia, joten vesiemulsiopoltto on ainoa hiukkaspäästöjen rajoittamiskeino. Menetelmällä voidaan vähentää poltossa syntyviä hiukkasia n. 50 % (Kaukanen ym. 1987).

Yli 15 MW:n öljykattilat ovat yleensä raskasöljykäyttöisiä kuumavesi- tai höyrykattiloita, joista osa on varustettu syklonierottimilla (Lammi ym. 1993).

1–3 MW:n öljykattiloissa yleisin käytössä oleva poltin on paineöljyhajotteinen öljypoltin, jolla raskasöljykäytössä päästään alimmillaan noin 200  $\text{mg/m}^3$  hiukkaspitoisuuksiin. Tätä suuremmissa kattiloissa yleisin poltintyyppi on pyörivähajotteinen (pyöriväkuppinen) raskasöljypoltin, jolla saavutetaan 80–150  $\text{mg/m}^3$  pitoisuustaso. Suurissa voimalaitos- tai teollisuuskattiloissa yleisin poltintyyppi on höyryhajotteinen (joskus myös paineilma- tai paineöljyhajotteinen) raskasöljypoltin, jonka hiukkaspäästö on samaa luokkaa kuin pyörivähajotteisella. (Lammi ym. 1993).

Edellä esitetyt hiukkaspitoisuudet ovat uusille tai lähes uusille kattiloille. Vanhoista kattiloista mitatut hiukkaspitoisuudet ovat tyypillisesti olleet välillä 100–500  $\text{mg/m}^3$  (Lammi ym. 1993). Uusillakin öljykattiloilla käynnistys- ja kuormanmuutosjaksojen aikaiset hiukkaspäästöt ovat moninkertaisia jatkuvan käynnin arvoihin

verrattuna, koska öljynpolton tuhkasta jopa 30 % saattaa varastoitua kattilan lämpöpinnoille nuohousten välillä.

Öljykattilan kiintoainepäästöt muodostuvat öljyn tuhkasta sekä palamattomasta noesta ja öljykoksista. Palamattomien osuus (ns. hehkutushäviö) on yleensä 70–90 % (Lammi ym. 1993). Öljynpolton hiukkaset ovat hyvin hienojakoisia. Vesiemulsiolla voidaan tehostaa palamista ja siten pienentää hiukkaspäästöä. Pyöriväkuppisilla ja ilmahajotteisilla polttimilla on vesiemulsiopoltolla saavutettu 50–70 % pienempiä hiukkaspitoisuuksia. Syntyvien hiukkasten koko pienenee edelleen emulsion vesipitoisuuden lisääntyessä. (Kaukanen ym. 1987).

Hiukkasten pieni koko ja palamattomien suuri osuus tekevät öljykattilan savukaasusta vaikean puhdistettavan. Yleensä savukaasuja ei puhdisteta lainkaan. Joissakin kattiloissa käytetään sykklonia, mutta sen erotusaste on enintään 50–60 % (ks. luku 4).

Raskasöljy sisältää paljon vanadiinia (V) ja nikkeliä (Ni), joten raskasöljypoltolle on ominaista suuret vanadiini- ja nikkeli-päästöt. Pienhiukkasiin sitoutuneina vanadiini ja nikkeli ovat siten hyviä merkkiaineita, jotka helpottavat pienhiukkasten kohdistamista oikealle päästölähteelle.

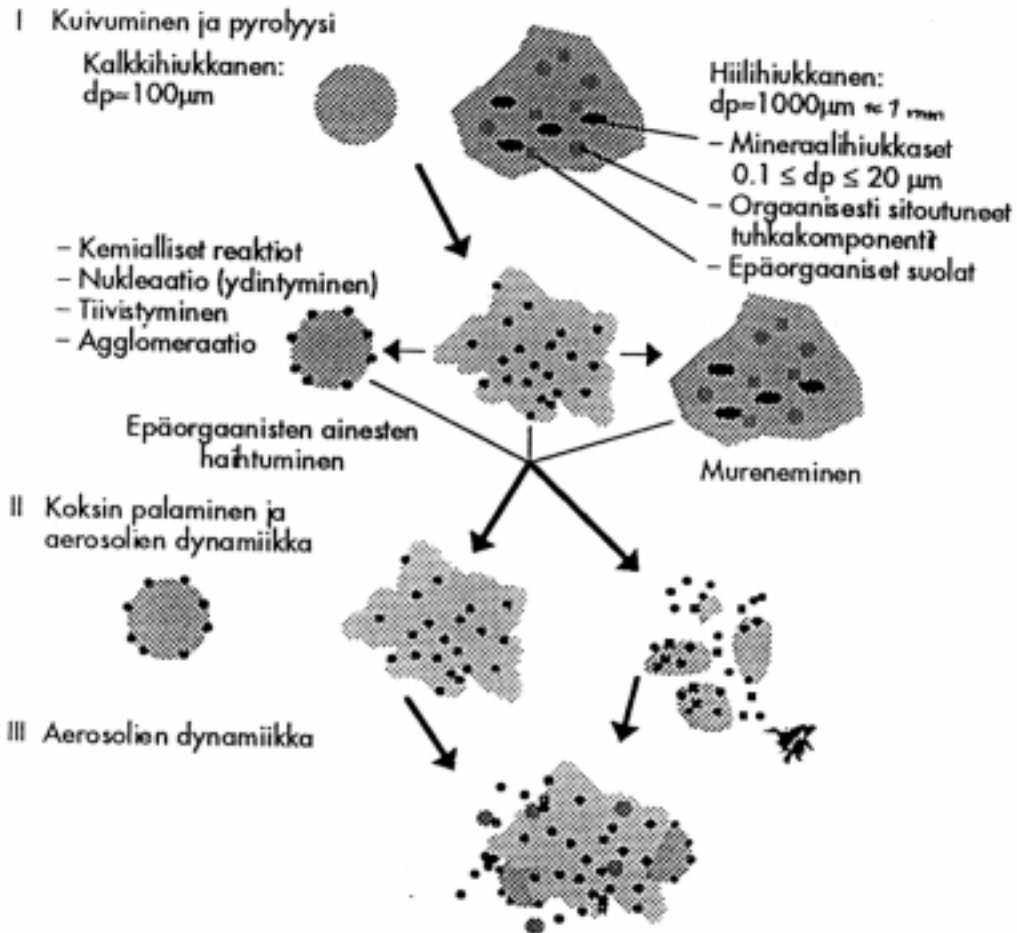
### 3.2 LEIJUPETIKATTILAT (BFB/CFB)

Normaalipaineisissa leijukerrosprosesseissa, kupliva peti (BFB, bubbling fluidized bed) ja kiertopetikattiloissa (CFB, circulating fluidized bed), palamislämpötilat ovat alhaisempia kuin pölypoltossa ja syötettävien polttoainehiukkasten koko on suurempi kuin muissa polttotekniikoissa. Lisäksi palaminen tapahtuu inertissä petimateriaalissa (hiekkä, kalkki), joka rajoittaa merkittävästi palamisprosessin säteilylämmönsiirtoa. Näistä tekijöistä johtuen muodostuvien pölyhiukkasten koostumus ja koko ovat aivan erilaisia kuin esimerkiksi pölypoltossa.

Hiilen kiertoleijukerrosprosessissa pedin lämpötila on noin 700–900 °C, jolloin kaasun ja hiukkasten lämpötila on useita satoja asteita alhaisempi kuin pölypoltossa. Tällöin eivät vaikeasti höyrystyvät oksidit merkittävästi vapaudu kaasufaasiin. Hyvin pieni osa oksideista voi kuitenkin vapautua ja muodostaa ns. siemenhiukkasia, joiden pinnalle alkali- ja raskasmetallit rikastuvat. Osa alkali- ja raskasmetalliyhdisteistä voi siis kaasuuntua. Ne eivät kuitenkaan muodosta homogeenisen nukleaation kautta massallisesti merkittäviä määriä uusia pienhiukkasia (Lind ym. 1994). Alkali- ja raskasmetallien vapautuminen on tässä prosessissa niin vähäistä, että ne ehtivät sekoittua kaasun ja muiden hiukkasten kanssa ennen kuin kaasun jäähtyessä tulevat kylläisiksi ja tiivistyvät muiden hiukkasten pinnoille (Lind ym. 1994; Lind ym. 1995).

Hiilen poltossa kiertopetikattilassa ennen hiukkaspuhdistimia havaitut hiukkaset koostuvat pääasiassa sykklonin läpäisseydestä petimateriaalista ja polttoainehiilestä olevasta kaasuuntumatta jääneestä mineraaliaineksesta. Hiukkasten koko on suurempi

kuin pölypoltossa, sillä keskikoko on n. 30  $\mu\text{m}$  (Lind ym. 1995). Kuvassa 5 on esitetty kaavio leijukerrosprosesseissa syntyvien hiukkasten muodostumisesta.



Kuva 5. Tuhkan muodostuminen kivihiilen kierto-leijukerros-poltossa (Jokiniemi & Kauppinen 1995).

Puuperäisiä polttoaineita (biopolttoaineet) poltettaessa alle  $1 \mu\text{m}$ :n pienhiukkasmoodi esiintyy vain, kun polttoaineen tuhkassa on tarpeeksi haihtuvia aineita. Kun tuhka koostuu pääosin vaikeasti haihtuvista aineista, ei pienimpiä hiukkasia muodostu tiivistymällä suuria määriä. Lentotuhka sisältää pääosin kalsiumin (Ca), piin (Si), alumiinin (Al) ja magnesiumin (Mg) yhdisteitä. Puupolttoaineen sisältämästä natriumista (Na), kaliumista (K), kloorista (Cl) ja rikistä (S) voi merkittävä osa kaasuntua leijupoltossa. Tällöin ne poistuvat kaasumaisina kattilasta ja muodostavat myöhemmin savukanavassa pienhiukkasia tiivistymällä lämpötilan alenemisen myötä. (Latva-Somppi 1998).

Leijupoltossa kattilan jälkeinen hiukkaspitoisuus on yleensä selvästi korkeampi kuin arinakattiloissa (ks. kappale 3.3). Tuhkasta 80–100 % lähtee lentoon, mutta palamat-

toman polttoaineen osuus hiukkasista on yleensä biopolttoaineilla alle 10 % ja hiilellä alle 15 %. Suurimmat hiukkaspitoisuudet syntyvät hiilikattiloissa, hiililaadusta riippuen 12–20 g/m<sup>3</sup>n. Tästä määrästä noin 30 % on rikinpoistossa käytetystä kalkista johtuvaa. Turpeen poltossa hiukkaspitoisuus on noin 6–12 g/m<sup>3</sup>n ja puun poltossa vastaavasti 2–6 g/m<sup>3</sup>n. (Lammi ym. 1993).

### 3.3 ARINAKATTILAT

Pienten ja keskisuurten yksiköiden yleisin polttomenetelmä kiinteille polttoaineille on perinteisesti ollut arinapoltto. Käyttötarkoituksen mukaan arinakattilat voidaan jakaa kokoluokkiin esimerkiksi seuraavasti (Maskuniitty 1995):

– omakotitalokattilat	15...40 kW
– kiinteistökattilat	40...400 kW
– alue- ja kaukolämmityskattilat	400...20 000 kW
– teollisuuskattilat	1 000...80 000 kW
– yhdyskuntajättekattilat	10 000...30 000 kW.

Uudet polttotekniikat, kuten leijupoltto, ovat 1980-luvulta lähtien voimakkaasti syrjäyttäneet arinapolttotekniikkaa Suomessa yli 5 MW:n yksiköissä (Maskuniitty 1995). Tätä pienemmissä yksiköissä arinapoltto on kuitenkin edelleen yleisin kiinteiden polttoaineiden polttomenetelmä.

Polttoaineesta ja kattilan koosta riippuen käytössä on erilaisia arinaratkaisuja: kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina, ketjuarinat ja erikoisarinat (esim. jätteenpoltoarina). Usein arinatyypit ovat näiden yhdistelmiä (Maskuniitty 1995). Arinat eroavat lisäksi toisistaan arinamateriaalin jäähdytystavan mukaan. Pienet arinat ovat yleensä ilmajäähdytteisiä eli jäähdytys tapahtuu primääri-ilmalla. Suuret arinat ovat pääasiassa vesijäähdytteisiä ja jäähdytys on integroitu kattilan vesikiertoon.

Hiilen poltosta ketjuarinakattilassa (yleensä 20...80 MW) muodostuvat hiukkaset ovat leijupoltossa syntyneitä suurempia ja koostuvat palamattomasta aineksesta. Kuten leijupoltossa, suhteellisen matalan palamislämpötilan vuoksi ei mineraaliaineksen kaasuuntumista juuri tapahdu, jolloin tuhkan hiukkaskoko on suuri. Arinapolton hiukkasten keskikoko on 60–70 µm (Lammi ym. 1993). Leijupolttoa tehottomampi sekoitus arinalla johtaa suurempaan palamattoman aineksen määrään. Sen osuus saattaa vaihdella runsaastikin polton aikana ollen biopolttoaineilla yleensä 40–60 % kiintoaineesta. Tuhka poistuu pääosin pohjakuonana arinan läpi tai suuremmissa yksiköissä jäännöshiilen loppuunpalamiseen tarkoitetun, usein mekaanisen tuhkarinan loppuosasta sammutuskaukaloon. 5–40 % polttoaineen tuhkasta poistuu lentotuhkana. Arinapoltossa tuhkan hehkutushäviö, ts. tuhkan sisältämän palamiskelpoisen polttoaineen osuus, on selvästi leijupolttoa suurempi (Maskuniitty 1995).

Arinakattiloiden hiukkaspäästöt ennen pölynerotinta vaihtelevat runsaasti. Eroja syntyy itse kattilan rakenteen lisäksi myös polttoaineen laadun vaihteluista, syötön

epäsäännöllisyydestä, kuormituksen vaihteluista jne. Vanhoista väljiksi mitoitetuista kattiloista on mitattu jopa alle  $0,5 \text{ g/m}^3\text{n}$  hiukkaspitoisuuksia. Pienimmät pitoisuudet ( $0,5\text{--}3 \text{ g/m}^3\text{n}$ ) esiintyvät hakkeen poltossa, suurimmat ( $2\text{--}10 \text{ g/m}^3\text{n}$ ) turpeen ja puujätteen poltossa (Lammi ym. 1993). Edellä mainituista vaihtelevista palamisolosuhteista johtuen arinakattiloissa voikin muodostua runsaasti nokihiukkasia, jotka ovat pääosin pienhiukkasia ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Arinakattiloiden pienhiukkasia ei kuitenkaan ole tutkittu riittävästi.

Arinakattiloiden pölynerottimena on yleensä käytetty multisyklonia. Myös sähkösuodatin soveltuu arinakattilan pölynerottimeksi. Mitoituksessa on tällöin otettava huomioon palamattomien hiukkasten osuus ja niiden vaikutukset sähkösuodattimen erotuskykyyn ja tuhkan käsittelyyn. Kuitusuodatin ei yleensä sovellu tämäntyyppisten kattiloiden hiukkaserottimeksi, koska savukaasujen mukana tulevat hehkuvat hiukkaset saattavat rikkoa suodatinkankaan hyvinkin nopeasti.

### 3.3.1 Pienpoltto

Pienpolttokattiloiksi voidaan määritellä omakotitalo- ja kiinteistökattilat, joiden tehoalueet ovat muutaman kymmenen tai korkeintaan muutaman sadan kilowatin luokkaa. Arinat ovat useimmiten valurautaisia tai keraamisia kiinteitä tasoarinoita, joiden polttoaineen syöttö tapahtuu käsin, lukuun ottamatta suurempia kiinteistökatiloita, joilla syöttö voi olla mekaaninen (esim. syöttöruuvi).

Käsin syötettävät omakotitalokokoluokan arinakattilat ovat joko ylä- tai alapaloperiaatteella toimivia. Yläpalokattiloihin polttoaine syötetään yleensä kerrallaan tulipesään, jolloin tulipesän olosuhteet vaihtelevat palamisvaiheen mukaan. Syttymisvaiheen aikana palamislämpötila on alhainen ja palaminen epätäydellistä. Pyrolyysivaiheen aikana lämpötila on korkea ja syntyvä savukaasumäärä suuri. Olosuhteiden muutokset näkyvät polton haitallisissa päästöissä, joita usein vielä lisäävät palamis- kaasujen ja ilman huono sekoittuminen. (Maskuniitty 1995).

Alapalokattiloissa palaminen on jatkuvampi prosessi. Polttoainelisäys voidaan suorittaa palamisvyöhykkeen olosuhteisiin merkittävästi vaikuttamatta. Lisäksi primääri-ilma tuodaan polttoainekerroksen läpi, jolloin sekoittuminen on tehokkaampaa aiheuttaen pienemmän primääri-ilman tarpeen. Tällöin ratkaisevaa on sekundääri-ilman riittävä sekoittuminen, mikä edellyttää joko koneellista ilmansyöttöä tai savukaasupuhallinta ja turbulenssia lisääviä rakenteellisia ratkaisuja. (Maskuniitty 1995).

Yläpalokattiloissa ei yleensä ole palamisen tehonsäätöjärjestelmää, jolloin energiataloudellinen käyttö edellyttää energiavaraajan käyttöä. Alapalokattilat sopivat jopa suoraan lämmitykseen ilman energiavaraajaa, sillä niiden polttotehoa voidaan säätää ilmavirtausta kuristamalla. Kuristussäätö lisää kuitenkin palamattomien aineiden päästöjä. (Maskuniitty 1995).

Polttoaineina pienkattiloissa käytetään useimmiten puuta tai palaturvetta. Puun palamisessa tapahtuu kolme päävaihetta: (1) kosteuden poistuminen, (2) pyrolyysi, jota seuraa palaminen ja (3) pinnan hiiltymispalaminen. Yksittäisessä puukappaleessa

nämä kolme prosessia tapahtuvat peräkkäin, mutta palokammiossa kaikkia näitä prosesseja tapahtuu samanaikaisesti. Puussa ei ole suurina pitoisuuksina mitään ainetta, jonka voisi olettaa palaessaan muodostavan ilmaa pilaavia aineita (Hahkala ym. 1986). Puun palamisessa voi kuitenkin muodostua runsaasti pienhiukkasia, jotka ovat lähinnä pieniä nokihiukkasia ( $< 1 \mu\text{m}$ ) sekä alkalipitoisia hiukkasia. Rikki- ja typpipitoisuudet ovat yleensä alle 0,01 ja 0,1 painoprosenttia (Hahkala ym. 1986). Puussa ei ole myöskään myrkyllisiä metalleja, lyijyä tai elohopeaa suuria määriä, mutta pienhiukkasiin rikastuessaan ne voivat olla haitallisia terveydelle. Puutuhka on alkaalista, mikä on otettava huomioon tuhkaa hävitettäessä.

Puun orgaaniset aineet, selluloosa ja ligniini, ovat myrkyttömiä aineita, mutta niiden pyrolyysituotteet sisältävät useita myrkyllisiä aineita kuten aldehydejä, fenoleja, kresoleja ja polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH) (Hahkala ym. 1986). Kaikki nämä yhdisteet pilaavat ilmaa.

Puuta poltettaessa muodostuu haitallisia palamistuotteita, kun pyrolyysikaasu ei pala täysin (kaasu ei kohtaa tarpeeksi kuumaa pintaa, jonka lämpötila olisi yli kaasun syttymislämpötilan) tai kun palaminen on alkuaankin epätäydellistä riittämättömän hapen vuoksi. Molemmat prosessit voivat esiintyä korkeissakin lämpötiloissa. Osa pyrolyysissä syntyneistä yhdisteistä poistuu hiukkasten pinnoille tiivistyneinä ja osa kaasumaisina. (Hahkala ym. 1986).

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt eli PAH-yhdisteet ovat polton yhteydessä tulleet tunnetuiksi lähinnä niiden terveydelle haitallisten ominaisuuksien vuoksi. Eläinkokeissa on mm. todettu PAH-yhdisteitä (esim. bentso(a)pyreeni,  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ) sisältävän kivihillen tervan aiheuttaneen syöpää (karsinogeeninen). Savukaasun PAH-yhdisteet voivat olla peräisin (Huotari & Vesterinen 1995):

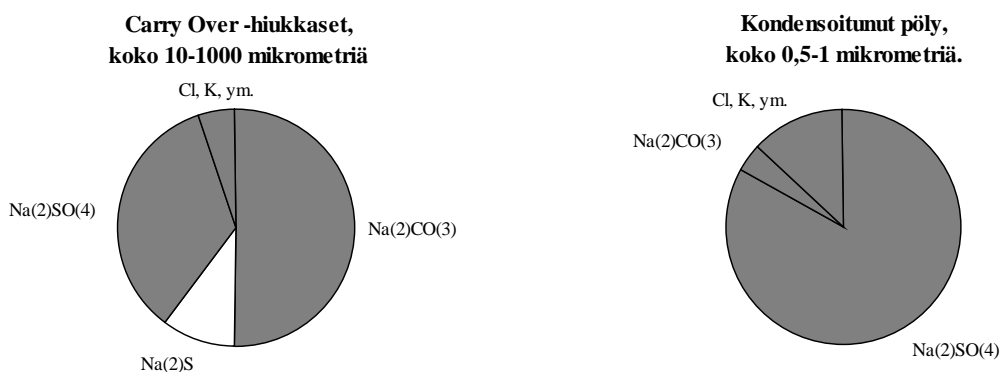
- palamatta jääneistä polttoaineen primääripyrolyysin PAH-yhdisteistä, vaikka polttoaine sellaisenaan ei sisältäisikään näitä yhdisteitä
- polttoaineen sekundääripyrolyysin tuotteista, jotka eivät ole loppuun asti palaneet tulipesässä, tai
- PAH-yhdisteistä, jotka ovat muodostuneet palamisen yhteydessä kevyistä hiilivedyistä.

Merkittävää on, että selluloosan ja ligniinin pyrolyysi ja palaminen synnyttää PAH-yhdisteitä, aldehydejä, ketoneja ja kresoleja jo  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa. Koska puu ei sisällä näitä yhdisteitä, olosuhteilla (hapen sekoittuminen, lämpötila ja puulaatu) on suuri merkitys näiden yhdisteiden muodostumisessa ja vähentämisessä. (Hahkala ym. 1986).

### 3.4 SOODAKATTILAT

Selluteollisuudessa kemikaalien regenerointiin sekä prosessihöyryn ja sähköntuotantoon käytetään soodakattilaa, jossa poltetaan sellun valmistuksessa syntyvä jäteliemi eli mustalipeä. Soodakattilan lämpötila on n. 1 300–1 500 °C. Soodakattilan hiukkaset ovat pääosin mustalipeän sisältämistä natriumin, hiilen ja rikin yhdisteistä muodostuneita (Kauppinen ym. 1994). Kattilaan syötettäessä mustalipeäpisararat kuivuvat nopeasti ja pyrolysoituvat ja paisuvat ennen joutumista sulaan. Osa lipeäpisararoista tempautuu kaasuvirtauksen mukaan muodostaen carry over -hiukkasia, jotka ovat kokoluokkaa 10–1 000 µm. Carry over -hiukkaset muodostavat pääosan tulistikerrostumasta, kun taas savukaasukanavan loppupään pölystä suurin osa on tiivistynyttä pölyä (n. 0,1–1 µm), joten carry over -pöly erottuu savukaasukanavan tuhkasuppiloihin varsin tehokkaasti jo ennen sähkösuodatinta.

Soodakattilan lentotuhka koostuu pääasiallisesti natriumsulfaatista ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Tuhka sisältää myös pienempiä määriä natriumkarbonaattia ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), klooria, kaliumia ja sulfidia. Pölyn tyypilliset koostumukset on esitetty suuntaa antavasti kuvassa 6.

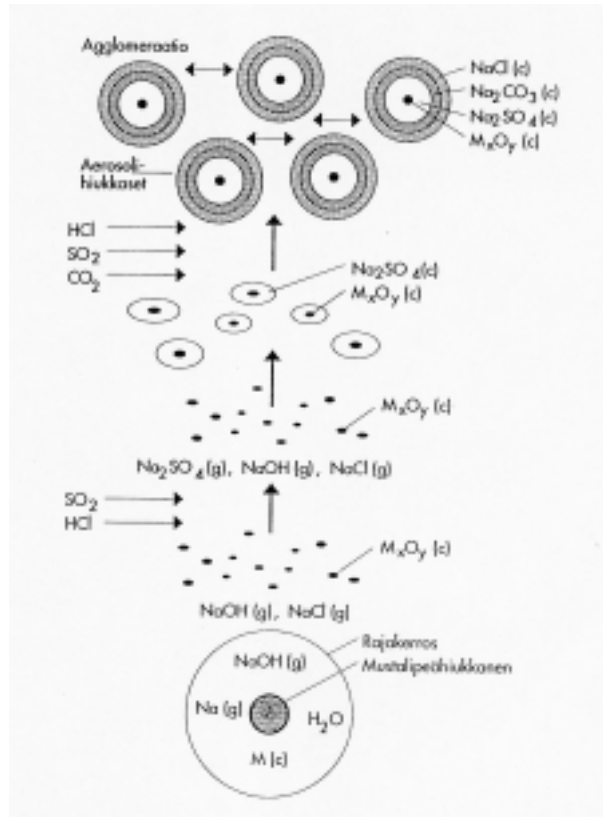


Kuva 6. Soodakattilan lentotuhkan tyypillinen koostumus (Hupa & Hyöty 1995).

Pyrolyysissä mustalipeään orgaanisesti sitoutunut natrium ja kalium muuntuvat pääasiassa karbonaateiksi. Osa carry over -hiukkasten karbonaateista  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ja  $\text{K}_2\text{CO}_3$  hajoaa ja kaasuuntuu korkeassa lämpötilassa. Vapautuvat natrium ja kalium reagoivat vesihöyryn kanssa ja muuntuvat hydroksideiksi ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ) ja klorideiksi ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ). Suuri osa alkalihydroksideista ja klorideista reagoi rikkidioksidin ( $\text{SO}_2$ ) kanssa muodostaen sulfaatteja. Myös osa syötettävästä mustalipeästä peräisin olevasta epäorgaanisesta aineksestä voi kaasuuntua joutuessaan sulaan ja muodostaa pölyä soodakattilassa. (Jokiniemi & Kauppinen 1995).

Mustalipeässä olevasta natriumista n. 10 % kaasuuntuu (Mikkanen ym. 1994a, 1994b). Kaasun jäähtyessä vapautunut natrium reagoi rikin kanssa muodostaen sulfaattia, joka kondensoituu metallioksidoista muodostuneiden tiivistymisydinhiukkasten pinnalle tai tiivistyy suoraan homogeenisen nukleatioprosessin kautta muo-

dostaen uusia sulfaattihiukkasia. Pienet hiukkaset kasvavat natriumin tiivistymisen ja agglomeraation avulla noin yhden mikrometrin kokoisiksi (kuva 7). Mikäli rikkiä ei ole tarpeeksi, natrium muodostaa karbonaatteja ja klorideita. Kalium käyttäytyy kemiallisesti samankaltaisesti kuin natrium. (Jokiniemi & Kauppinen 1995).



Kuva 7. Hienojakoisten alkalisuolahiukkasten muodostuminen soodakattilassa (Jokiniemi & Kauppinen 1995). Kuvan tilanteessa oletetaan, että natriumin käyttäytyminen (vapautuu kaasuvirran hiukkasista) on määrävä tekijä ja että Na:n suolat eivät sekoitu tiivistymisen jälkeen. (M=metalli, M<sub>x</sub>O<sub>y</sub>=metallioksidi, g=kaasu, c=kondensoitunut).

Soodakattilassa muodostuvien hiukkasten kokojakauman pienhiukkasmoodi on noin 1 µm:n kohdalla (Mikkanen ym. 1996). Osa syntyneistä alkalisuolahiukkasista kerrostuu lämmönvaihdinpinnoille aiheuttaen likaantumis-, tukkeutumis- ja syöpymisongelmia, joten soodakattilassa tarvitaan jatkuvaa nuohousta. Soodakattiloiden savukaasuissa on hiukaspölyä 10–15 g/m<sup>3</sup>n ennen pölynerotuslaitteita (Kauppinen ym. 1994), joten tarvitaan tehokkaat puhdistuslaitteet hiukaspäästöjen rajoittamiseen. Soodakattilan kiintoaineen erotukseen soveltuu pölyn ominaisuuksien, suuren pölypitoisuuden sekä suuren savukaasumäärän takia parhaiten sähkösuodatin (Lammi ym. 1993). Soodakattilan sähkösuodattimella on pölypäästöjen pienentämisen ohella toinen tärkeä tehtävä, nimittäin arvokkaiden natriumkemikaalien talteenotto ja syöttäminen takaisin prosessiin. Soodakattilalaitoksessa sähkösuodattimen jälkeen sijoitettavan savukaasupesurin tehtävänä on poistaa savukaasuista kaasumaisia rikkiyhdisteitä ja vielä jäljellä olevaa kiintoainetta sekä valmistaa lämmintä



vettä tehtaan käyttöön. Pesurit ovat yleensä kaksivaiheisia, ensin alkalivaihe rikkiyhdisteiden poistoon ja lopuksi lämmöntalteenotto (Ito). Alkalipesun erotusaste (ks. luku 4) kiintoaineelle on noin 70–90 % ja rikkidioksidille n. 90–95 % (Lammi ym. 1993).

### 3.5 DIESELMOOTTORIT

Ottomoottoreihin verrattuna dieselmoottorien hiilidioksidi- ja hiilivetytitoisuudet pakokaasuissa ovat pienet, mutta hiukkaspitoisuudet korkeat. Yhtenä syynä tähän on se, että dieselmoottorissa polttoaine ruiskutetaan suoraan palotilaan tai apukammioon, kun ottomoottorissa polttoaine sekoittuu ilmaan ennen suihkutusta sylinteriin. Dieselprosessin suuremmat hiukkaspitoisuudet aiheutuvat polttoaineen ja ilman sekoittumisen hitaudesta. (Flagan & Seinfeld 1988).

Dieselmoottorissa polttoaine suihkutetaan palotilaan lähellä puristustahdin loppua suurella paineella suutinreikien kautta siten, että polttoaine hajoaa pieniksi pisaroiksi (muutamien kymmenien mikrometrien luokkaa) ja tunkeutuu syvälle palotilaan. Puristuksen johdosta kuumentunut ilma saa pisarat höyrystymään nopeasti, ja sekoittunut polttoaine/ilmaseos syttyy vallitsevan lämpötilan seurauksena. (Turunen 1995).

Dieselmoottorin polttoaineen tulee olla hyvin itsestään syttyvää (korkea setaaniluku). Polttoaineina käytetään dieselöljyä tai kevyitä polttoöljyä (nopeakäyntiset moottorit, kuten ajoneuvot ja dieselgeneraattorit) ja raskasta polttoöljyä (suuret laiva- ja voimalaitosmoottorit).

Dieselmoottoreiden päästöihin lukeutuvat mm. palamattomat hiilivedyt (bentseeni, PAH-yhdisteet, aldehydit) ja kiintoainehiukkaset. Pääosa hiukkasista on peräisin polttoaineesta, osa voiteluöljystä ja jonkin verran myös moottorin komponenttien kulumisesta. Raskasöljykäyttöisissä dieselmoottoreissa polttoaineen sisältämä tuhka-aines höyrystyy muodostaen pakokaasun jäähtyessä lähes pyöreitä primäärihiukkasia, jotka sisältävät epäorgaanisia aineita ja nokea. Polttoaineesta peräisin olevat epäpuhtaudet ovat pääasiassa vanadiinia, natriumia ja nikkeliä. Lisäksi voiteluöljyn päälisäaineet, kalsium ja sinkki, höyrystyvät sylinterissä ja tiivistyvät pienhiukkasiin polttoöljyn sisältämän rikin kanssa. (Lyyränen ym. 1998).

Autojen ja kevyttä polttoöljyä käyttävien dieselmoottoreiden hiukkaspäästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin ottomoottoreiden, ja ne ovat nykyaikaisessa moottorissa kuitenkin alle 0,5 g/kWh. Pakokaasun näkyvä savu johtuu pääosin juuri hiukkasista. Koska kevyt polttoöljy ei sisällä tuhkaa, muodostuvat hiukkaset lähinnä noesta, johon on adsorboitunut orgaanisia yhdisteitä, sulfaatteja ja vettä. Hiukkaset saavat alkunsa, kun palotilan kuumissa olosuhteissa rikkaan seoksen alueilla syntyy pieniä pallomaisia hiilikertymiä, jotka muodostavat ryppäitä tarttuessaan toisiinsa lämpötilan alentuessa. Nämä ryppäät ovat suuruusluokkaa 0,01...1 µm. Kun lämpötila laskee edelleen, ryppäisiin adsorboituu orgaanisia yhdisteitä. On arvioitu, että 90 % syntyneistä hiukkasista hapettuu ennen poistumistaan palotilasta. Dieselhiukkasten muodostuminen on niin monimutkainen tapahtuma, ettei sen mekanismeja vielä

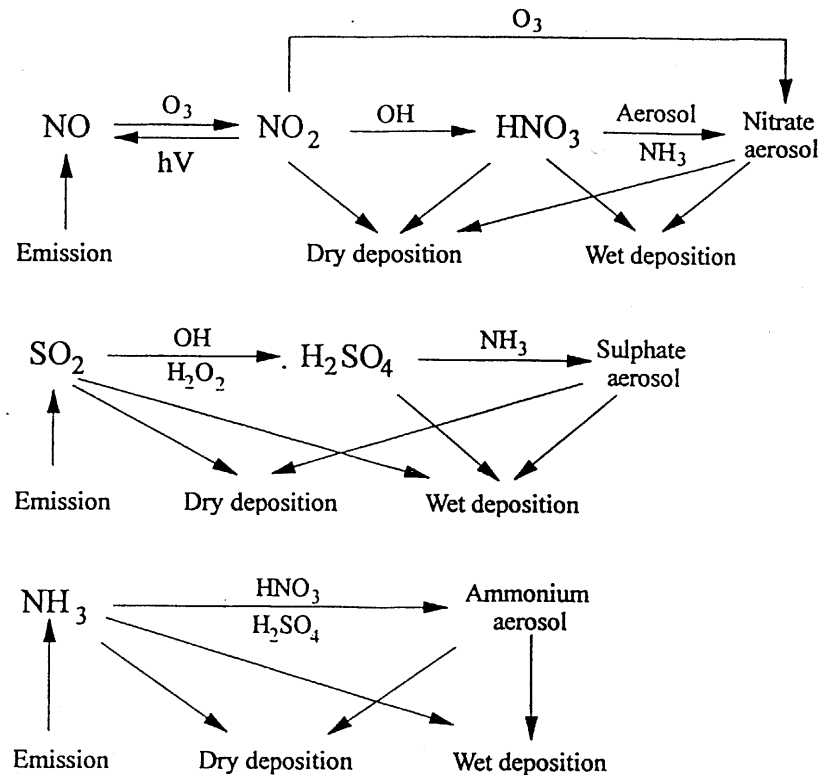
tunneta tarkasti. Hiukkaset sisältävät suuren joukon erilaisia yhdisteitä, joista osa on todettu terveydelle vaaralliseksi, mutta suuri osa on vielä tutkimatta. (Turunen 1995; Ottosson 1996; Jokiniemi 1998).

Suurten raskasöljyä polttavien dieselmootoreiden hiukkasissa esiintyy mm. rikkiä, vanadiinia, natriumia, alumiinia ja silikaattia, joista erityisesti vanadiini (V) on haitallinen päästökomponentti, jota esiintyy kaikessa muussakin raskasöljypoltossa.

Hiukkasten muodostumista voidaan vähentää lisäämällä polttoaineen ruiskutusnopeutta, jolloin polttoaine saadaan nopeammin sylinteriin. Hyvin oleellinen tekijä on myös polttoainesuihkun laatu eli polttoainepisaroiden koko ja suihkun jakautuminen. Hiukkaspäästön alentaminen johtaa usein  $\text{NO}_x$ -päästön lisääntymiseen, joten moottorin suunnittelussa on huolellisesti optimoitava ruiskutusaine, sytytys ja venttiilien ajoitus siten, että sekä  $\text{NO}_x$ - että hiukkaspäästöt ovat samanaikaisesti mahdollisimman pieniä (Laurikko & Kytö 1993).

### 3.6 KAASUMAISTEN PÄÄSTÖKOMPONENTTIEN $\text{SO}_2$ JA $\text{NO}_x$ MUUTUNTA HIUKKASIKSI

Suorien kiintoainepäästöjen lisäksi myös kaasumaisilla rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöillä ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) on huomattava merkitys ilmakehän hiukkaspitoisuuteen. Hiukkaset voivat muuntua ilmakehässä kemiallisesti ja fysikaalisesti. Näissä ilmakehän reaktioissa syntyy myös uusia hiukkasia kaasumaisista aineista. Rikkidioksidi ja typenoksidit reagoivat jonkun muun aineen kanssa muuttuen hiukkasiksi. Tavallisin reaktio molemmille on yhtyminen hydroksyyli-radikaalin kanssa (OH), jolloin syntyy rikki- ja typpihappoa, jotka ilmakehän olosuhteissa tiivistyvät sulfaatti- ja nitraattihiukkasiksi (kuva 8). Lähteessä Bowman ym. (1997) esitetään matemaattinen malli muutunnan kautta syntyville sekundaarisille hiukkasille. Muutuntaan vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, auringonvalon määrä, ilman suhteellinen kosteus ja muiden kemiallisesti reagoivien aineiden pitoisuudet ilmassa (mm. otsoni  $\text{O}_3$ ). Nopeinta hiukkasten muodostuminen kaasusta muuntumalla on lämpimällä, valoisalla ja kostealla säällä. Rikkidioksidin muuntuminen on melko hidasta (tyypillisesti noin 1 % tunnissa). Typenoksidien muuntuminen on olosuhteista riippuen n. 5–10 % tunnissa (Seinfeld 1986). Arviolta noin puolet ilman rikkidioksidista ja typenoksideista muuntuu hiukkasiksi (Karas 1998).



Kuva 8. Ilmakehän muuttunnan kemiallisia reaktioita rikkidioksidille (SO<sub>2</sub>), typenoksideille (NO<sub>x</sub>) ja ammoniakille (NH<sub>3</sub>) (EC 1995).

Kaasumaiset päästöt (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) muodostavat hiukkasia jo savukaasukanavassa. Ilmakehään saapuessaan nämä päästöviuhkan (plume) oksidit alkavat hapettua korkeamman hapetusluvun mukaisiksi yhdisteiksi joko kaasui- tai nestefaasissa. Hapettumisen seurauksena oksideista tulee happamia yhdisteitä, jotka tiivistyvät hiukkasiksi kosteiden ja kuumien savukaasujen jäähtyessä ilmassa. Ilmassa leijuvat hiukkaset törmäilevät toisiinsa muodostaen uusia suurempia hiukkasia. Yksittäisten hiukkasten koko muuttuu ajan kuluessa. Nestemäisille hiukkasille on olemassa olosuhteista riippuva kriittinen koko, jota suuremmille hiukkasille tiiviistyy höyryä ja jota pienemmistä hiukkasista tapahtuu höyrystymistä. Hiukkaset leijuvat ilmassa eripituisia aikoja riippuen lähinnä niiden koosta. Mm. sade poistaa hiukkasia tehokkaasti (märkälasseuma) ja puhdistaa siten ilmaa. (Karas 1998).

Tämän työn tulososassa tutkitaan projektin rajallisten resurssien ja ajan vuoksi kuitenkin vain suoria kiintoainepäästöjä. Hiukaspäästölukuja lukiessa täytyy siis muistaa myös energialaitosten typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöjen vaikutus muuttunnon kautta yhdyskuntailman pienhiukkaspitoisuuteen, sillä näin syntyvät sekundääriset sulfaatti- ja nitraattihiukkaset ovat nimenomaan pienhiukkasia (0,1–1 μm, Turbin & Huntzicker 1995) ja lisäävät näin ollen ihmisten altistusta niiden terveysvaikutuksille. Ilmakehässä muuttunnon kautta syntyviä pienhiukkasia voidaan rajoittaa vähentämällä typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöjä low-NO<sub>x</sub>-polttimien, katalyyttisten typenpoistoyksiköiden (DeNO<sub>x</sub>) ja rikinpoistolaitosten avulla. Suorien kiintoainepäästöjen vähentämistekniikoita käsitellään seuraavassa kappaleessa.

## 4 PIENHIUKKASPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMIS- TEKNIIKAT

Polttotekniikalla pystytään jonkin verran vaikuttamaan suoraan syntyviin päästöihin. Tämä primäärinen rajoittaminen ei kuitenkaan yleensä pelkästään riitä, vaan kattilanjälkeiselle savukaasupuolelle tarvitaan vielä ns. sekundäärisiä päästöjen rajoittamiskeinoja eli savukaasun puhdistuslaitteita täyttämään ympäristölainsäädännön vaatimukset. Näistä on käsitelty seuraavassa ne laitteet, joilla on vaikutusta pienhiukkasten erottumiseen savukaasuista ennen sekoittumista savupiipun kautta ilma-kehään. Hiukkaspäästöjen rajoittamiseksi on annettu valtioneuvoston päätös, joka koskee 1–50 MW:n kattilalaitoksia (taulukko 1).

*Taulukko 1. Uusia 1–50 MW:n kattilalaitoksia koskevat hiukkaspäästöohjearvot.*

Pääasiallinen polttoaine	kattilan polttoaineteho MW	hiukkaspäästö enintään mg/MJ
kotimaiset polttoaineet	$1 < P < 5$ $5 \leq P \leq 50$	200 lasketaan kaavasta: $85 - \frac{4}{3} * (P - 5)$
kivihiili	$1 < P < 5$ $5 \leq P \leq 50$	150 lasketaan kaavasta: $60 - \frac{7}{9} * (P - 5)$
öljy	$1 < P < 3$ $3 \leq P \leq 5$ $5 \leq P \leq 50$	90 60 40

Yli 50 MW:n laitosten hiukkaspäästöille ei vielä ole ohjearvoja, vaan niiden hiukkaspäästöjä pyritään rajoittamaan parhaan käyttökelpoisen tekniikan mukaan, mikä määritetään laitoskohtaisessa lupamenettelyssä ja päätöksenteossa.

Hiukkasten erottamiseksi savukaasuvirrasta käytetään seuraavia laitteita (Pleym 1989):

- dynaamiset erottimet (sedimentaatiokammio, lamellierotin, sykloni)
- sähkösuodattimet
- kuitusuodattimet
- märkäerottimet (pesurit).

Dynaamiset erottimet perustuvat hiukkasiin vaikuttavaan painovoimaan, keskeis- ja hitausvoimiin. Kahden viimeksi mainitun käyttö perustuu niihin voimiin, jotka kohdistuvat hiukkasiin, kun savukaasun kulkusuuntaa muutetaan (sykloni). Hiukkaset pyrkivät vastustamaan suunnanmuutosta, ja ne joutuvat erilleen savukaasusta, johon hitausvoimien vaikutus on heikompi. Sedimentaatiokammio ja lamellierotin ovat painovoimaan ja savukaasun vähäiseen suunnanmuutokseen perustuvia erotinlaitteita, joita käytetään yleensä esipuhdistimina erottamaan runsaasti esiintyvät karkeat ja hehkuvat hiukkaset, jotka voivat haitata savukaasun puhdistusta myöhemmässä vai-

heessa. Varsinaisia pienhiukkasia näillä ei pystytä erottamaan, vaan tällöin tarvitaan tehokkaampia menetelmiä, jollainen dynaamisista erottimista on vain syklonierotin.

Savukaasun puhdistuslaitteista puhuttaessa käytetään termiä *erotusaste* ( $\eta$ ), joka kuvaa puhdistuslaitteen toiminnan tehokkuutta ja mahdollistaa vertailun eri laitteiden välillä. Suodattimen kokonaiserotusaste voidaan esittää yhtälöllä:

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} = 1 - \frac{c}{c_0}, \quad (6)$$

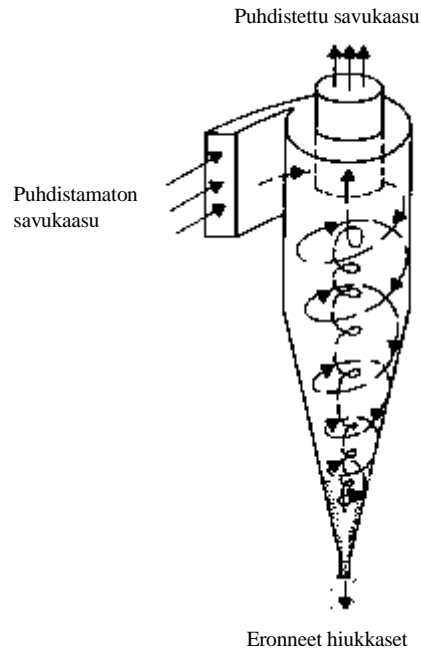
jossa  $c_0$  on suodattimeen tulevien hiukkasten konsentraatio ja  $c$  suodattimen läpäiseiden hiukkasten konsentraatio. Suodattimen kokonaiserotusaste määritetään mitaamalla konsentraatio ennen ja jälkeen erotuslaitteen. Tässä työssä erotusasteella tarkoitetaan aina *kokonaiserotusastetta* hiukkassuodattimeen tulevasta kiintoainemassasta, ellei toisin mainita. Siten esimerkiksi 90 prosentin erotusaste tarkoittaa sitä, että yhdestä kilogrammasta tietyn savukaasumäärän ( $m^3$ ) mukana kulkeutuvasta kiintoainemassasta kyseinen laite pystyy erottamaan 900 g, ja loput 100 g läpäisevät suodattimen ja leviävät savupiipun kautta päästönä ilmaan.

#### 4.1 SYKLONIT

Syklonit ovat keskipakovoimaa hyödyntäviä savukaasun puhdistuslaitteita. Hiukkasiin kohdistuva keskipakovoima aiheutetaan saattamalla kaasuvirtaus pyörivään liikkeeseen esimerkiksi syöttämällä savukaasu tangentialisesti syklonin lieriömäiseen yläosaan (ks. kuva 9), jolloin kaasuvirtaus seuraa seinämän kaareutuvaa muotoa hiukkasten törmätessä hitausvoimien ansiosta syklonin seinämiin. Hiukkaset liukuvat painovoiman vaikutuksesta syklonin alaosan kapenevia seinämiä myöten pohjan aukosta ulos ilmatiiviiseen keräyssäiliöön. Keskipakovoima

$$F_c = \frac{m * v^2}{r} = \frac{\pi * d^3 * \rho * v^2}{6r} \quad (7)$$

on tangentialinopeudella 10 m/s liikkuvaan hiukkaseen n. 20-kertainen painovoimaan verrattuna, kun syklonin säde on 0,5 metriä (Flagan & Seinfeld 1988). Siksi syklonit ovat huomattavasti tehokkaampia hiukkasten erottajia kuin pelkästään painovoimaan perustuvat erotuskammiot. Painovoimaperiaatteella toimivat erotuskeinot eivät sovellu pienhiukkasten erottamiseen savukaasuvirrasta mikronikokoluokan hiukkasten olemattoman massan vuoksi, joten tarvitaan tehokkaampia keinoja, kuten syklonit, mutta erityisesti sähkö- ja kuitusuodattimet sekä pesurit, joita käsitellään jäljempänä.



Kuva 9. Tangentiaalisella sisäänvirtauksella toimiva syklonierotin (Pleym 1989).

Syklonin geometria siis aikaansaa voimakkaan keskipakoisvoimavaikutuksen pyörivän savukaasuvirran hiukkasiin. Hiukkaset kulkeutuvat asteittain lähemmäs syklonin ulkoseinää samalla kun ne virtaavat laitteen läpi. Kaasuvirtaus voi tehdä monta täyttä kierrosta kulkiessaan syklonin päästä päähän. Syklonin mitoituksessa laske-taankin tarvittavien kierrosten lukumäärä tietyn hiukkaskokoluokan halutun erotus-asteen saavuttamiseksi tiedetyllä savukaasuvirtauksella ja syklonin ulko- ja sisähäl-kaisijoilla. (Flagan & Seinfeld 1988).

Eri syklonimallit voidaan erottaa toisistaan sillä, miten kaasuvirtauksen pyörivä liike on aikaansaatua. Yleisimmät syklonityypit ovat vastavirtasyklonit (tangen-tiaalinen ja aksiaalinen sisäänmeno) sekä läpivirtaussyklonit (ei takaisinvirtausta).

Kuvassa 9 on esitetty tangentiaalisella kaasun sisäänantulolla toimiva vastavirtasyklo-ni, jonka yleisin konstruktio on pystysuorassa asennossa oleva syklonirunko. Savu-kaasun tangentiaalisesta sisäänantulosta aiheutuva pyörivä liike kohdistaa hiukkasiin keskipakoisvoiman, joten hiukkaset törmäävät seiniin ja liukuvat painovoiman vai-kutuksesta syklonin pohjalle ja edelleen ilmatiiviiseen säiliöön. Puhdistunut kaasu-virtaus vaihtaa suuntaa syklonin pohjalla muodostaen sisemmän pyörteen, joka nou-see ylös poistuen syklonin yläpään aukon kautta. Aksiaalisessa sisäänantulossa kaasu-virtauksen pyörteinen liike aikaansaadaan kiinteällä siivistöllä syklonin tuloyhteessä. (Flagan & Seinfeld 1988).

Läpivirtaussykloneissa sisempi pyörre poistuu vastakkaisen pään poistoyhteestä eikä vaihda suuntaa kuten vastavirtasykloneissa. Läpivirtaussyklonia käytetään yleensä vaaka-asennossa. Keskipakoisvoima aikaansaadaan tuloyhteen ohjaussiivillä. Tätä syklonityyppiä käytetään esierottimena poistamaan lentotuhka ja suuremmat hiukka-

set. Etuja ovat pieni painehäviö ja soveltuvuus suuriin tilavuusvirtauksiin. (Flagan & Seinfeld 1988).

Syklonin hiukkasten erotustehokkuus paranee, kun hiukkaskoko, hiukkasten tiheys, kaasun sisäänmenonopeus, syklonin rungon pituus (korkeus) ja kaasun kiertämien kierrosten lukumäärä kasvavat sekä seinien sileys lisääntyy. Toisaalta syklonin erotusaste pienenee, kun syklonin halkaisija, kaasun ulostulokanavan halkaisija ja kaasun sisäänmenon pinta-ala kasvavat (Flagan & Seinfeld 1988). Nämä vuorovaikutukset johtuvat mm. siitä, että keskeiskiihtyvyyden on verrannollinen nopeuteen ja kääntäen verrannollinen syklonin säteeseen. Jos syklonin alaosaan imeytyy ilmaa, pienenee erotuskyky huomattavasti (Pleym 1989). Siksi syklonin alapuolinen pölysäiliö on ilmatiivis.

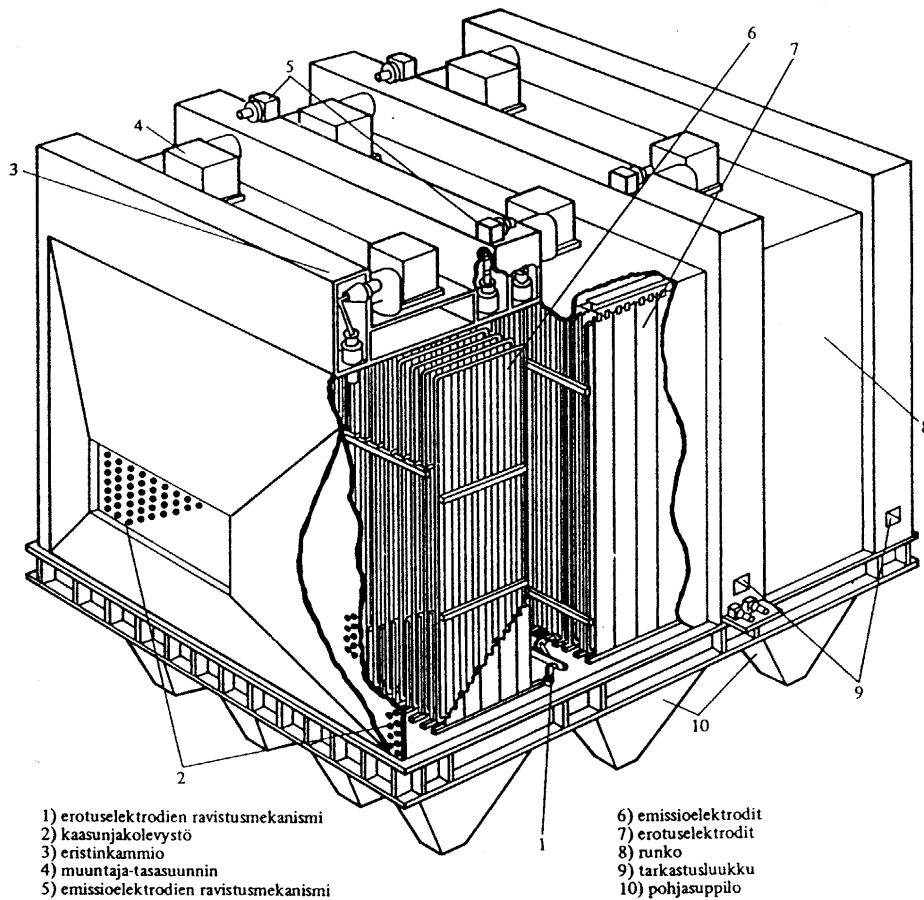
Syklonin suunnittelussa on tehtävä kompromissi erotusasteen, painehäviön ja koon välillä. Paremmat erotusasteet johtavat suurempiin painehäviöihin ja suurempiin korkeuksiin. Lisääntynyt painehäviö vaatii savukaasulta enemmän energiasäilytystä, joten erotusasteen ja käyttökustannusten välillä on taloudellinen riippuvuus. Syklonin painehäviöt ovat luokkaa 250–4 000 Pa. Painehäviön aiheuttavat (1) kaasun laajeneminen sen virratessa syklonikammioon, (2) pyörteisyydestä aiheutuva liikeenergian menetys, (3) seinämien kitkahäviöt ja (4) kaasun poistoaukon poikkipinta-alan supistuminen. Syklonin optimointi on yleensä tehtävä kokeellisesti, koska laskeellisesti optimaalista rakennetta on vaikea löytää. (Flagan & Seinfeld 1988).

Sykloneja valmistetaan monenkokoisia, halkaisijaltaan n. 10 cm:stä useaan metriin. Syklonin erotuskykyä voidaan parantaa asentamalla useita sykloneja rinnakkain siten, että niillä on yhteinen savukaasun tulo ja poisto sekä yhteinen pölynkeruusäiliö. Tällöin savukaasuvirtaus voidaan jakaa useaan halkaisijaltaan pienempään sykloniin, jolloin hiukkasten erotus tehostuu verrattuna yhteen suureen sykloniin. Tällaiset multisyklonit on tavallisesti koottu useammasta 10–30 cm läpimittaisesta yksittäissyklonista. (Pleym 1989).

Syklonit voidaan valmistaa metalleista tai keraameista, jotka kestävät korkeita lämpötiloja, hankaavia hiukkasia ja mahdollisia syövyttäviä olosuhteita. Tärkeää on, että syklonin sisäpinta on riittävän sileä, jotta hiukkaset liukuvat seiniä pitkin pohjäsäiliöön. Sykloneissa ei ole liikkuvia osia, joten käyttö on yksinkertaista ja huoltopaata. Lisäksi pieni pääomakustannus tekee syklonista ihanteellisen esierottimen tehokkaammalle puhdistuslaitteelle, kuten sähkösuodattimelle. Eräät syklonit saavuttavat jopa 98 %:n erotusasteen (massasta) yli 5 µm:n hiukkasille, mutta yleisesti saavutetaan 90 %:n erotusaste yli 15–20 µm:n hiukkasille (Flagan & Seinfeld 1988). Erotuskyky heikkenee voimakkaasti, kun hiukkaskoko alittaa 5 µm. Kun enintään 20 % hiukkasista on alle 5 µm, voidaan multisykloneilla saavuttaa n. 80 %:n kokonaiserotusaste. Mikäli syntyvät hiukkaset ovat pääasiassa pienikokoisia (esim. öljyn poltossa), jää syklonien erotusaste käytännössä noin 50–60 %:n tasolle (Lammi ym. 1993). Osakuormilla savukaasumäärät pienenevät, mikä heikentää syklonin erotuskykyä.

## 4.2 SÄHKÖSUODATIN

Sähkösuodatin (kuva 10) on eniten käytetty hiukkaserotinlaite kiinteitä polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa (esim. hiilipölykattilat), ja se on yleistynyt myös pienemmissä kiinteän polttoaineen vesikattilalaitoksissa. Erona mekaanisiin erotinlaitteisiin on ulkoisen (sähköisen) voiman käyttö hiukkasten erottamiseksi. Etuna sähköisen voiman käyttöönotosta on huomattavasti suuremmat depositionopeudet verrattuna paino- tai hitausvoimien avulla aikaansaatuihin (Hinds 1982).



Kuva 10. Sähkösuodatin (Lammi ym. 1993).

Sähkösuodattimen toiminnan peruseriaate on hiukkasten varaaminen sähköisesti koronavaraajalla, jonka jälkeen voimakkaan sähkökentän vaikutuksesta hiukkaset kerääntyvät vastakkaismerkkisille keräinlevyille, jossa ne vähitellen menettävät varauksensa. Aika ajoin levyt puhdistetaan mekaanisesti, esimerkiksi ravistinvasaroiden avulla, jotta savukaasusta erottuneet hiukkaset eivät pääse muodostamaan liian paksua kerrosta ("pölykakkua") levyjen pinnoille, jolloin seurauksena olisi sähkö-



kentän vaimeneminen ja erotuskyvyn heikkeneminen. Sähkösuodattimella voidaan poistaa myös märkiä pisaroita (ns. märkä sähkösuodatin), jolloin erottunut neste va-  
luu painovoiman vaikutuksesta suodattimen pohjalle, josta se poistetaan (Flagan & Seinfeld 1988). Kiintoaineiden erotuksessa pölyhiukkaset putoavat levyjen ravistuk-  
sen vaikutuksesta pohjasiiloihin, joista ne siilon täytyttyä poistetaan esimerkiksi pai-  
neilmaputkiston kautta säiliöautoihin.

Sähkösuodattimen ominaisuuksia ovat pieni painehäviö, hyvä erotuskyky myös pie-  
nille hiukkasille (alle 1  $\mu\text{m}$ ) ja kyky käsitellä korkeita pölypitoisuuksia (Hinds  
1982). Nykyaikaisilla sähkösuodattimilla saavutetaan päästötaso < 2 mg/MJ, jolloin  
erotustehokkuus on yli 99,95 % (Feldman & Kumar 1993). Sähkösuodattimen ero-  
tusasteen minimi on hiukkaskokoluokassa 0,1–1,0  $\mu\text{m}$ , jossa läpäisy voi olla jopa yli  
10 %, vaikka kaikkien hiukkasten kokonaisuudessaan läpäisy on alle 1 % (esim. Yläta-  
lo ym. 1993). Lämpötilan kohoaminen ja palamattomien hiukkasten osuuden lisään-  
tyminen heikentävät erotuskykyä, samoin vety-, typpi- ja hiilidioksidipitoisuuksien  
nousu. Vesihöyry ja rikin oksidit nostavat sähkösuodattimen erotuskykyä. Hiukkas-  
kokojakauman muutokset eivät sähkösuodattimissa vaikuta yhtä voimakkaasti  
erotuskykyyn kuin sykloneissa. (Lammi ym. 1993).

#### 4.2.1 Koronavaraaja

Hiukkasten varaamiseksi tarvitaan suuri määrä yhdenmerkkisiä varauksensiirtäjiä,  
ioneja. Ionien suuri sähköinen liikkuvuus yhdistettynä keskinäiseen hylkimisvoi-  
maan aiheuttaa ionikonsentraation nopean hajoamisen ja aikaansaa tarpeen tuottaa  
jatkuvasti lisää ioneja riittävän vakaan konsentraation ylläpitämiseksi. Ioneja tuote-  
taan sähköisellä koronapurkauksella, jolla on hyvä ionituottokyky. (Hinds 1982).

Koronapurkaus perustuu tarpeeksi voimakkaan sähkökentän kykyyn aiheuttaa säh-  
köpurkaus eristeväliaineessa. Voimakas sähkökenttä aikaansaadaan asettamalla toi-  
seksi elektrodiksi ohut lanka (varauselektrodi) ja toiseksi tasopinta (keräinelektrodi).  
Kentän geometria aikaansaa riittävän suuren kenttävoimakkuuden ohuen langan ym-  
päristössä, jossa väliaineena toimiva savukaasu muuttuu käytännössä johtavaksi.  
Kenttävoimakkuuden pudotessa kauempana langasta savukaasu muuttuu jälleen  
eristäväksi estäen elektrodilta elektrodille tapahtuvan kaaripurkauksen syntymisen.  
(Flagan & Seinfeld 1988).

Purkaus tapahtuu geometriasta johtuen hallitusti langan läheisyydessä. Korona-alu-  
eella sähkökenttä on tarpeeksi voimakas kiihdyttääkseen ilmassa luonnollisen taust-  
tasäteilyn ansiosta valmiiksi olevia ioneja tarpeeksi suureen nopeuteen, jolloin ionin  
liike-energia riittää ionisoimaan ilmamolekyylin siihen törmätessään. Purkausalueel-  
la tapahtuu vyörymäinen ionisaatioketjureaktio, jossa syntyneet elektronit ja positiiviset  
ionit kulkeutuvat sähkökentän mukaisesti eri suuntiin riippuen koronalangan  
napaisuudesta. Mikäli lanka on negatiivisesti varautunut (voimalaitos-sovellukset)  
levyelektrodiin nähden, kulkeutuvat elektronit pois päin langasta ja liittyvät korona-  
alueen ulkopuolella ilmamolekyyleihin. Tällöin elektronit luovat negatiivisen ioni-  
virran koronalangasta pois päin ja kuljettavat savukaasun negatiivisesti varautuvat

hiukkaset mukanaan keräinlevyille. Positiiviset ionit kulkeutuvat koronalankaan. (Hinds 1982). Käytännössä 80–90 % varautuneista hiukkasista kulkeutuu keräin-elektrodille ja 10–20 % emissioelektrodille (Hulkkonen 1994).

Hiukkasten varautuminen tapahtuu kahdella eri mekanismilla. Nämä ovat kenttävarautuminen ja diffuusiovarautuminen. Kenttävarautumisessa (ns. ionipommituksessa) korona-alueella syntyneiden ionien kulkiessa sähkökentän kenttäviivojen suuntaisesti kohti keräyslevyä ne törmäävät ja kiinnittyvät savukaasun mukana virtaaviin hiukkasiin varaten ne. Kun yksittäinen (lähes) varaukseton hiukkanen saapuu sähkösuodattimeen, taipuvat kenttäviivat kohti hiukkasta aiheuttaen runsaamman ionipommituksen hiukkasta kohti kuin mitä se olisi ionien seuratussa alkuperäisiä kenttäviivojaan elektrodien välillä. Tämä aiheuttaa hiukkasen nopean varautumisen ja pian se alkaa jo hylkiä ioneja, jolloin varautumisnopeus pienenee. Lopulta hiukkanen saavuttaa kyllästysvarauksen, jolloin sen varautuminen loppuu. (Flagan & Seinfeld 1988).

Toinen hiukkasen varautumismekanismi on diffuusiovarautuminen. Siinä hiukkanen saa varauksensa ionien tarttuessa hiukkaseen niiden umpimähkäisen lämpöliikkeen aiheuttamien törmäyksien johdosta. Sekä kenttä- että diffuusiovarautuminen esiintyvät samanaikaisesti hiukkasen saavuttua sähkösuodattimeen, joten niitä pitäisi tarkastella yhdessä. Varautumismekanismit ovat monimutkaisia, joten niitä tarkastellaan yleensä erikseen. Tämä ei kuitenkaan aiheuta merkittävää virhettä, koska on todettu diffuusiovarautumisen olevan hallitsevampi mekanismi halkaisijaltaan alle yhden mikrometrin hiukkasille, kun taas kenttävarautuminen on päämekanismi tätä suuremmille hiukkasille. Sähkösuodattimen suunnittelussa näitä tarkastellaankin toisistaan riippumattomina, jolloin hiukkasen saama kokonaisvaraus lasketaan kummankin erillisen mekanismin aiheuttaman varauksen summana. Mitä suurempi on hiukkasen varaus, sitä nopeammin ja tehokkaammin se erottuu savukaasuvirrasta kiinnittymällä keräyselektrodiin. (Flagan & Seinfeld 1988).

Voimalaitoksissa ja teollisuussovelluksissa (suuret levymäiset sähkösuodattimet) käytetään negatiivista koronavarausta, koska siten päästään suurempaan käyttöjännitteeseen (20–100 kV) ja tehokkaampaan toimintaan. Korona-alueella on tarpeeksi energiaa otsonin (O<sub>3</sub>) muodostumiseen ilman hapesta. Negatiivisella koronalla muodostuu kymmenen kertaa enemmän otsonia kuin positiivisella, joten sisä- ja kierrätysilman puhdistussovelluksien pienissä putkimaisissa sähkösuodattimissa on käytettävä positiivista koronavarausta. (Hinds 1982).

#### **4.2.2 Sähkösuodattimen rakenne ja erotusaste**

Voimalaitosmittakaavan sähkösuodattimet ovat kooltaan massiivisia, mistä aiheutuu suuri tilantarve sekä kalliit investointikustannukset. Hyvä hiukkasten erotuskyky on kuitenkin johtanut sähkösuodattimien laajaan käyttöön. Sähkösuodattimet jaetaan kuuma- ja kylmäpuolisuodattimiin riippuen sijainnista savukaasukanavistossa. Kuumapuolisuodattimet sijaitsevat ennen palamisilman esilämmitintä (luvo), jolloin toimintalämpötila on 320–400 °C. Kylmäpuolisuodatint puolestaan sijaitsee luvon

jälkeen, jolloin lämpötila on 120–150 °C. Voimalaitosprosesseissa vallitsevin sähkösuodatintyyppi on kylmäpuolen levysuodatin. (Hulkkonen 1994).

Sähkösuodatin koostuu erillisistä kentistä. Yleinen kokoonpano on kolmen kentän laite, jossa kaksi ensimmäistä kenttää poistavat n. 95–98 % savukaasun sisältämästä hiukkasmassasta ja viimeinen kenttä vielä varmistaa yli 99 prosentin erotuskykyyn pääsemisen. Savukaasu johdetaan ensimmäiseen kenttään reikälevyn läpi, jolla varmistetaan tasainen virtausjakauma suodattimen poikkipinnalla. Hiukkasten saavuttua sähkösuodattimeen koronapurkauksen ionit varaavat ne edellä kuvatulla tavalla. Sähkösuodattimen erotusastetta ( $\eta_d$ ) voidaan tarkastella Deutschin yhtälön avulla (Hulkkonen 1994):

$$\eta_d = 1 - \exp\left(\frac{-v_M * A}{\dot{V}}\right)^m, \quad (8)$$

missä  $v_M$  on hiukkasten kulkeutumisnopeus elektrodille (m/s), A erotuspinta-ala ( $m^2$ ),  $\dot{V}$  savukaasun tilavuusvirtaus ( $m^3/s$ ) ja m on Matts-Öhnfeldt -kerroin, jonka arvo on 0,4–0,6. Yhtälössä oletetaan, että hiukkaset ovat tasaisesti jakautuneet poikkipinnalle ja että ne varautuvat heti saavuttuaan suodattimeen. Yhtälö ennustaa tehokkuuden muutoksen sähkösuodattimen koon, virtausnopeuden ja  $v_M$ :n funktiona. Savukaasun viipymäajan (yleensä n. 10 s) lisääntyessä eli suodattimen koon kasvessa tai savukaasun virtausnopeuden pienentyessä keräystehokkuus paranee. Samoin käy, kun lisätään hiukkasten varausta (q) tai sähkökentän voimakkuutta (E), jolloin  $v_M$  kasvaa hiukkasiin vaikuttavan erotusvoiman

$$F = qE \quad (9)$$

kasvaessa. Käyttämällä suurta sähkökentän voimakkuutta muodostuu erotusvoima suureksi myös pienillä hiukkasilla. Lisäksi hiukkasten kulkeutumisnopeus elektrodille kasvaa käytetyn jännitetason neliöön verrannollisesti. Sähkökentän voimakkuuden ylärajan määrää sähköinen läpilyönti (spark over). Sähkökentän muodostamiseen käytetään tasajännitettä, ja jännitteen on ainakin ajoittain ylitettävä kriittinen jännitetaso, jolloin muodostuu paikallinen koronapurkaus. Yleisesti käytetty jännitetaso on 50–80 kV, mikä riippuu prosessista sekä emissio- ja erotuselektrodien välisestä etäisyydestä. Kenttävoimakkuus on yleensä 4–5 kV/cm, jolloin yhden mikrometrin hiukkaseen kohdistuva erotusvoima on n. 3 000-kertainen painovoimaan verrattuna. (Riionheimo 1978).

Sähkösuodattimen painehäviö on varsin pieni, ja sen suuruutta voidaan arvioida kaasun virtausnopeuden ja levyjen välisen etäisyyden avulla. Tyypillisesti painehäviö on alle 150 Pa. Virtausnopeus on yleensä 1–2 m/s ja levyjen välinen etäisyys 20–30 cm, jolloin virtauksen Reynoldsin luku on luokkaa  $10^4$ .

### 4.2.3 Mitoitus ja erityispiirteet

Sähkösuodattimen erotusaste riippuu voimakkaasti emissioelektrodilta irtoavasta elektroni- eli sähkövirrasta. Tätä kuvataan ominaisvirrankulutuksena suodatinpinta-alaa kohden, joka on luokkaa 0,3–0,6 mA/m<sup>2</sup>. Sähköinen läpilyönti estää suurentamasta ominaisvirrankulutusta. Läpilyönti voi tapahtua joko emissioelektrodien ja keräinlevyn välillä tai keräinlevylle kerääntyneen pölykerroksen läpi. Molemmissa tapauksissa läpilyöntialttius riippuu kaasun dielektrisyyslujuudesta (läpilyöntikestävydestä), joka puolestaan riippuu kaasun lämpötilasta, koostumuksesta ja pölyn ominaisvastuksesta. Lämpötilan kohoaminen pienentää dielektrisyyslujuutta, jolloin läpilyöntijänniteraja alenee. Tästä seuraa matalampi koronavirta ja erotuskyvyn heikkeneminen. (Riionheimo 1978).

Savukaasun vesihöyrypitoisuus ja rikin oksidit vaikuttavat sähkösuodattimen jännite-virtakorrelaatioon sekä pölyn ominaisvastukseen. Vesihöyryionit nostavat alhaisemman liikkuvuutensa ansiosta kaasun dielektrisyyslujuutta ja siten myös koronavirtaa ja suodattimen erotusastetta. Esimerkiksi kivihiilen suuri rikkipitoisuus alentaa lentotuhkan resistiivisyyttä (Bickelhaupt 1975). Pieni osa rikkidioksidista hapettuu SO<sub>3</sub>:ksi, joka yhdessä hiukkasten pinnan vesikerrosten kanssa muodostaa johtavan rikkihappokerroksen (Wang ym.1988), mikä nostaa erotetun pölykerroksen kokonaisjohtokykyä. Sähkösuodattimen toiminta heikkenee, mikäli kivihiilen rikkipitoisuus on liian alhainen (Meij ym. 1986). Silloin ratkaisevinta on tiettyjen yhdisteiden, esimerkiksi tuhkan alkalimetallien, määrä. Natrium-, kalium- ja litiumionit toimivat varauksenkantajina keräyslevyjen lentotuhkakerroksissa. Jos rikkipitoisuus on alle 0,6 %, niin sähkösuodattimen toiminta menee kriittiseksi, kun Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O yhteispitoisuus jää alle 1–1,5 %:n (Meij ym. 1986).

Kaasun virtausnopeus sähkösuodattimessa on 1–2 m/s, koska pienillä virtausnopeuksilla (< 0,8 m/s) ei ole todettu erotusastetta parantavia vaikutuksia. Lisäksi pienillä virtausnopeuksilla suodattimen dimensiot kasvavat (tarvitaan lisää poikkipinta-alaa saman savukaasumäärän käsittelemiseksi). Suuremmilla nopeuksilla (> 2–3 m/s) erotusaste puolestaan laskee merkittävästi, koska tällöin osa erotetuista hiukkasista tempautuu kaasuvirran mukaan elektrodien pinnalta. (Hulkkonen 1994).

Tärkein sähkösuodattimen mitoitukseen vaikuttavista tekijöistä on lentotuhkan ominaisvastus eli resistiivisyys. Hiukkasilla on oltava sopiva ominaisvastus, jotta ne voidaan kerätä sähkösuodattimessa. Jos ominaisvastus on liian pieni, hiukkanen menettää keräinlevyn saavutettuaan sähköisen varauksensa nopeasti, jolloin se voi helposti tempautua takaisin kaasuvirtaan. Tällöin ainoa mahdollisuus kerätä hiukkasia on märän sähkösuodattimen käyttö. Näissä keräinelektrodin pintaa huuhdellaan jatkuvasti vedellä, jolloin hiukkanen tarttuu vesikalvoon ja huuhtoutuu pölyn keruu-altaaseen. Jos taas ominaisvastus on liian suuri, virran kulkeminen keräinlevylle estyy kertyneen pölykerroksen läpi ja suodattimen sähköinen toiminta häiriintyy. Pölykerroksen yli syntyy jännite, joka voi olla niin suuri, että se aiheuttaa koronapurkauksen pölykerroksen sisällä, jolloin pölykerros hajoaa ja leviää takaisin kaasuvirtaan. Lisäksi saattaa tuhkan poistaminen keräinlevyn pinnalta olla vaikeaa.

Tuhka voidaan jakaa ominaisvastuksensa mukaan seuraaviin ryhmiin (Hulkkonen 1994):

$10^4-10^7$	ohm-cm	Sähköisesti hyvin johtavaa tuhkaa, jota on vaikea saada pysymään keräinlevyn pinnalla.
$10^{10}-10^{11}$	ohm-cm	Sähkösuodattimen toiminnan kannalta edullisin alue.
yli $10^{13}$	ohm-cm	Kerrostumien poistaminen elektrodien pinnalta vaikeaa.

Tuhkan ominaisvastuksen pienentämiseksi on kokeiltu mm. veden ja vesihöyryn, rikkiatrioksidin, rikkihapon ja ammoniakkin ruiskuttamista kaasuvirtaan. Muita keinoja vaikuttaa sähkösuodattimen toimintaan on pyrkimys pienentää kaasun tilavuusvirtaa, lisätä sähkökentän intensiteettiä tai suurentaa hiukkasten kokoa lisäämällä niiden agglomeroitavuutta (Hulkkonen 1994). Lisäksi on tutkittu ns. pulsing-menetelmää, jossa sähkösuodattimen sähkökenttä toimii jaksottaisesti. Savukaasun kostuttaminen vedellä yhdessä pulsing-menetelmän kanssa poistaa ultrapienet hiukkaset (aerodynaaminen halkaisija 0,02–0,1  $\mu\text{m}$ ) kolmasosaan kuivaan staattiseen sähkökenttään verrattuna (Schleicher & Kauppinen 1998). Tämä on seurausta kostealla pulsing-menetelmällä saavutettavasta hiukkasten korkeammasta varauksesta.

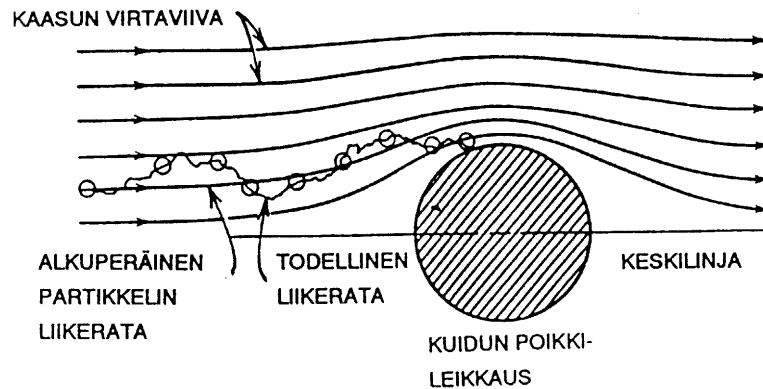
### 4.3 KUITUSUODATTIMET

Kuitusuodattimen käyttö on yleistynyt tapauksissa, joissa päästörajoitukset ovat erityisen tiukat, tai jos erotettavan pölyn ominaisuuksien vuoksi sähkösuodattimesta tulisi poikkeuksellisen kallis. Suodattimen materiaalista ja konstruktiosta riippuen puhutaan kuitupatjoista (fibrous beds), tiiviistä patjoista (packed beds) ja kudotuista kankaista (fabrics) (Flagan & Seinfeld 1988). Viimeksi mainittu kangassuodatin (fabric filter) on yleisin kuitusuodatintyyppi voimalaitoksissa, joten tässä yhteydessä kuitusuodattimia käsiteltäessä tarkoitetaan nimenomaan kangassuodatinta.

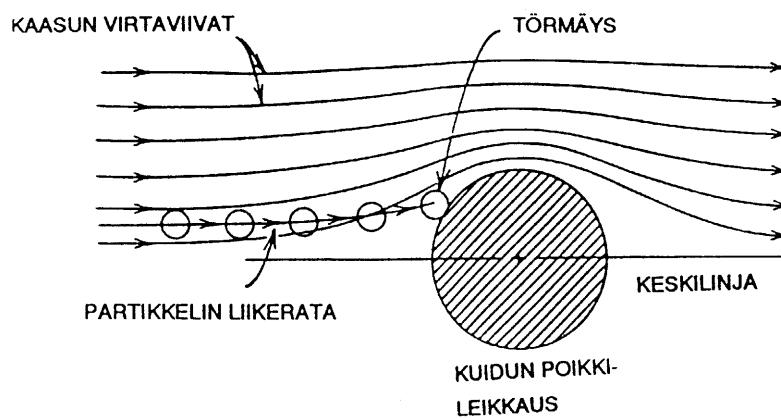


Kuva 11. Kuitusuodattimen yksittäisiä kuituja (Hinds 1982).

Kangassuodattimessa savukaasu kulkee erilaisista materiaaleista kudotun tekstiilikankaan läpi. Suodattimen kuitumateriaali on huokoista ainetta (pääosin ilmaa, kuitujen osuus suodattimen tilavuudesta 5–30 %, kuva 11), joka pidättää hiukkasaineksen päästäten puhdistuneen savukaasun läpi. Hiukkasten erotus kuitusuodattimessa perustuu hitausvoiman (kuva 12), pidätyksen (interseptio) ja diffuusion (kuva 13) vaikutukseen. Lisäksi sähköiset voimat vaikuttavat erottumiseen. Kuitusuodatin on ns. törmäyssuodatin eli kuituun törmäävä hiukkanen erottuu savukaasuvirtauksesta (pidätys- eli siivilöintivaikutus). Pidätyksessä hiukkasen oletetaan jäävän keräilypintaan, kun virtaviivan etäisyys pinnasta on pienempi kuin hiukkasen halkaisija. Suurilla hiukkasilla ( $> 1 \mu\text{m}$ ) tärkein erotustekijä on hitausvoima ja pidätys, kun se pienillä hiukkasilla ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ) on diffuusio. Sähköisten voimien vaikutus on suurinta  $0,01\text{--}5 \mu\text{m}$ :n hiukkasilla. (Flagan & Seinfeld 1988). Kangassuodattimen suodatusvaikutus johtuu suodattimen pinnalle kertyneen pölykerroksen pidätysvaikutuksesta, ts. aluksi uuden, puhtaan suodattimen erotusaste on huono kunnes sen pinnalle on kertynyt riittävä määrä hiukkasia (Hinds 1982).



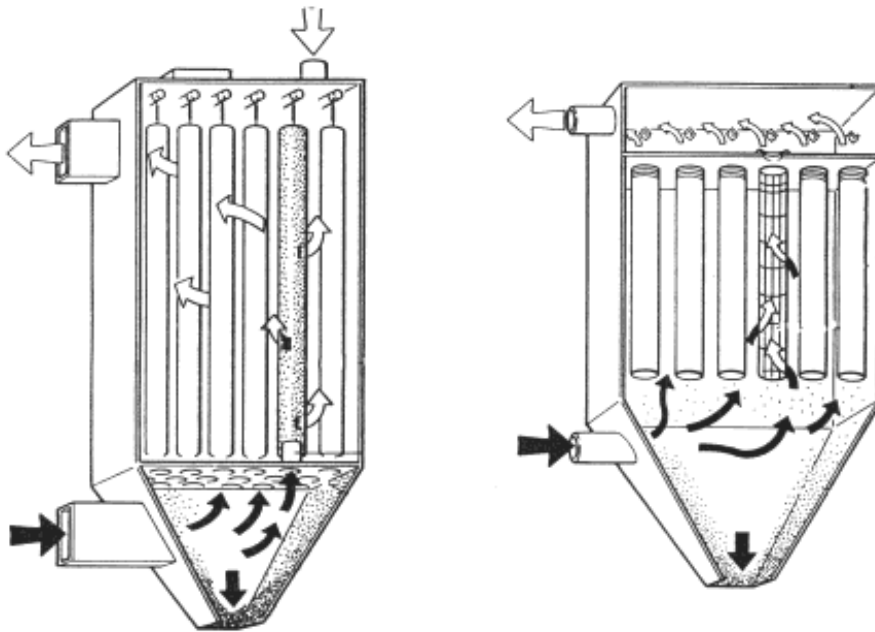
Kuva 12. Hiukkasen erottuminen hitausvoiman vaikutuksesta (Hinds 1982).



Kuva 13. Hiukkasten erottuminen diffuusion vaikutuksesta (Hinds 1982).

Varsinkin pienissä laitoksissa hiukkaspäästöt on puhdistettu kuitusuodattimilla, koska menetelmä on yksinkertainen ja edullinen sähkösuodattimeen verrattuna. Matalilla pölykonsentraatioilla kuitusuodattimet ovat taloudellisin tapa saavuttaa korkea keräystehokkuus pienhiukkasille (Hinds 1982). Kuitusuodattimien ongelmina ovat korkeissa lämpötiloissa tarvittavat kalliit kuitumateriaalit, painehäviöstä aiheutuva suuri energiankulutus sekä laitteiston huollon tarve.

Voimalaitosten kangassuodattimet ovat ns. letkusuodattimia (tai pussisuodatin, kuva 14). Kuitusuodatinelementti eli letku on tavallisesti pitkä, ontto sylinterimäinen putkilo, koska tällöin saadaan suuri suodatinpinta-ala savukaasun tilavuusvirtausta kohti. Kaasun nopeus suodatinmateriaalin läpi (pintanopeus) on yleensä 3–10 cm/s. Käytettävä pintanopeus määrää laitteen kapasiteetin eli suodattimen koon. Suodatin kokonaisuus (bag house) koostuu suuresta määrästä letkuja, jotka on järjestetty rinnakkaisiin riveihin ja jaettu erillisiin blokkeihin. Halkaisijaltaan yleensä 12–40 cm:n kokoisia ja korkeudeltaan yleensä 3–10 metrin letkuja voi olla jopa tuhansia, joten voimalaitosmittakaavassa myös kuitusuodattimet alapuolisine keräyssiiloineen vaativat runsaasti tilaa. Letkujen määrä riippuu niiden koosta, vaadittavasta suodatuskapasiteetista (savukaasun määrä, haluttu erotusaste) sekä lisäksi ylimääräisestä yksiköstä, joka sallii yhden yksikön erottamisen käynninaikaisen puhdistuksen ajaksi. (El-Wakil 1984).



Kuva 14. Voimalaitoksen letkusuodatin (Lammi ym. 1993).

Käytön aikana letkusuodattimen pinnalle kertyy paksu pölykerros, josta osa on poistettava tietyin väliajoin, jotta painehäviö ei kasva liian suureksi. Puhdistettavan kamion kaasuvirta suljetaan, jonka jälkeen letkun puhdistaminen toteutetaan ravistamalla tai vastakkaiseen virtaussuuntaan kohdistetulla virtauksella tai painepulssilla.

Tällöin irrotetaan suurin osa (ei kokonaan, jottei siivilöintivaikutus huonone) pölykerroksesta, joka putoaa laitteen pohjasiiloon. Tämän jälkeen kaasuvirtaus päästetään jälleen suodattimeen. (Hinds 1982).

Kuitusuodattimen erotusaste ( $\eta \cong \eta(\text{hitaus}) + \eta(\text{pidätys}) + \eta(\text{diffuusio})$ ) on yleensä korkea, lähes 100 % kaikenkokoisille hiukkasille. Toiminta-alue ulottuu jopa 0,01  $\mu\text{m}$ :n pölyhiukkasiin saakka (Lammi ym. 1993). Erotusasteen minimikohta teoreettisen tarkastelun perusteella on 0,1–1,0  $\mu\text{m}$ :n välissä (Flagan & Seinfeld 1988). Tällöin hiukkasten koon suurenessa diffuusion vaikutus heikkenee, mutta hitausvoiman ja pidätyksen vaikutus on vielä melko heikko. Nykytiedon valossa juuri tämänkokoisten pienhiukkasten arvellaan olevan terveydelle haitallisimpia eli kuitusuodattimien ongelma on sama kuin sähkösuodattimissa: erotusasteen minimi on juuri haitallisella pienhiukkasalueella. Uusilla kuitusuodattimilla päästään sähkösuodattimen tavoin alle 2 mg/MJ päästötasoon erotusasteen ollessa yli 99,95 % (Feldman & Kumar 1993).

Kuitumateriaali voi pilaantua korkean lämpötilan, palamisen, kerrostumisen, eroosion, kemiallisten reaktioiden ja ikääntymisen vaikutuksesta. Lukuisia eri kuitumateriaaleja on käytetty savukaasun koostumuksesta, kosteudesta ja lämpötilasta sekä hiukkasten tyypistä riippuen. Näitä materiaaleja ovat luonnonkuidut ja tekokuidut, kuten villa, puuvilla, nylon, lasikuitu, polyesterit ja aromaattiset polyamidit (Hinds 1982). Villa ja puuvilla eivät siedä korkeita lämpötiloja (< n. 100 °C), kun taas lasikuituja voidaan käyttää aina 290 °C:seen saakka. Kuitusuodatinyksikkö sijoitetaan usein palamisilman esilämmittimen jälkeen, missä savukaasun lämpötila on n. 150 °C tai enemmän. Korkeat lämpötilat merkitsevät myös suuria tilavuusvirtauksia kuituelementtien läpi. Toisaalta savukaasu ei saa jäähtyä kastepistelämpötilaan, koska vesihöyryn tiivistyminen ei ole sallittua kuitusuodattimissa. (El-Wakil 1984). Korkealämpötilasovelluksissa materiaalina käytetään keraamisia kuituja, jotka kestävät yli 1 000 °C:n lämpötiloja. Kuitusuodattimet voidaan tehdä myös metallikuiduista. Kuitujen halkaisija luonnonkuiduilla on 50–150  $\mu\text{m}$ , mutta keraamisilla tai metallikuiduilla se voi olla jopa 3  $\mu\text{m}$ .

Kemiallisten reaktioiden aiheuttama kuitumateriaalin pilaantuminen on erityisen vakavaa rikkipitoista hiiltä poltettaessa. Nykyään siirtyminen korkean tuhkapitoisuuden omaaviin matalarikkisiin hiiliin aikaansaa sen, että kuitusuodatin on entistä houkuttelevampi vaihtoehto verrattuna esimerkiksi sähkösuodattimeen, sillä kuitusuodattimen toiminta ei ole yhtä riippuvaista polttoaineen tai savukaasun ominaisuuksista eikä kriittisiä suunnitteluparametreja ole yhtä paljon. (El-Wakil 1984).

Kuitusuodatin on suurissa voimalaitosyksiköissä investointikustannuksiltaan samaa luokkaa kuin sähkösuodatin, mutta sen käyttö vaatii huomattavasti enemmän tarkkuutta. Varsinkin ylös- ja alasajotilanteissa sekä käyttökatojen aikana tarvitaan erityisjärjestelyjä (esim. ohituskanavat, suodattimen lämmitys). Huoltokustannuksia aiheuttaa myös suodatinletkujen vaihto, joka tyypillisesti tehdään muutaman vuoden välein.



## 4.4 MÄRKÄPESURIT

Pesurit voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: (1) märkäkemiallisen rikinpoiston pesurit, (2) teollisuuden lämmöntalteenotto pesurit (esim. soodakattilan jälkeen) ja (3) hiukkasten poistoon tarkoitettut pesurit. Rikinpoiston pesureita edeltää hiukkasten erotuslaite, yleensä sähkösuodatin, joten tämän pesurityypin merkitys hiukkasten poistossa ei ole kovin merkittävä. Lämmöntalteenotto pesurit ja hiukkasten poistoon tarkoitettut pesurit ovat Suomen energiantuotannossa harvinaisia.

Suomessa rikinpoistoon käytettävät märkäkemialliset pesurit ovat suihkutorneja ja täytepalapesureita. Ensin mainittu ryhmä käsittää pesutornit ja venturipesurit, joihin tässä yhteydessä keskitytään (ns. ruiskupesurit tai märkäpesurit). Toisen ryhmän pesurit ovat torneja, joissa on törmäyslevyjä tai ne on täytetty osaksi erilaisilla kosketuspintaa lisäävillä välikappaleilla, jotka mahdollistavat myös liukenevien kaasumaisten saasteosien absorptioon pesunesteeseen (absorptiotornit). (Flagan & Seinfeld 1988; Pley 1989).

Märkäpesurit (ruiskupesurit, spray scrubbers) jaotellaan edelleen kahteen luokkaan. Ensimmäinen ryhmä käsittää märkäpesurit, joissa pisaroiden muodostuminen ja ruiskutus toteutetaan hajotussuuttimilla. Näitä pesutorneja ovat (Flagan & Seinfeld 1988):

- *vastavirtaperiaatteiset painovoimatornit*, joissa pisarat putoavat maan vetovoiman vaikutuksesta pystysuoraan nousevaa kaasuvirtaa vastaan
- *poikittaisvirtaustornit*, joissa pisarat putoavat vaakasuoran kaasuvirran läpi
- *myötävirtatornit*, joissa pesunestepisaroiden ruiskutus sekä savukaasuvirta ovat horisontaalisia ja samansuuntaisia.

Toinen ryhmä koostuu märkäpesureista, joissa pisaroiden muodostus toteutetaan suurinopeuksisen savukaasuvirran avulla ilman hajotussuuttimia. Näitä märkäpesureita kutsutaan venturipesureiksi, koska kaasuvirran suuri nopeus aikaansaadaan venturiputkessa.

Märkäpesureissa savukaasussa olevat hiukkaset tarttuvat nestepisaroihin ja jäävät pesurissa kiertävään nesteeseen. Toimintaperiaatteena on aikaansaada tehokas kosketus pölyhiukkasten ja vesipisaroiden välille. Hiukkasten törmätessä vesipisaroihin hiukkaset huuhtoutuvat pois savukaasuvirrasta. Pesunestevirta hajotetaan pesutornin suuttimissa halkaisijaltaan n. 0,1–1,0 mm:n kokoisiksi pisaroiksi (tai venturiputkessa suurinopeuksisen savukaasuvirran avulla sumuksi) ja ruiskutetaan savukaasuvirran sekaan, jolloin pisarat joutuvat alttiiksi hiukkasten törmäyksille. Erotustehokkuuden kannalta tärkeää on pesupisaroiden ja savukaasun hiukkasten välinen suhteellinen liike. Hiukkasten sidonta perustuu törmäykseen sekä suoraan pidätykseen (kiinnittyminen pisaran pintaan). Pienimmillä hiukkasilla myös diffuusio on tärkeä erotustekijä. (Flagan & Seinfeld 1988).

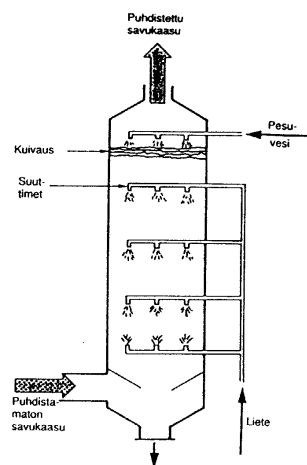
Peseminen (scrubbing) on tehokas tapa poistaa savukaasun hiukkaset ja mahdollistaa siis myös liukenevien kaasujen samanaikaisen poistamisen (absorptio). Eri märkäpesurityyppien laaja kirjo on merkittävä etu, ja se mahdollistaa sopivan laitteen valinnan tapauskohtaiseen hiukkaspuhdistusongelmaan. Pesurien haittapuolina ovat paljon energiaa kuluttavat suuret painehäviöt sekä kiintoainepitoinen jätevesi, jota muodostuu runsaasti ja joka vaatii tehokkaan vedenkäsittelylaitoksen. Tätä ongelmaa ei kuivilla puhdistusmenetelmillä synny. (Flagan & Seinfeld 1988).

Oikein mitoitetulla pesurilla päästään 90–99 %:n kokonaiserotusasteeseen. Tehokkaimmilla pesurityypeillä voidaan hyvissä olosuhteissa saavuttaa 95–99 %:n erotustehokkuuksia ja alin hyvin erottuva hiukkaskoko on alle 1  $\mu\text{m}$  (Lammi ym. 1993). Aivan pienimpien hiukkasten tehokkaaseen poistoon pesurit eivät pysty. Päinvastoin näyttäisi siltä, että pesureissa syntyisi uusia pienhiukkasia (Moisio 1997).

Pesurin hankinnassa ratkaisevat yleensä lämmön ja kemikaalien talteenotosta saata- vat säästöt. Hankinta- ja käyttökustannukset ovat tapauskohtaisia, esimerkiksi soodakattilan pesuri on osa sellutehtaan prosessia eikä sen kustannusten tarkastelu yksittäisenä komponenttina ole mielekäästä.

#### 4.4.1 Pesutorni

Yksinkertaisin märkäpesuri on pesutorni (kuva 15). Pesutorni on ns. matalaenergiapesuri, jonka hiukkasten keräystehokkuus on alhaisempi kuin korkeaenergiapesureiden (esim. venturipesuri). Pesuneste ruiskutetaan suuttimien kautta joko myötä- tai vastavirtaan savukaasun sekaan. Pesutornin pisarat ovat yleensä 500–1 000  $\mu\text{m}$ :n kokoisia ja ne erottavat parhaiten halkaisijaltaan yli 10–25  $\mu\text{m}$  hiukkasia. Erotusalue voidaan laajentaa kahteen mikrometriin saakka kasvattamalla pesunesteen tuloaukon suuttimen painetta, jolloin muodostuvat pisarat ovat pienempiä. Suurin keräystehokkuus saavutetaan pienillä pisaroilla ja mahdollisimman suurilla pisaroiden ja hiukkasten nopeuseroilla.

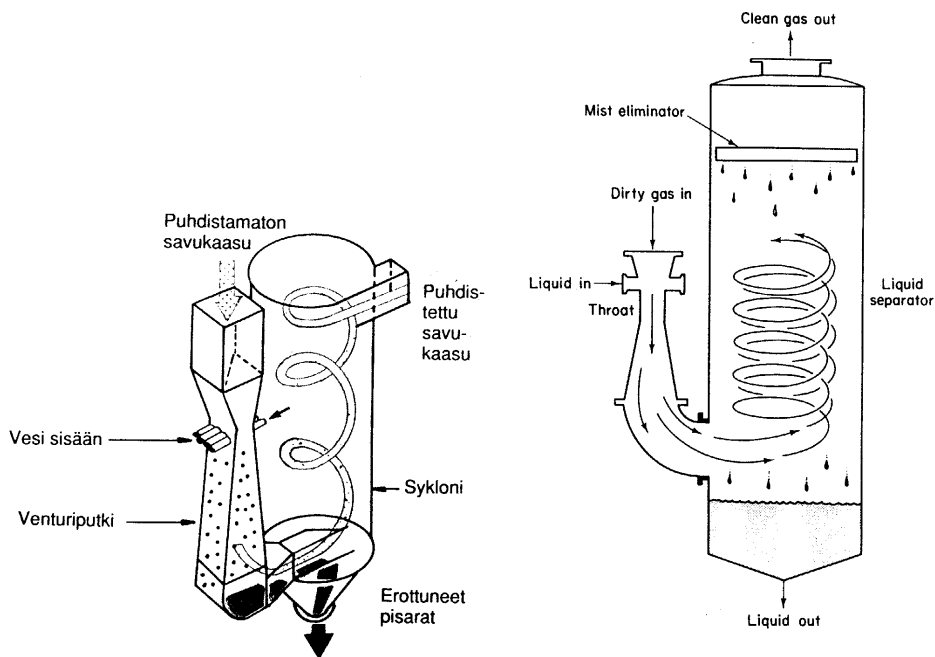


Kuva 15. Pesutorni (Pleym 1989).

Nesteen ja kaasun paremman kosketuksen aikaansaamiseksi voidaan kosketuspintaa lisätä täytekappaleilla, jotka ovat erilaisia muovikappaleita, keraamisia renkaita, aalotettuja levykappaleita jne. (Pleym 1989).

#### 4.4.2 Venturipesuri

Tehokkain märkäpesurityyppi hiukkaserotuksen kannalta on venturipesuri (kuva 16). Savukaasu johdetaan venturiputkeen, jossa on suppilomainen kavennus, jonka kautta kulkiessaan savukaasun nopeus kasvaa merkittävästi. Venturiputken kapeimpaan kohtaan, jossa kaasun nopeus on 30–130 m/s, ruiskutetaan vettä (Pleym 1989). Vesi jakautuu sumuksi, jolloin saadaan hyvä kosketus savukaasun ja veden kesken. Tämän jälkeen putki laajenee (diffuusoriossa), jolloin savukaasun nopeus hidastuu (viipymäaika pesurissa pitenee). Vesipisaroihin törmänneet hiukkaset erottuvat savukaasuvirrasta pudoten pesurin pohjalle. Sieltä kiintoainepitoinen vesi pumpataan puhdistettavaksi ja edelleen takaisin kiertoon (pesuriin ruiskutettavaksi).



Kuva 16. Venturipesuri (Pleym 1989; Flagan & Seinfeld 1988).

Märkäpesurissa tapahtuvan erotuksen tärkein vaihe on siis savukaasun hiukkasten ja nestepisaroiden törmäys ja kiinnittyminen toisiinsa. Tavallisessa pesutornissa hiukkasten kiinnittymisen todennäköisyys riippuu mm. pisaroiden putoamisnopeuden ja kaasuvirran nopeuden suhteesta. Erotuskyky kasvaa, kun vesipisarat ovat pieniä (halkaisija 0,5–1 mm) ja niiden nopeus savukaasun hiukkasten nopeuteen verrattuna suuri. Erotuskyky kasvaa edelleen, mikäli samanaikaisesti saadaan vesihöyry tiivistymään hiukkasten pinnalle. Venturipesurissa näin tapahtuukin, joten sen erotuskyky on paljon parempi kuin pesutornin. (Pleym 1989).

## 4.5 YHTEENVETO PIENHIUKKASPÄÄSTÖJEN PUHDISTUSLAITTEISTA

Taulukossa 2 on esitetty kootusti edellä käsitellyt pienhiukkaspäästöjen sekundääriset rajoittamiskeinot savukaasun puhdistuslaitteilla.

Taulukko 2. Pienhiukkaspäästöjen rajoittamismenetelmät (Flagan & Seinfeld 1988).

Laite	Minimi hiukkas-koko ( $\mu\text{m}$ )	Erotusaste (% hiukkas-massasta)	Etuja	Haittoja
Painovoima-erotinkammio	>50	<50	pieni painehäviö, suunnittelun ja huollon yksinkertaisuus	tilaa vievä, huono keräystehokkuus, ei erota pienhiukkasia
Syklonit	5–25	50–90	yksinkertaisuus, vähän lattia-alaa vievä, pieni/kohtuullinen painehäviö, jatkuva kuiva kerättyjen hiukkasten poisto, toimii suurilla pölypitoisuuksilla, poistaa suuret hiukkaset, lämpötilariippumaton	korkeussuunnassa tilaa vievä, pieni keräystehokkuus pienille hiukkasille, herkkä vaihteleville pölykuormille ja virtausnopeuksille
Pesurit:				
Pesutornit	>10	<80	yhäaikainen kaasumaisten ja hiukkasmaisten päästöjen poisto, kyky jäähdyttää ja puhdistaa korkealämpötilaiset	korroosio- ja eroosio-ongelmat, lisääntyneet jäteveden
Syklonipesurit	>2,5	<80	jäähdyttää ja puhdistaa	käsittelykustannukset, huono keräystehokkuus
Törmäyksesurit	>2,5	<80	korkealämpötilaiset	alle 1 mikrometrin
Venturipesurit	>0,5	<99	kosteat savukaasut, korrodoivat kaasut ja sumut voidaan neutralisoida, vähentynyt pölyräjähdysriski, tehokkuutta voidaan vaihdella	pienhiukkasille, jäätymisongelmat kylmällä ilmalla, savukaasun nostovoiman vähennys piipussa
Sähkösuodatin	<1	95–99+	>99 % tehokkuus saavutettavissa, hyvin pieniä hiukkasia saadaan erotettua, märkä tai kuiva erotus, painehäviöt ja energiantarve pieniä verrattuna muihin tehokkaisiin menetelmiin, vähän liikkuvia osia, vähäinen huollon tarve, toimii korkeissa lämpötiloissa (300–450 °C)	kallis investointi, herkkä vaihteleville pölykuormituksille ja virtausnopeuksille, resistiivisyys aiheuttaa eräiden aineiden kannattamattoman erottamisen, korkeajännite aiheuttaa varotoimenpiteitä, keräystehokkuus voi huonontua vähitellen ja huomaamattomasti
Kangassuodatin (letkusuodatin)	<1	>99	kuiva keräys mahdollista, pienhiukkasten erottaminen mahdollista, korkeat hyötysuhteet, suorituskyvyn heikkeneminen on havaittavissa	herkkyys suodatusnopeudelle, kuumat kaasut jäähdytettävä, suhteellisen kosteuden vaikutus (tiivistyminen), kemikaalien vaikutus kuituihin

Taulukon 2 erotusasteet ovat suuntaa antavia. Esimerkiksi vanhoissa sähkösuodattimissa ei päästä yhtä korkeisiin kokonaiserotusasteisiin kuin uusissa. Lisäksi erotustehokkuus voi vaihdella käytetyn polttoaineen mukaan, jos polttoaine poikkeaa huomattavasti mitoituspolttoaineesta, jolloin tuhkan ominaisvastus voi muuttua olennaisesti. Myös käyttöolosuhteet ja huoltotoimenpiteet vaikuttavat sähkösuodattimen toimintaan.

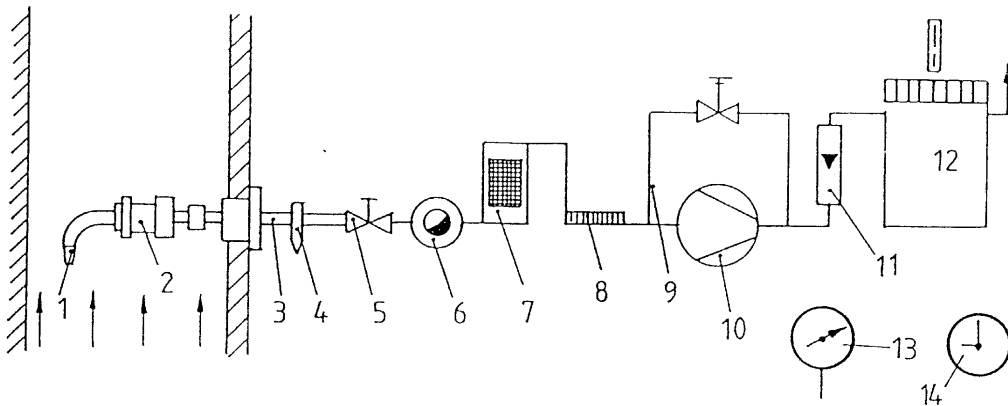
Kuitusuodattimien erotusasteet ovat varsin korkeita, koska esimerkiksi puolikuiivan rikinpoistolaitoksen jälkeen savukaasujen hiukkastiheys on suuri, mutta voimalaitoksien ominaispäästöt kuitusuodattimen jälkeen ovat yleensä alle 10 mg/MJ (ks. esim. kappale 6.1.1).

Rikinpoistoon käytettävien märkäkemiallisten pesureiden erotustehokkuudet vaihtelevat paljon mm. sisään tulevan hiukkasmäärän mukaan. Erotusasteet ovat melko alhaisia, sillä varsinainen hiukkasten erotus tapahtuu jo esierottimessa (sähkösuodatin), jolloin pesuriin tulevat hiukkaset ovat pääasiassa alle 10 µm:n hiukkasia.

## 5 PIENHIUKKASTEN MITTAAMINEN SAVU- KAASUISTA

Aerosolien mittaaminen voi perustua joko hiukkasten keräämiseen ja kerätyn hiukkasmateriaalin analysoimiseen (kertaluonteinen näytteenotto) tai suoraan hiukkasten ominaisuuksien havainnointiin ilman keräysvaihetta (jatkuvatoiminen näytteenotto). Keräysmekanismi on joko aktiivinen tai passiivinen. Aktiivisessa keräyksessä näyte imetään erillisellä näytevirtauksella keräimeen, passiivisessa keräyksessä näytteen ottaminen perustuu suoraan jonkin ulkoisen voiman tai hiukkasten ominaisuuden hyväksikäyttöön. Näitä fyysikaalisia vaikutusvoimia, joilla hiukkasia poikkeutetaan tai kerätään, ovat sähköinen vetovoima, painovoima, keskipakovoima, termoforeettinen ja magneettinen voima. Hiukkasten inertia, diffuusio ja väliaineen akustinen paine ovat muita keräämiseen käytettyjä ominaisuuksia. (Hinds 1982; Willeke & Baron 1993).

Kuvassa 17 on esitetty karkea periaatekuva hiukaspäästön mittaamisesta ns. in stack -menetelmällä, jossa imetty näytekaasu suodatetaan savukaasukanavan sisällä. In stack -menetelmän etuna on se, että hiukkassuodatin on mitattavan savukaasun kanssa samassa lämpötilassa. Toinen tapa on out stack -menetelmä, jossa näytekaasun suodatus suoritetaan vasta savukanavan ulkopuolella. Näytteenotossa pyritään aina isokineettisyyteen, jolloin kaasun nopeus ja suunta on sama mittauspisteessä ja sondin suuaukossa. (Vesterinen 1988).



- |                      |                                     |                             |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Näytteenottosondi | 6. Lauhteenerotin                   | 11. Virtausmittari          |
| 2. Suodatinkotelo    | 7. Kuivaustorni                     | 12. Kaasu- ja lämpömittarit |
| 3. Imuputki          | 8. Pumpun suojasuodatin             | 13. Ilmapuntari             |
| 4. Suunnanosoitin    | 9. Sivuvirta kuristusventtiileineen | 14. Aikamittari             |
| 5. Sulkulaite        | 10. Pumppu                          |                             |

*Kuva 17. Periaatekuva hiukaspäästön mittauksesta in stack -menetelmällä (Vesterinen 1988).*

Hiukkasten kokojakauman ja pitoisuuden mittaamiseen käytettyjä mittalaitteita ja niiden ominaisuuksia on esitelty taulukossa 3. Tämän työn puitteissa ei tarkemmin tarkastella eri mittalaitteita, sillä niistä löytyy runsaasti jo valmiiksi kirjoitettua materiaalia. Kiinnostunut lukija voi tutustua esimerkiksi lähteisiin Willeke & Baron (1993), Vesterinen (1988) ja Moisiö (1997).

*Taulukko 3. Eri mittalaitteita ja niiden ominaisuuksia (Willeke & Baron 1993).*

<b>Kokojakauman mittaus</b>					
Mittalaite	periaate	mitattava suure	kokoalue $\mu\text{m}$	sovellusalue	huomautuksia
Kaskadi-impaktori	impaktio	massa	0,03–30	ulkoilma, päästömittaus, tutkimus	
APS	lentoaika	lukumäärä	0,5–20	tutkimus	
OPC	valon sironta	valon intensiteetti	0,3–15	puhdastilat, ulkoilma, tutkimus	
DMA, SMPS	sähköinen liikkuvuus	lukumäärä tai varaus	0,001–1	tutkimus, päästömittaus, ulkoilma	
Diffuusiopateri + CNC	diffuusio-depositio	lukumäärä	0,001–0,1	ulkoilma	
ELPI	impaktio + varaus	sähkövaraus	0,03–10	ulkoilma, päästömittaus, tutkimus	reaaliaikainen
EAS	sähköinen liikkuvuus	sähkövaraus	0,01–1	tutkimus, ulkoilma	reaaliaikainen
Laser diffraktometri	valon diffraktio	valon intenseetti	0,5–200	päästömittaus, tutkimus	reaaliaikainen
QCM-impaktori	impaktio + värähtelyn massa-riippuvuus	massa	0,05–25	tutkimus	reaaliaikainen
<b>Pitoisuusmittaus</b>					
Mittalaite	periaate	mitattava suure	sovellusalue	huomautuksia	
Suodatinnäyte	suodatus	massa	lähes kaikki		
TEOM	värähtelyn massariippuvuus	massa	ulkoilma, päästömittaus		reaaliaikainen
Betavaimennus-ilmaisin	$\beta$ -säteilyn absorptio	massa	ulkoilma		reaaliaikainen
Kvartsikidevaaka	värähtelyn massariippuvuus	massa	ulkoilma, päästömittaus		reaaliaikainen
Kondensaatioydinlaskuri (CNC)	kondensaatio, optinen laskenta	lukumäärä	puhdastilat, ulkoilma		kokoalue yli n. 10 nm, reaaliaikainen
Fotometri, nefelometri	sironneen valon mittaus	valon intensiteetti	ulkoilma		reaaliaikainen
Valon vaimenemismittaus	valon vaimeneminen	valon intensiteetti	ulkoilma		reaaliaikainen
Tribosähköinen anturi	varauksen siirto	varaus	päästömittaus		reaaliaikainen

Gravimetrinen suodatinnäyte on pääasiallinen menetelmä hiukkaspäästöjen valvontaan. Kokonaismassapitoisuutta mittaavan suodatinnäytekeräyksen käyttö perustuu standardeihin (esim. SFS 3866). Suodatinkeräyksessä etukäteen punnitun suodattimen läpi imetään tietty ilmamäärä, jonka jälkeen suodatin punnitaan uudelleen. Massapitoisuus lasketaan suodattimen läpi imetyn ilmamäärän avulla. Menetelmän etuina ovat yksinkertaisuus ja mahdollisuus kerätyn näytteen analysointiin. Lisäksi esierotinta (esimerkiksi impaktoria) käyttämällä voidaan mitata tiettyä hiukkaskokoa pienempien hiukkasten massapitoisuus.

Suodatinkeräyksellä ei saada tietoa hiukkasten kokojakaumasta eikä näytteenottoaikana tapahtuvista pitoisuuden tai hiukkaskoon muutoksista. Kun myös näitä ominaisuuksia halutaan mitata, joudutaan samanaikaisesti käyttämään useita eri mittalaitteita, jolloin mittauksista tulee työläitä ja vaativia. Käytettyjen mittausmenetelmien tulee olla standardoituja tai sitten suoritettavat mittaukset täytyy dokumentoida huolellisesti, jotta vertailu ja uusintamittaukset ovat mahdollisia.

Varsinkin ilmanlaatumittauksissa Suomessa esiintyy vielä puutteita mittausmenetelmissä, sillä kansallista laadunvarmistusjärjestelmää ei ole eivätkä kaikki mittausmenetelmät ole vertailukelpoisia (Timo Salmi, Ilmatieteen laitos). Lisäksi ilmanlaatumittauksien puutteena on mittauksen uutuus, ts. mittauksia ei yleensä ole riittävästi pitkältä ajalta trendien arvioimiseksi. Järjestelmällisiä PM<sub>2.5</sub>-mittauksia tehdään vasta yhdessä mittauspisteessä (Helsingin Vallila). Koska suuntana on yhä pienempien hiukkasten rajoittaminen ohje- tai raja-arvoin, on mittauslaitteita ja -menetelmiä kehitettävä ja yhdenmukaistettava, jotta hengitysilman pienhiukkaspitoisuuksia pystytään luotettavasti mittaamaan.

Energiantuotantolaitoksissa hiukkaspäästön määrittäminen tapahtuu yleensä kertaluonteisten pitoisuusmittausten perusteella, mutta myös muita määrittystapoja käytetään, esimerkiksi laskentaa ainetaseesta. Voimalaitoksen vertailumittaukset on suoritettava esimerkiksi kolme kertaa vuodessa (määrätään laitospäästölupassa). Näillä mittauksilla saaduilla ominaispäästökertoimilla lasketaan koko vuoden kiintoainepäästö (t/a) laitoksessa vuoden aikana käytetyn polttoaine-energian avulla. Kokonaispäästö ja polttoaine-erittely ilmoitetaan vuosittain omalle alueelliselle ympäristökeskukselle, missä tarkistettavat tiedot syötetään Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-järjestelmään (ilmoitusvelvollisten laitosten/tehtaiden päästötietokanta).



## 6 HIUKKASPÄÄSTÖMÄÄRÄT KATTILA-TYYPEITTÄIN

Tässä kappaleessa esitettävät hiukkaskokojakaumat on otettu saatavilla olevista julkaisuista. Absoluuttiset hiukkaspäästö määrät (t/a, sisältävät kaiken savukaasun kiintoaineen, myös raskasmetallit, jotka ovat sitoutuneet hiukkasiin) on saatu Suomen ympäristökeskukselta (SYKE) VAHTI-järjestelmästä. Tarkasteluvuodeksi on valittu vuosi 1995, koska vuoden 1997 tiedot eivät olleet vielä kokonaisuudessaan valmiit ja vuoden 1996 tietojen saannissa oli teknisiä ongelmia. Erotinlaitetietoja ei ole järjestelmällisesti ylläpidetty, joten lähteenä on käytetty vuonna 1994 tehtyä kyselyä (SYKE). Vuoteen 1995 mennessä nämä tiedot eivät liene merkittävästi muuttuneet lukuun ottamatta joitain yksittäistapauksia.

Rajallisesti käytettävissä olevien kokojakaumamittaustulosten vuoksi kutakin polttotekniikkaa käsitellään yhden esimerkkilaitoksen avulla. Näille esimerkkilaitoksille pyritään selvittämään hengitettävien hiukkasten ja pienhiukkasten (PM10 ja PM2.5) osuus kokonaishiukkaspäästöistä olemassa olevien mittaustulosten perusteella. Muut saman polttotekniikan omaavat laitokset jaotellaan erotinlaitetietojen ja tarvittaessa pääpolttoaineen (yli 50 %:n osuus polttoainevalikoimasta) mukaisesti ryhmiin, joille lasketaan yhteisominaispäästöt ( $\text{mg/MJ}_{\text{pa}}$ ). Näille ryhmille ei erikseen selvitetä pienhiukkasten osuutta (mittaustietoja ei ole saatavissa!), joten esimerkkilaitokset edustavat karkeasti kaikkia saman polttotekniikan omaavia ryhmiä. On kuitenkin huomattava, että monissa ryhmissä erotinlaitekonsepti on erilainen kuin esimerkkilaitoksessa, jolloin hiukkaskokojakaumat ja arviot pienhiukkasten osuuksista eivät päde. Myös samanlaisen erotinlaitetekonaisuuden omaavien energiantuotantolaitosten hiukkaspäästöjen kokojakaumien yleistäminen yhden esimerkkilaitoksen perusteella on kyseenalaista, sillä esimerkiksi eri sähkösuodatinten toiminta ja erotusasteet voivat olla hyvinkin erilaisia (mitoitus, käyttö, puhdistusmenetelmät, kunnossapito jne.)

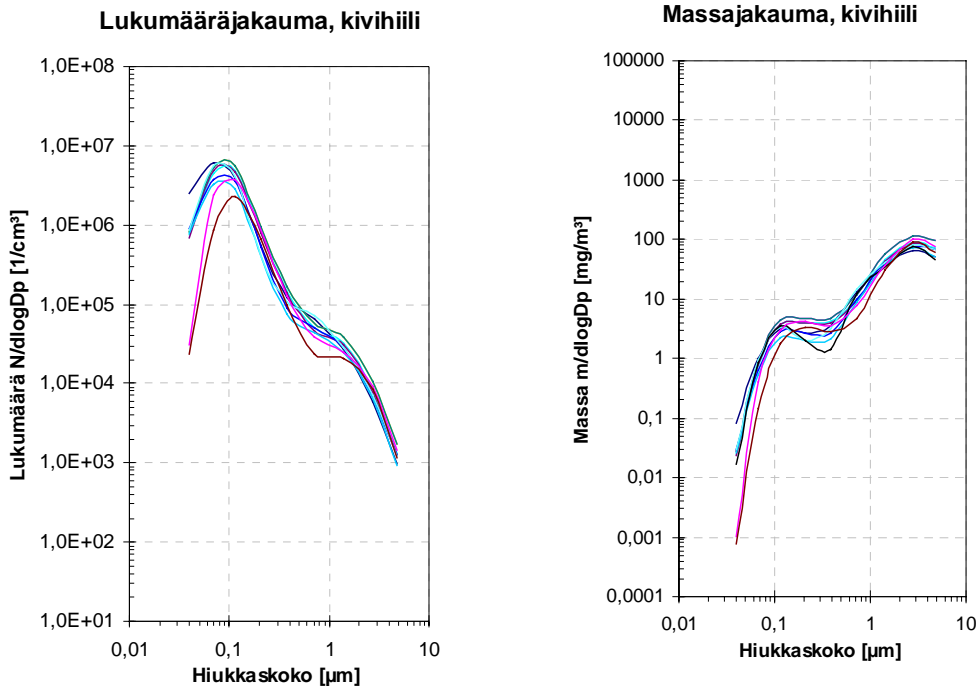
Kunkin polttotekniikan esimerkkilaitosta käsiteltäessä kaikki laitostiedot on tarkistettu laitosten tekemistä päästötarkkailuraporteista, jotka on hankittu alueellisista ympäristökeskuksista sekä joissain tapauksissa vielä soittamalla kyseisen laitoksen käyttö- tai ympäristöpäällikölle. Lisäksi kaikkien polttotekniikoiden yhteydessä on taulukoitu VAHTI-järjestelmästä kerätyt eri laitosten osaprosessitiedot ja laskettu ominaispäästöt polttoaineteholuokittain sekä erotuslaitteittain jaoteltuina. Pyrkimyksenä on siis ollut saada samanlaiset tai lähes samanlaiset energiantuotantoprosessit samaan taulukkoon ja verrata kyseisen ryhmän käyttötunneilla painotettua yhteisominaispäästöä muiden prosessien vastaaviin. Yhteisominaispäästö lasketaan käyttötunneilla painotettuna, jotta vain muutaman tunnin vuodessa käytössä olevat vara- ja huippukattilat eivät vaikuttaisi liikaa yhteiseen ominaishiukkaspäästölukuun. Kattilat on jaettu polttoainetehon (P) mukaan seuraaviin kokoluokkiin:  $0 < P \leq 50$  MW,  $50 < P \leq 300$  MW,  $300 < P \leq 500$  MW ja yli 500 MW. VAHTI-järjestelmässä on tiedot kaikkien ilmoitusvelvollisten laitosten ( $P \geq 5 \text{ MW}_{\text{pa}}$ ) päästöistä. Lisäksi siellä on tietoja joistakin 0–5 MW:n kattiloista, jotka on otettu mukaan kokoluokkaan

$0 < P \leq 50$  MW, paitsi öljy- ja arinakattiloiden tapauksissa, joissa pienimmät kattilat ( $0 < P \leq 5$  MW) on erotettu omaksi ryhmäkseen niiden suuren lukumäärän vuoksi.

## 6.1 KIVIHIILEN PÖLYPOLTTO

Kivihiilen pölypoltossa muodostuneiden pienhiukkasten kokojakaumat ovat bimo-  
daalisia eli kokojakaumassa on kaksi erikseen havaittavissa olevaa huippua. Nämä  
huiput ovat puolalaista hiiltä poltettaessa aerodynaamiselta halkaisijaltaan ( $D_p$ ) n.  
0,05–0,1  $\mu\text{m}$  ja 2  $\mu\text{m}$  (sähkösuodattimen jälkeen mitattuna, Kauppinen & Pakkanen  
1990; Moisio 1997).

Kivihiilen pölypolttolaitoksissa käytetään hiukkasten erottamiseen savukaasusta  
yleensä vähintään sähkösuodatinta, joka poistaa suurimman osan savukaasun isoista  
hiukkasista. Kun lisäksi polttoainehiukkasten koko on jo alkuaan vain 40–80  $\mu\text{m}$  ja  
palamislämpötila korkea, ovat käytännössä lähes kaikki savupiipusta ulos tulevat  
hiukkaset alle 10  $\mu\text{m}$ :n kokoisia eli hengitettäviä hiukkasia (alle 8  $\mu\text{m}$ :n kokofrak-  
tiosta on alle 5  $\mu\text{m}$ :n pienhiukkasia lähes 100 % hiukkasten yhteislukumäärästä ja  
69–95 % yhteismassasta, Moisio 1997). Kivihiilivoimalaitokselta sähkösuodattimen  
jälkeen mitatut hiukkaskokojakaumat on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Salmisaaren kivihiilivoimalaitokselta sähkösuodattimen jälkeen (ennen letkusuodatinta) sähköisellä alipaineimpaktorilla (ELPI,  $D_p < 8 \mu\text{m}$ ) mitatut hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997).

Koska kuvan 18 mittaus on suoritettu sähkösuodattimen ja letkusuodattimen välistä, on pitoisuustaso (keskimääräinen massapitoisuus  $58,8 \text{ mg/m}^3$ , Moisio 1997, liite 5) vielä korkeampi kuin savupiipussa. Useasta eri mittauksesta saatujen hiukkaskokojakaumien lähes yhtenevästä käyrästä näkee, että kivihiilen pölypolttoprosessi on hyvin vakaa. Muutoksia aiheuttavat lähinnä nuohoukset sekä sähkösuodattimen puhdistusravistukset. Kattilanuohous vaikuttaa merkittävästi sekä hiukkaspitoisuuteen että -jakaumiin. Nuohousten ollessa käynnissä saattaa hiukkaspäästö sähkösuodattimen läpi kasvaa hetkellisesti monikymmenkertaiseksi (Moisio 1997). Sähkösuodattimen puhdistusravistukset myötävaikuttavat pääasiassa yli  $1 \mu\text{m}$ :n hiukkasten lisääntyneisiin pitoisuuksiin savukaasussa. Salmisaaren mittauksissa tämä pitoisuuslisäys oli alle 4 % (Moisio 1997), kun aiempien pilottikokoluokassa tehtyjen kokeellisten tulosten mukaan jopa 20–40 % kokonaispäästöstä on ravistusemissiota (Bush 1984). Näiden mittausten koejärjestelyt poikkesivat kuitenkin huomattavasti toisistaan. Salmisaaren mittauspiste sijaitsi kaukana sähkösuodattimen jälkeen, joten gravitaatiohäviöt ovat voineet kadottaa osan suurimmista hiukkasista. Lisäksi Salmisaaren mittauksissa käytetyllä sähköisellä alipaineimpaktorilla (ELPI) mitattiin vain alle  $8 \mu\text{m}$ :n hiukkasia, joten tätä suuremmat ravistusten mahdollisesti irrottamat hiukkaset jäivät mittaamatta. Myös sähkösuodattimien toimintaeroilla (ravistussyklit ym.) voi olla vaikutusta erilaisiin ravistusemissioihin.

Kivihiiltä poltettaessa pienhiukkaskokojakauma ( $< 0,5 \mu\text{m}$ , Mohr ym. 1996) ennen sähkösuodatinta on yksihuippuinen. Tämä jakauman huippu esiintyy noin  $0,1 \mu\text{m}$ :n

kohdalla. Kokojakaumaan vaikuttaa huomattavasti enemmän kattila kuin käytetty hiililaatu. Sähkösuodattimen jälkeen mitatut pienhiukkasten kokojakaumat vaihtelevat huomattavasti enemmän ja niihin vaikuttaa myöskin käytetty hiililaatu. Mit-taus-ten perusteella sähkösuodatin läpäisee eniten pienhiukkasia, jotka ovat halkaisijal-taan 0,3–0,4 µm. (Mohr ym. 1996).

Kivihiihen pölypoltossa ultrapienien hiukkasten (< 0,03 µm, Mohr ym. 1996) pitoi-suus sähkösuodattimen jälkeisissä savukaasuissa on joissakin tapauksissa mitattu suuremmaksi kuin suodatinta edeltävissä savukaasuissa. Tämän ilmiön esiintymi-seen on havaittu vaikuttavan ennen sähkösuodatinta savukanavassa sijaitseva kata-lyyttinen typenpoistoyksikkö (DeNO<sub>x</sub>), jossa ammoniakkia katalyyttinä käyttäen poistetaan osa savukaasun typenoksidoista. Ultrapieniä hiukkasia näyttäisi siis muo-dostuvan sähkösuodattimen sisällä ammoniakkiruiskutuksen vaikutuksesta. (Mohr ym. 1996).

### **6.1.1 Esimerkki kivihiihen pölypoltosta: Salmisaaren voima-laitokset**

Salmisaaren kivihiihivoimalaitosten hiukkaspäästö- ja polttoaineen kulutustiedoista vuodelta 1995 (Suomen ympäristökeskus) lasketut ominaispäästöt eri osaprosesseil-le on esitetty taulukossa 4. Ominaispäästö on laskettu ottaen mukaan tukipolttoaine (raskas polttoöljy), koska osaprosessin hiukkaspäästöluvussa on kysymys kokonais-päästöstä eikä erottelua eri polttoaineiden kesken ole tehty. Myöhemmin erityisesti monia polttoaineita samanaikaisesti käyttävissä arina- ja leijupetikattiloissa pääpolt-toaineeksi on valittu polttoaine, jolla on yli 50 prosentin osuus kokonaiskulutukses-ta. Tällöin ominaispäästö lasketaan tälle pääpolttoaineelle, vaikka siihen vaikuttavat muutkin polttoaineet.

Pääprosessi on k1 (Salmisaari B-voimalaitos), jonka suhteellisen uusi tekniikka ja erittäin tehokas hiukkaserotuslaitteisto (sähkösuodatin ja kuitusuodatin) näkyy pie-nenä ominaispäästönä, joka on vain n. 3 mg/MJ<sub>pa</sub> (taulukko 4). Osaprosessi k7 (Salmisaari A-voimalaitos) edustaa vanhaa tekniikkaa ja hiukkaspäästön havaitaan olevan selvästi suurempi (15 mg/MJ<sub>pa</sub>). Myös kattilan koko vaikuttaa muodostuviin päästöihin, sillä suuremmassa kattilassa palamisolosuhteet ovat yleensä stabiilimmat (paremmin säädetty ja valvottu palaminen) ja viipymäajat pidempiä.

Taulukko 4. Salmisaaren voimalaitosten hiukkaspäästöt vuonna 1995 (Suomen ympäristökeskus).

Osa-pros.-tunnus *)	Päästö (t/a)	P.a.-teho (MW)	Poltto-tekniikka *)	Käynti-aika (h/a)	Käyttö-aste (%)	P.a.-kulutus (TJ/a)	Poltto-aine *)	Omin.päästö (mg/MJ(pa))	Rajoittamis-menetelmä *)	Erotus-aste (**)	PM10 (% massasta, arvio) (***)	PM2.5 (% massasta, arvio) (***)
k1	33	510,0	Sekoitus-poltin	7805	89,1	11983 29,90	KHIL0.8 POR0.8	2,7	Yläilman syöttö (overfire air), Sähkösuodin, Puolikuiva rikinpoisto, Kuitusuodin	> 99 % massasta	98-100% (= n. 32 t, 2,7 mg/MJ)	n. 50 % (= n. 16 t, 1,3 mg/MJ)
k5	0,419	8,7	Muu poltin-poltto	2246	25,6	18,70	POR0.8	22,4	-	-	ei mittaus-tietoa	
k6	0,3	133,0	Suihku-poltin	125	1,4	12,30	POR0.8	24,4	-	-	ei mittaus-tietoa	
k7	19	187,0	Paineha-joitteinen öljypoltin	2278	26,0	24,4 1274,00	POR0.8 KHIL0.8	14,6	Yläilman syöttö (overfire air), Sähkösuodin, Puolikuiva rikinpoisto, Kuitusuodin	> 99 % massasta	98-100% (= n. 19 t, 14,6 mg/MJ)	n. 50 % (= n. 9 t, 7 mg/MJ)
YHT.	52,72	t/a		12454	35,5	13342,3	TJ/a	4,0	mg/MJ(pa)	>99 %	98% (51 t) (4 mg/MJ)	50% (26 t) (2 mg/MJ)

\*) Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-järjestelmästä.

\*\*\*) Arvio perustuu kirjallisuuteen ja mittauksiin (esim. Moisio 1997).

\*\*\*\*) Arvio perustuu kirjallisuuteen ja kokojakaumamittauksiin (Moisio 1997).

Kokonaisuudessaan Salmisaaren voimalaitosten ominaispäästö hiukkasille oli vuonna 1995 4 mg/MJ<sub>pa</sub>, joka on selvästi alle laitokselle asetettujen määräysten (ilmansuojelupäätös no 4175 vuodelta 1987: 50 mg/m<sup>3</sup>n eli noin 18 mg/MJ, kun savukaasun O<sub>2</sub> = 6 %). Myös vuonna 1996 voimalaitosten ominaishiukkaspäästö oli samaa luokkaa (4 mg/MJ<sub>pa</sub>).

Koko voimalaitoksen sähkön ja lämmön yhteistuotanto vuonna 1995 oli yhteensä 3 291 GWh, joten hiukkaspäästökseen tuotettua energiayksikköä kohti saadaan 16 g/MWh (16 mg/kWh).

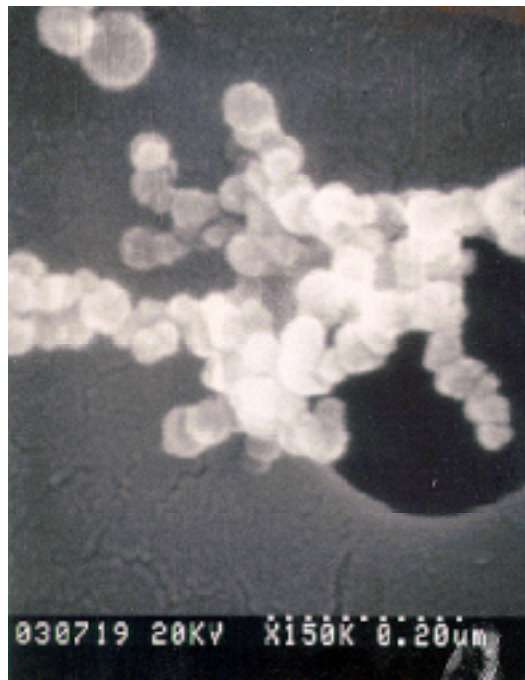
PM2.5-pienhiukkasia on arviolta puolet hiukkaspäästöstä. Mittauksissa (Moisio 1997) Naantalissa kivihiihivoimalaitoksella 45 % suodattimien jälkeisistä alle 8 µm:n hiukkasten massasta oli alle 2,5 µm:n kokoisia. Salmisaarella sähkösuodattimen ja letkusuodattimen välillä tehdyissä mittauksissa saatiin PM2.5-pienhiukkasten osuudeksi 22 %, mutta tehokkaan kuitusuodattimen jälkeen pienten hiukkasten osuus kasvaa suurempien suodattuessa.

Raskasmetallipäästöt (As, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl, Zn, V) vuonna 1995 olivat yhteensä n. 1 450 kg (Salmisaaren voimalaitosten päästötarkkailuraportti vuodelta 1995, Uudenmaan ympäristökeskus). Päästölaskennassa on käytetty maaliskuussa 1993 SIHTI-projektin yhteydessä mitattuja päästökertoimia. Osa raskasmetalleista on sitoutunut hiukkasiin, osa päästöstä on höyryä. Suurin osa (yli 1 300 kg) raskas-

metallipäästöistä on sinkkiä. Raskasmetallien ominaispäästökertoimet ( $\mu\text{g}/\text{MJ}$ ) ovat: As 0,7, Be 0,3, Cd 0,1, Cr 2,4, Hg 0,6, Ni 1,0, Pb 2,0, Tl 0,7 ja Zn 99,2  $\mu\text{g}/\text{MJ}$ .

Kaiken kaikkiaan Salmisaaren kivihiilen pölypolttoprosessi k1 oli vuonna 1995 toiseksi vähiten hiukkaspäästöjä ( $\text{mg}/\text{MJ}$ ) aiheuttava kivihiilikattila Suomessa. Tämä nähdään vertaamalla ominaispäästöä kappaleessa 6.1.2 esitettyjen polttoainetehojen mukaan jaoteltujen pölypolttoprosessien ominaispäästöjen kanssa. Tässä yhteydessä täytyy kuitenkin muistaa se, että pelkät polttoainetehot ja käyttöasteet eivät riitä täydelliseen päästövertailuun eri prosessien välillä, koska tietoja esimerkiksi kattiloiden ylösajojen lukumäärästä ja erotuslaitteiden häiriötilanteista ei ole kerätty. Toisaalta laitosten VAHTI-järjestelmään ilmoittamat hiukkaspäästö määrät perustuvat yleensä kertamittauksiin (yleensä optimiolosuhteissa) määritettyihin päästökertoimiin, jolloin päästölukuun pitää erikseen sisällyttää laskennallinen arvio häiriötilanteiden aiheuttamista lisäpäästöistä. Nämä arviot saattavat kuitenkin olla puutteellisia tai puuttua kokonaan joistain (pienemmistä) laitoksista. Lisäksi "samaa" polttoainetta käyttävien kattiloiden hiukkaspäästöissä saattaa olla huomattaviakin eroja polttoaineen koostumuksen vaihdellessa, esim. kivihiilikattiloissa poltetaan eri kivihiili-laatuja (puolalainen, venäläinen, kolumbialainen jne.), joiden mineraali- ja tuhkapitoisuudet vaihtelevat huomattavasti ja jotka muodostavat eri määriä hiukkaspäästöjä.

Kuvassa 19 on esitetty pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) eteläafrikkalaista ja kolumbialaista kivihiltä käyttävässä pölypolttokattilassa muodostuneesta alle mikrometrin kokoisesta agglomeraatista. Se on muodostunut lukuisista pienistä pallomaisista primäärihiukkasista, jotka ovat kooltaan alle  $0,05 \mu\text{m}$  (alle 50 nm).



*Kuva 19. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) kivihiilen pölypoltossa muodostuneesta agglomeraatista (Kauppinen ym. 1996).*

## 6.1.2 Kivihiilen pölypolttokattilat kokoluokittain

### Hiilipölykattilat kokoluokassa 50...300 MW

Polttoaineteholtaan 0...50 MW:n hiilipölykattiloita ei Suomessa ole, joten ensimmäinen ryhmä käsittää hiilipölykattilat teholuokassa 50...300 MW<sub>pa</sub>. Eri prosessit on jaoteltu lisäksi pölynpoistolaitteiston mukaan, kuten edellä on jo todettu. Taulukossa 5 on pelkällä syklonilla tai multisyklonilla varustetut pölypolttoprosessit, jotka eivät edusta puhdasta energiantuotantoa vaan ovat teollisuuden höyryntuotantoprosesseja. Kaikissa muissa Suomen kivihiilen pölypolttokattiloissa on erotuslaitteena vähintään sähkösuodatin.

*Taulukko 5. Syklonilla / multisyklonilla varustetut polttoaineteholtaan 50...300 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKE:n VAHTI-järjestelmästä).*

Polttoaineteho (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
89,00	4694	53,6	179,00	KHIILI	Sekoitus-poltin	53	281,9	Sykloni/multi-sykloni
			9,00	POR				
<b>YHT.</b>			<b>188,00</b>	<b>TJ/a</b>				
75,00	1210	13,8	67,00	KHIIL0.8	Sekoitus-poltin	70	269,2	Sykloni/multi-sykloni
			193,00	POR0.9				
<b>YHT.</b>			<b>260,00</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>164,00</b>	<b>5904</b>	<b>33,7</b>	<b>448,00</b>	<b>TJ/a</b>		<b>123</b>	<b>274,6</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>279,3 mg/MJ</b>		

Huomataan, että hiukkaspäästöt kulutettua polttoaineyksikköä kohti ovat suuret (279 mg/MJ). Pelkkä sykloni ei riitä hyvään hiukkasten erotusasteeseen hiilipölypoltossa. (Taulukon 5 toisessa prosessissa (75 MW) poltettiin tosin enemmän öljyä kuin hiiltä, mutta prosessi on samanlainen ja ominaispäästökin samaa luokkaa.)

Yleisin erotuslaite hiukkaspäästöjen rajoittamiseen tämän kokoluokan hiilipölykattiloissa on sähkösuodatin. Seuraavaksi esitetään nämä prosessit (taulukko 6).

Taulukko 6. Sähkösuodattimella varustetut polttoaineteholtaan 50...300 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaine-teho (MW)	Käyttötun-nit (h/a)	Käyttö-aste (%)	Polttoaine-kulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
219	5390	61,5	2684,00	KHIIL0.6	Suihku-poltin	68	25,2	Sähkösuodin
			17,40	POR2.0				
<b>YHT.</b>			<b>2701,40</b>	<b>TJ/a</b>				
263	4556	52,0	2736,00	KHIIL0.6	Sekoitus-poltin	272	98,5	Sähkösuodin
			24,50	POR2.0				
<b>YHT.</b>			<b>2760,50</b>	<b>TJ/a</b>				
195	5680	64,8	2807,70	KH VEN	Sekoitus-poltin	121	39,5	Sähkösuodin, Low-Nox-polttimet
			257,50	MAAKAASU				
<b>YHT.</b>			<b>3065,20</b>	<b>TJ/a</b>				
60	262	3,0	31,50	KHIIL0.9	Sekoitus-poltin	3	95,2	Sähkösuodin
260,00	6078	69,4	4995,00	KHIIL0.6	Sekoitus-poltin	544	108,5	Sähkösuodin, Low-Nox-polttimet, Puolikuiiva rikkinnoisto
			19,00	BIOKAASU				
			0,00	POK				
			58,00	POR3.1				
<b>YHT.</b>			<b>5014,00</b>	<b>TJ/a</b>				
145	8424	96,2	3590,00	KHIIL0.6	Sekoitus-poltin	168,72	42,9	Sähkösuodin
			341,00	MUUT				
<b>YHT.</b>			<b>3931,00</b>	<b>TJ/a</b>				
100	1934	22,1	527,00	KHIIL0.7	Sekoitus-poltin	30,9	52,8	Sähkösuodin
			58,00	POR1.0				
<b>YHT.</b>			<b>585,00</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>1242</b>	<b>32324</b>	<b>52,7</b>	<b>18088,60</b>	<b>TJ/a</b>		<b>1207,6</b>	<b>66,8</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>60,5 mg/MJ</b>		

Käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö on 61 mg/MJ, joten sähkösuodatin on yksinäänkin melko hyvä savukaasun hiukkasten erottaja, mutta parempaan erotukseen olisi pyrittävä ainakin kaupunkialueilla, missä energiantuotantolaitokset yleensä sijaitsevat. Päästö väheneekin vielä merkittävästi, kun otetaan käyttöön kuitusuodatin (yleensä letkusuodatin), jolloin päästään jo alle 10 mg/MJ:n ominaispäästöön (taulukko 7).



Taulukko 7. Sähkösuodattimella sekä kuitusuodattimella varustetut polttoaineteholtaan 50...300 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoainetehto (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
187,00	2278	26,0	1274,00	KHIL0.8	Suihkupoltin	19	14,6	Yläilman syöttö, Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto,
YHT.			24,40	POR0.8				
YHT.			1298,40	TJ/a				
220,00	5458	62,3	4055,90	KHIL0.6	Suihkupoltin	20,4	4,7	Yläilman syöttö, Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto,
YHT.			245,40	MAAKAASU				
YHT.			21,70	POR2.3				
YHT.			4323,00	TJ/a				
407,00	7736	44,2	5621,40	TJ/a		39,4	7,0	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:						7,6 mg/MJ		

#### Hiilipölykattilat kokoluokassa 50...300 MW

Polttoaineteholtaan 300...500 MW:n hiilipölykattilat on varustettu vähintään sähkösuodattimin (taulukko 8), yleensä myös kuitusuodattimin (taulukko 10).

Taulukko 8. Sähkösuodattimella varustetut polttoaineteholtaan 300...500 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoainetehto (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
360,00	7679	87,7	3634,00	KHIL0.3	Sekoitus-poltin	160	23,5	Savukaasujen takaisinkierrätys, Sähkösuodin, Muu palamisilman vaiheistus tulipesään
YHT.			3178,00	MAAKAASU				
YHT.			6812,00	TJ/a				
315,00	400	4,6	311,00	KHIL0.9	Suihkupoltin	5	15,6	Sähkösuodin
YHT.			8,00	POR2.4				
YHT.			1,00	POK				
YHT.			320,00	TJ/a				
675	8079	46,1	7132,00	TJ/a		165	23,1	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:						23,1 mg/MJ		

Pelkällä sähkösuodattimella saavutettiin 23 mg/MJ:n yhteisominaispäästö käyttötunneilla painotettuna. Pienempi ominaispäästötaso 50...300 MW:n kokoluokkaan verrattuna johtuu mm. suurempien kattiloiden paremmista palamisolosuhteista (lämpötila, sekoittuminen, viipymäaika) eli toisin sanoen paremmista kattilalahyöty-suhteista ja vakaammista prosesseista.

Sähkösuodatin ja märkä rikinpoistomenetelmä (pesuri) yhdessä johtivat 6 mg/MJ:n ominaispäästöön (taulukko 9), joten rikkidioksidia pestäessä myös hiukkasia huuhtoutuu pesunesteen mukana savukaasuista. Toisaalta pesuri tuottaa myös uusia pienihiukkasia (pienet vesipisararat ja niihin sitoutuneet haitalliset aineet). Tämä on todettu kokojakaumamuutoksina suoritetuissa mittauksissa ennen ja jälkeen pesurin (esim. Moisio 1997).

*Taulukko 9. Sähkösuodattimella sekä märällä rikinpoistolla varustetut polttoainete-holtaan 300...500 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasa-sille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).*

Polttoaine-teho (MW)	Käyttötun-nit (h/a)	Käyttö-aste (%)	Polttoaine-kulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
315,00	6203	70,8	5340,00	KHIILI	Suihku-poltin	30	5,4	Yläilman syöttö, Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			53,00	POR2.4				
			5,00	POK				
			115,00	MAAKAASU				
			<b>YHT. 5513,00</b>	<b>TJ/a</b>				
315,00	5927	67,7	5346,00	KHIILI	Suihku-poltin	37	6,7	Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			43,00	POR2.4				
			100,00	MAAKAASU				
			12,00	POK				
			<b>YHT. 5501,00</b>	<b>TJ/a</b>				
430,00	5536	63,2	6210,00	KHIIL0.5	Suihku-poltin	33,3	5,3	Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			29,00	POR2.4				
			<b>YHT. 6239,00</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>1060</b>	<b>17666</b>	<b>67,2</b>	<b>17253</b>	<b>TJ/a</b>		<b>100,3</b>	<b>5,8</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>5,8 mg/MJ</b>		

Sekä sähkösuodatinta että kuitusuodatinta erotuslaitteina käyttävien prosessien yhteisominaispäästö vuonna 1995 oli 11 mg/MJ (taulukko 10). Pelkkä sähkösuodatin aiheutti kaksinkertaiset hiukkaspäästöt kuten edellä kävi ilmi.

Taulukko 10. Sähkösuodattimella sekä kuitusuodattimella varustetut polttoaineteoltaan 300...500 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaineteho (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
363,00	7042	80,4	7752,00	KHIIL0.6	Sekoitus-poltin	86	<b>11,0</b>	Low-Nox-polttimet, Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto
			85,00	POR2.0				
<b>YHT.</b>			<b>7837,00</b>	<b>TJ/a</b>				
363,00	6118	69,8	7101,00	KHIIL0.6	Sekoitus-poltin	80	<b>11,1</b>	Low-Nox-polttimet, Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto
			83,00	POR2.0				
<b>YHT.</b>			<b>7184,00</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>726</b>	<b>13160</b>	<b>75,1</b>	<b>15021,00</b>	<b>TJ/a</b>		<b>166</b>	<b>11,1</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>11,0 mg/MJ</b>		

#### Hiilipölykattilat kokoluokassa > 500 MW

Suurimpien hiilipölykattiloiden (yli 500 MW) ominaispäästöt on laskettu taulukoihin 11–13. Sähkösuodattimella sekä määrällä rikinpoistolla varustettujen prosessien (taulukko 11) yhteisominaispäästö oli likimain sama (6 mg/MJ) kuin edellisessä kokoluokassa.

Taulukko 11. Sähkösuodattimella sekä määrällä rikinpoistolla varustetut polttoaineteholtaan yli 500 MW:n hiilipölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaineteho (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
650	796	9,1	1257,00	KHIL0.7	Sekoitus-poltin	12,3	<b>9,6</b>	Low-Nox-polttimet, Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			23,00	POR2.9				
<b>YHT.</b>			<b>1280,00</b>	<b>TJ/a</b>				
650	1206	13,8	1946,00	KHIL0.7	Sekoitus-poltin	18,8	<b>9,5</b>	Low-Nox-polttimet, Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			33,00	POR2.9				
<b>YHT.</b>			<b>1979,00</b>	<b>TJ/a</b>				
605	5897	67,3	8297,00	KHIL0.2	Sekoitus-poltin	46	<b>5,5</b>	Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			36,00	POR0.9				
<b>YHT.</b>			<b>8333,00</b>	<b>TJ/a</b>				
560	4310	49,2	5777,80	KHIL0.8	Sekoitus-poltin	21	<b>3,6</b>	Sähkösuodin, Märkämenetelmä
			59,00	POR2.4				
<b>YHT.</b>			<b>5836,80</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>2465</b>	<b>12209</b>	<b>34,8</b>	<b>17428,80</b>	<b>TJ/a</b>		<b>98,1</b>	<b>5,6</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>5,50</b>	<b>mg/MJ</b>	

Sekä sähkösuodattimella että kuitusuodattimella varustettuja yli 500 MW:n hiilipölykattiloita on vain yksi, juuri edellä käsitelty Salmisaari B-voimalaitoksen kattila. Ominaispäästö hiukkasille vuonna 1995 oli varsin pieni, noin 3 mg/MJ (taulukko 12).

Taulukko 12. Sähkösuodattimella sekä kuitusuodattimella varustettu polttoaineteholtaan yli 500 MW:n hiilipölykattila ja sen ominaispäästö (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaineteho (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
510,00	7805	89,1	11983,00	KHIL0.8	Sekoitus-poltin	33	<b>2,7</b>	Yläilman syöttö, Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiiva rikinpoisto
			29,90	POR0.8				
<b>YHT.</b>			<b>12012,90</b>	<b>TJ/a</b>				
							<b>2,7</b>	<b>mg/MJ</b>

Typenpoisto SCR-tekniikalla (selective catalytical reduction), sähkösuodatin sekä märkä rikinpoisto samassa savukaasulinjassa (v. 1995 vain yksi kattila Suomessa) johti 2 mg/MJ ominaispäästöön (taulukko 13).

Taulukko 13. Sähkösuodattimella sekä SCR:llä (katalyyttinen  $NO_x$ :ien poisto) varustettu polttoaineteholtaan yli 500 MW:n hiilipölykattila ja sen ominaispäästö ( $mg/MJ_{pa}$ ) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaineteho (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
1300,00	4552	52,0	15400,00	KHIIL0.8	Sekoitus-poltin	32	2,1	Yläilman syöttö, Low-Nox-polttimet, Sähkösuodin, SCR, Märkämenetelmä
			100,00	POR2.4				
<b>YHT.</b>			<b>15500,00</b>	<b>TJ/a</b>			<b>2,1</b>	<b>mg/MJ</b>

### 6.1.3 Yhteenveto hiilipölykattiloiden ominaishiukkaspäästöistä

Taulukkoon 14 on koottu kaikki edellä esitetyt kivihiilen pölypolttokattilat polttoainetehon ja pölynerotuslaitetietojen mukaan ryhmiteltyinä. Taulukossa esitetään kootusti edellä lasketut käyttötunneilla painotetut ominaishiukkaspäästöt ( $mg/MJ$ ) kullekin ryhmälle. Vain yhden kattilan sisältävien "ryhmien" ominaispäästöön ei tietenkään käyttötunneilla painotus vaikuta, vaan kyseessä on yksittäisen kattilan ominaispäästö.

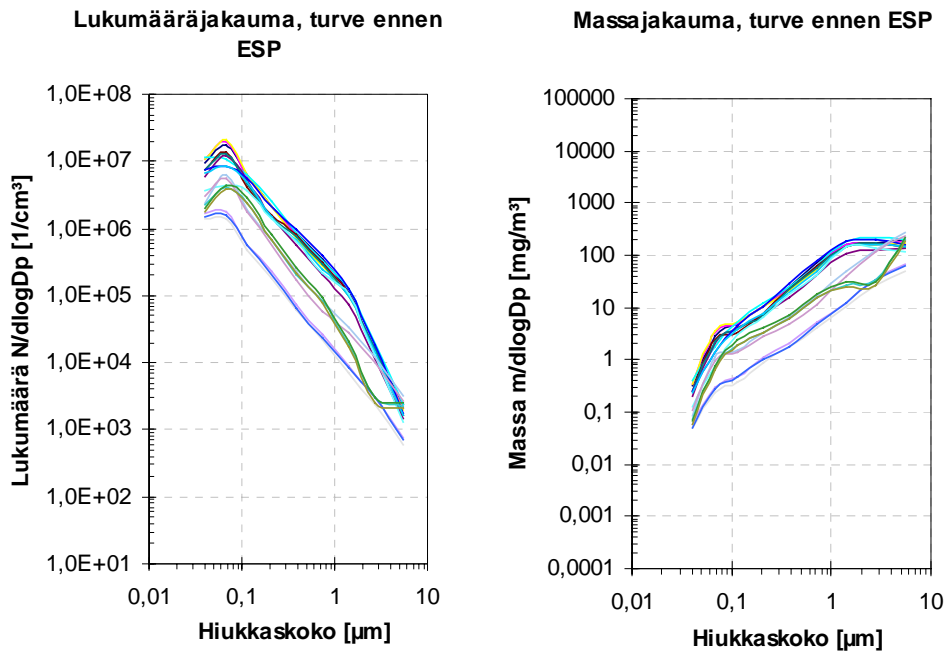
Taulukosta 14 nähdään selvästi ominaispäästön pieneneminen kattiloiden kokoluokan suurentuessa, mikä johtuu paremmista palamisolosuhteista ja palamisen tehokkaammasta hallinnasta suurissa yksiköissä. Suurempien kattiloiden hyötysuhteet ovat siten parempia, jolloin savukaasujen mukaan ei joudu niin runsaasti palamatonta ainesta kuin pienissä kattiloissa. Hiilipölypoltossa muodostuu paljon lentotuhkaa, joten tarvitaan vähintään sähkösuodatin kohtuullisen ominaispäästötason saavuttamiseksi. Suurimpien kattiloiden ( $P > 500$  MW) jälkeen on jo useita pölynerotuslaitteita, jolloin päästään hyvin pieniin ominaispäästöihin, 2–6  $mg/MJ$ . Sähkösuodattimet, kuitusuodattimet ja rikinpoiston märkäpesurit ovat kuitenkin niin kalliita, että vasta suurimmissa kokoluokissa niiden kaikkien hankinta on mahdollista (ts. ominaisinvestointi kohtuullinen).

Taulukko 14. Yhteenveto hiilipölykattiloiden käyttötunneilla painotetuista ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ).

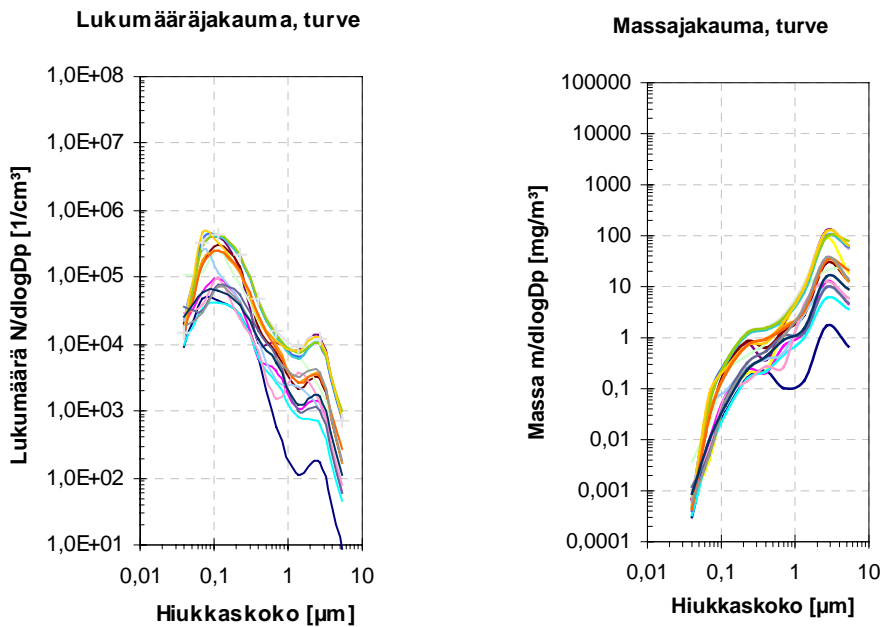
LAITOKSET (poltteknikoittain ja kokoluokittain)	EROTUSLAITE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Hiilipölylaitokset kokoluokassa 50 < P < 300 MW	Sykloni/multisykloni	2	279	mg/MJ
	Sähkösuodin	8	61	mg/MJ
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	2	8	mg/MJ
Hiilipölylaitokset kokoluokassa 300 < P < 500 MW	Sähkösuodin	2	23	mg/MJ
	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	3	6	mg/MJ
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	2	11	mg/MJ
Hiilipölylaitokset kokoluokassa P > 500 MW	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	4	6	mg/MJ
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	1	3	mg/MJ
	Sähkösuodin, SCR, Märkämenetelmä	1	2	mg/MJ

## 6.2 TURPEEN PÖLYPOLTTO

Myös turpeen pölypoltossa muodostuva savukaasun kiintoaine on kokojakaumaltaan bimodaalinen eli siinä on erottavissa kaksi selkeätä huippua. Pienempi huippu koostuu kivihiihen pölypolttoa hieman suuremmista hiukkasista, mutta molemmat huiput ovat likimain samoilla kokoalueilla (0,05–0,1 ja vähän yli 1 µm) kuin kivihiihen pölypoltossakin. Tämä voidaan nähdä kuvasta 20, jossa on Naistenlahden turvepölyvoimalaitokselta ennen sähkösuodatinta vuonna 1993 mitatut hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997). Sähkösuodattimen jälkeen mitatut kokojakaumat (v. 1994) on esitetty kuvassa 21.



Kuva 20. Naistenlahden turvevoimalaitokselta ennen sähkösuodatinta mitatut (ELPI,  $D_p < 8 \mu\text{m}$ ) hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997). Vasemmalla lukumääräjakauma ja oikealla massajakauma.



Kuva 21. Naistenlahden turvevoimalaitokselta sähkösuodattimen jälkeen mitatut (ELPI,  $D_p < 8 \mu\text{m}$ ) hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997). Vasemmalla lukumääräjakauma ja oikealla massajakauma.

### **6.2.1 Esimerkki turpeen pölypoltosta: Naistenlahden voimalaitokset**

Naistenlahden turvepölylaitos Tampereella koostuu vanhemmasta, jo vuonna 1971 käyttöön otetusta ykkösyksiköstä sekä vuonna 1977 käyttöön otetusta kakkosyksiköstä (220 MW). Naistenlahti 1 oli aluksi öljykattila, mutta muutettiin vuonna 1982 turvekäyttöiseksi (165 MW). Laitosta pidetään nykyään jo vanhanaikaisena ja käynnissä onkin YVA-ohjelma laitoksen muuntamisesta kaasuturbiinikombilaitokseksi.

Naistenlahden voimalaitos tuottaa sähköä ja kaukolämpöä pääosin kaukolämmitys-vastapaineturbiineilla yhdistettynä energiantuotantona. Pääpolttoaineena on jyrsin-turve, jonka kosteus vuonna 1995 oli 46,8 % ja rikki-pitoisuus 0,15 %. Tuki- ja vara-polttoaineina käytetään maakaasua ja raskasta polttoöljyä. Ykköskattilan savukaasut puhdistetaan suursyklonilla ja kolmilohkoisella sähkösuodattimella. Kakkosyksikön savukaasut puhdistetaan kaksilohkoisella sähkösuodattimella. Lopuksi savukaasut johdetaan 90 metriä korkeisiin savupiippuihin.

Vuonna 1995 ykkösyksikkö oli käytössä 3 854 tuntia ja kakkosyksikkö 5 798 tuntia. Taulukossa 15 on esitetty Naistenlahden voimalaitosten prosessitiedot ja niistä las-  
ketut ominaispäästöt.



Taulukko 15. Naistenlahden turvevoimalaitosten hiukkaspäästöt vuonna 1995 (Suomen ympäristökeskus).

Osa- pros.- tunnus (*)	P.a.- teho (MW) (*)	Käynti- aika (h/a) (*)	Käyttö- aste (%)	P.a.- kulutus (TJ/a) (*)	Poltto- aine (*)	Poltto- tekniikka (*)	Päästö (t/a) (*)	Omin.päästö (mg/MJ(pa))	Rajoittamis- menetelmä (*)	Erotusaste (% mas- sasta) (**)	PM10 (% massasta, arvio) (***)	PM2,5 (% massasta, arvio) (***)
Naisten- lahti 1 k1	165	3854	44,0	1382,375	JYRSIN- TURVE	epäsuora pölypoltto	93	52,4	Sykloni/multisykloni , Sähkösuodin, Muu palamisilman vaiheistus tulipesään			
				195,631	POR1.9							
				196,639	MAA- KAASU							
			YHT.	1774,645	TJ/a							
Naisten- lahti 2 k1	220	5798	66,2	2634,495	JYRSIN- TURVE	Sekoitus- poltin (suora pölypoltto)	44	13,4	Sähkösuodin, Muu palamisilman vaiheistus tulipesään			
				262,812	POR1.9							
				396,422	MAA- KAASU							
			YHT.	3293,729	TJ/a							
<b>YHT.</b>	<b>385</b>	<b>9652</b>	<b>55,1</b>	<b>5068,374</b>	<b>TJ/a</b>		<b>137</b>	<b>27,0</b>	<b>mg/MJ(pa)</b>	<b>94,5</b>	<b>96 % (125 t) (25 mg/MJ)</b>	<b>20 % (28 t) (6 mg/MJ)</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>								<b>28,9 mg/MJ</b>				

\*) Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-järjestelmästä.

\*\*\*) Laskettu mitatuista massapitoisuuksista ennen ja jälkeen suodattimen (Moisio 1997).

\*\*\*\*) Arvio perustuu kirjallisuuteen ja kokojakaumamittauksiin (Moisio 1997).

Hiukkaspäästöjen määrittäminen on käytetty yksittäismittauksia ja käyntiaikatarkkailua sekä kattiloille määriteltyjä ominaispäästökertoimia. Vanhemman ykkösyksikön hiukkaspäästö vuonna 1995 oli 93 tonnia ja ominaispäästö 53 mg/MJ. Kakkosyksikön hiukkaspäästö oli 44 tonnia (14 mg/MJ). Voimalaitosten yhteispäästö oli siten 137 tonnia ja ominaispäästö 27 mg/MJ. Vuonna 1996 ominaispäästöt olivat 46 mg/MJ ykkösyksikölle ja 14 mg/MJ kakkosyksikölle. Päästöraja kummallekin yksikölle on vuorokausikeskiarvona 100 mg/m<sup>3</sup>n (5 % O<sub>2</sub>) eli n. 38 mg/MJ (Päätös ilmansuojeluilmoituksesta (95/A231) 1989). Ykkösyksikkö ylittää vuosiarvonakin raja-arvon. Muutos maakaasua käyttäväksi kaasuturbiinikombiksi merkitsi hiukkaspäästöongelman poistumista.

Naistenlahden voimalaitosten sähkön ja lämmön yhteistuotanto vuonna 1995 oli 1 236 GWh, joten hiukkaspäästökseen tuotettua energiayksikköä kohti saadaan 111 g/MWh (111 mg/kWh).

Hiukkaspäästön kokonaisuudesta PM10-hiukkasia on n. 96–100 %, jolloin Naistenlahden turvepölykattiloiden ominaispäästö alle 10 µm:n hengitettävälle hiukkasille on noin 25 mg/MJ. PM2.5-pienhiukkasia on arviolta noin neljäs–viidesosa kokonaiskiintoainemassasta (23 % alle 8 µm:n kokofraktiosta, Moisio 1997). Tällöin ominaispäästö alle 2,5 µm:n pienhiukkasille on noin 5–6 mg/MJ.

Tampereen kaupungin ilmanlaatu on parantunut selvästi 1980-luvun alun tilanteesta. Syinä tähän ovat mm. Naistenlahden ykkösyksikön polttoainemuutos raskasöljystä vähärikkiseen turpeeseen, mikä pienensi erityisesti rikkipäästöjä. Toisaalta vuonna 1988 käyttöönotettu Lielahden kaasukombivoimalaitos vähensi Naistenlahden voimalaitosten vuosittaisia käyttötunteja ja näin myös hiukkaspäästöjä, sillä maakaasun poltossa ei kiintoaineita juurikaan muodostu. Myös typenoksidipäästöt ovat vähentyneet sen jälkeen, kun vuonna 1992 Lielahden voimalaitoksiin asennettiin low-NO<sub>x</sub>-polttimet. Vuonna 1995 Tampereen kaupunki-ilman PM10-pitoisuus oli vuosikeskiarvona 24 µg/m<sup>3</sup>.

## 6.2.2 Turpeen pölypolttokattilat kokoluokittain

### Turvepölykattilat kokoluokassa 50...300 MW

Polttoaineteholtaan 0...50 MW:n turvepölykattiloita ei Suomessa ole, joten ensimmäinen ryhmä käsittää turvepölylaitokset teholuokassa 50...300 MW<sub>pa</sub>. Kaikissa näissä kattiloissa on savukaasun puhdistuksessa käytetty sähkösuodatinta ja muutamassa on lisäksi esierottimena sykloni, joka kerää palamattoman aineksen jälkipolttorinalle. Ominaispäästöt on laskettu taulukossa 16.

Taulukko 16. Sähkösuodattimella tai syklonilla/multisyklonilla sekä sähkösuodattimella varustetut polttoaineteholtaan 50...300 MW:n turvepölykattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoainetehto (MW)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamismenetelmä
165	3854	44,0	1382,00	TURVE	epäsuora pölypoltto	93	52,4	Sähkösuodin Sykloni/multisykloni Muu palamisilman vaiheistus tulipesään
			196,00	POR1.9				
			197,00	MAAKAASU				
<b>YHT.</b>			<b>1775,00</b>	<b>TJ/a</b>				
220	5798	66,2	2634,00	TURVE	Sekoituspoltin	44	13,4	Sähkösuodin Muu palamisilman vaiheistus tulipesään
			262,00	POR1.9				
			396,00	MAAKAASU				
<b>YHT.</b>			<b>3292,00</b>	<b>TJ/a</b>				
197	8030	91,7	3702,00	TURVE	Suihkupoltin	82	20,0	Sähkösuodin Sykloni/multisykloni Yläilman syöttö (overfire air)
			72,00	POR2.3				
			320,00	PUU				
<b>YHT.</b>			<b>4094,00</b>	<b>TJ/a</b>				
118	4807	54,9	899,00	J TURVE	Sekoituspoltin	75,2	68,8	Sähkösuodin
			194,00	POR1.9				
<b>YHT.</b>			<b>1093,00</b>	<b>TJ/a</b>				
235	6935	79,2	4011,00	J TURVE	Suihkupoltin	30,6	7,1	Sähkösuodin
			210,00	POR1.9				
			87,00	PUU				
<b>YHT.</b>			<b>4308,00</b>	<b>TJ/a</b>				
230	7134	81,4	4656,00	TURVE	Sekoituspoltin	309	56,6	Sähkösuodin
			383,00	POR1.9				
			422,00	POR0.9				
<b>YHT.</b>			<b>5461,00</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>1165</b>	<b>36558</b>	<b>69,6</b>	<b>20023,00</b>	<b>TJ/a</b>		<b>633,8</b>	<b>31,7</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>						<b>33,5 mg/MJ</b>		

Käyttötunneilla painotetuksi yhteisominaispäästökseen vuonna 1995 saadaan 34 mg/MJ. Tämä ryhmä sisältää myös esimerkkilaitoksina käsitellyt Naistenlahden voimalaitosten ykkös- ja kakkosyksiköt.

#### Turvepölykattilat kokoluokassa 300...500 MW

Kokoluokassa 300...500 MW on vain yksi kattila, jonka käyttötiedot ja laskettu ominaispäästö on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Syklonilla ja sähkösuodattimella varustettu polttoaineteholtaan 300...500 MW:n turvepölykattila ja sen ominaispäästö (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKE:n VAHTI-järjestelmästä).

Polttoaine-teho (MW)	Käyttötun-nit (h/a)	Käyttö-aste (%)	Polttoaine-kulutus (TJ/a)	Polttoaine	Poltto-tekniikka	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
390	7891	90,1	10331,00	J TURVE	Sekoituspoltin	248	23,6	Low-Nox-polttimet, Sykloni/multisykloni, Sähkösuodin
			30,00	POR2.3				
			77,00	POR1.0				
			69,00	PUU				
<b>YHT.</b>			<b>10507,00</b>	<b>TJ/a</b>				
							23,6	mg/MJ

Kattilan ominaispäästökseen vuonna 1995 saadaan 24 mg/MJ. Jälleen huomataan sama ilmiö, joka esiintyi jo hiilipölykattiloilla: ominaispäästö pienenee kattilan yksikkökoon kasvaessa (tosin tässä on käytössä vain yksi suuremman kokoluokan kattila, joten vertailu on epävarmaa). Tämä on seurausta mm. kattilan hyötysuhteen paranemisesta kuten edellä jo todettiin.

### 6.2.3 Yhteenvedo turvepölykattiloiden ominaishiukkaspäästöistä

Taulukossa 18 on esitetty kootusti turpeen pölypolttokattilat sekä niiden ominaispäästöt (mg/MJ) hiukkasille. 50...300 MW:n turvepölykattiloiden ominaispäästö oli 33 mg/MJ. Samat savukaasun puhdistuslaitteet suuremmissa kokoluokassa (300...500 MW) johtivat pienempään ominaispäästöön (24 mg/MJ).

Taulukko 18. Yhteenvedo turvepölykattiloiden käyttötunneilla painotetuista ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ).

LAITOKSET (polttotekniikoittain ja kokoluokittain)	EROTUSLAITE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Turvepölylaitokset kokoluokassa 50 < P < 300 MW	Sähkösuodin (+ joissain: Sykloni/multisykloni)	6	33	mg/MJ
Turvepölylaitokset kokoluokassa 300 < P < 500 MW	Sykloni/multisykloni, Sähkösuodin	1	24	mg/MJ

### 6.3 ÖLJYKATTILAT

Voimalaitoskokoluokassa öljykattiloiden poltintekniikoita on käytössä pääasiassa kaksi erilaista: pyöriväkuppinen sekä painehajotteinen öljypoltin. Pyöriväkuppisia polttimia käytetään yleensä suurissa öljykattiloissa, kun taas painehajotteiset öljykattilat ovat etupäässä pienehköjä (0...10 MW). Esimerkiksi höyryhajotteisia öljypolttimia ei VAHTI-järjestelmän tietokannoista erikseen löytynyt, vaan ne on ilmeisesti sisällytetty painehajotteisiin öljypolttimiin tai sitten luokkaan "muu poltinpoltto", jota ei tässä työssä tarkastella.

Koska VAHTI-järjestelmään on koottu tietoja yli tuhannesta painehajotteisesta öljypolttimesta, taulukoidaan seuraavassa vain osa niistä (satunnainen otos). Sen sijaan kaikki pyöriväkuppiset öljypolttimet otetaan mukaan laskentaan (lukuun ottamatta prosessitiedoiltaan puutteellisia kattiloita, joita esiintyy VAHTI-järjestelmän tietokantojen kaikissa polttotekniikoissa).

Pölynerotuslaitteita ei öljypolttimissa pääsääntöisesti ole (lähinnä sykloni harvoissa yksittäistapauksissa), mutta raskaan polttoöljyn poltossa noin kolmannes kattiloista on varustettu vesiemulsiopoltteknikalla palamisen tehostamiseksi ja kiintoainepäästöjen vähentämiseksi, kuten luvussa 3.1.3 todettiin. Emulsiopoltossa hiukkaskojojakauman on todettu painottuvan pienempiin hiukkasiin kuin tavanomaisessa öljynpoltossa. Täten hiukkasmassaa mitattaessa huomataan hiukkaspäästön (t/a) pienentyneen vesiemulsiopoltossa, mutta hiukkasten lukumäärää ( $1/\text{cm}^3$ ) mitattaessa muutos ei ole niin suuri. Tämä merkitsee sitä, että pienhiukkasten osuus kokonaispäästöstä kasvaa emulsiopoltossa.

Esimerkkilaitosta öljykattilapoltosta ei käsitellä, koska pienhiukkasten kokojakamamittauksia ei ollut käytettävissä.

### 6.3.1 Painehajotteiset öljypolttimet

Taulukkoon 19 on koottu yhteenveto painehajotteisten öljypoltinkattiloiden otannasta. Kyseiset prosessit on listattu taulukoihin edellä totuttuun muotoon liitteessä 1. Lisäyksenä on pienin kokoluokka 0–5 MW, koska suurin osa kattiloista on pieniä. Koska kyseessä on vain tietty otos kaikkiaan yli tuhannesta prosessista, eivät taulukossa 19 esitetyt ominaispäästöt ole koko ryhmää edustavia, mutta antavat kuitenkin arvion hiukkaspäästöjen suuruudesta.

*Taulukko 19. Otos öljykattiloista, joissa on painehajotteiset öljypolttimet.*

LAITOKSET (kokoluokittain)	POLTTOAINE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Painehajotteiset öljypolttimet kokoluokassa $0 < P < 5$ MW	POR	99	56	mg/MJ
	POK	29	71	mg/MJ
Painehajotteiset öljypolttimet kokoluokassa $5 < P < 50$ MW	POR	48	27	mg/MJ
	POK	5	66	mg/MJ
Painehajotteiset öljypolttimet kokoluokassa $50 < P < 300$ MW (66 MW)	POR	1	30	mg/MJ

### 6.3.2 Pyöriväkuppiset öljypolttimet

Liitteessä 2 esitettyjen pyöriväkuppisten öljypoltinprosessien tiedot on koottu taulukkoon 20. Toisin kuin edellä painehajotteisten öljypoltinten tapauksessa, tämä taulukko sisältää kaikki pyöriväkuppiset öljypolttimet, joiden tiedot VAHTI-järjestelmässä olivat täydelliset. Myös pyöriväkuppisten öljypolttimien tarkastelussa erotetaan pienin kokoluokka 0–5 MW.

Taulukko 20. Yhteenvedo öljykattiloista, joissa on pyöriväkuppiset öljypolttimet.

LAITOKSET (koko luokittain)	POLTTOAINE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Pyöriväkuppiset öljypolttimet kokoluokassa 0 < P < 5 MW	POR	12	75	mg/MJ
Pyöriväkuppiset öljypolttimet kokoluokassa 5 < P < 50 MW	POR	82	33	mg/MJ
	POK	1	44	mg/MJ
Pyöriväkuppiset öljypolttimet kokoluokassa 50 < P < 300 MW (suurin 140 MW, keskim. teho 84,3 MW)	POR	12	17	mg/MJ

Taulukon 20 yksittäinen 12 MW:n kevyttä polttoöljyä käyttävä pyöriväkuppinen öljypoltin ei anna oikeata kuvaa edustamansa ryhmän hiukkaspäästöistä, sillä kevyen polttoöljyn poltossa kiintoainetta muodostuu yleensä noin kymmenesosa raskaan polttoöljyn polttoon verrattuna (Lammi ym. 1993). Tästä huomataan, että eri prosessien vertailtavuus on huono erityisesti niissä ryhmissä, joissa on käytävissä vain yhden kattilan tiedot. Syinä eroihin ovat mm. polttoainelaatujen erot sekä palamisolosuhteiden vaihtelut eri kattiloissa, mutta myös hiukkaspäästön määritysmenetelmien monimuotoisuus sekä epätarkkuudet mittauksissa.

### 6.4 KUPLIVAT LEIJUKERROSKATTILAT (BFB)

Normaalipaineiset leijupetikattilat käsitellään kupliviin leijupeteihin (BFB, bubbling fluidized bed) sekä kiertoleijupeteihin (CFB, circulating fluidized bed, kappale 6.5) jaoteltuina. Laajan polttoainevalikoiman takia näistä leijupetityypeistä esitetään yhteenvedotaulukot: tarkemmat taulukot ovat liitteessä 3. Lisäksi kummastakin leijukerrosprosessista käydään läpi esimerkkilaitos. Paineistettua leijupolttua ei tässä käsitellä, koska vuonna 1995 ei kyseistä tekniikkaa käytetty kuin tutkimustyötä varten rakennetuissa koekattiloissa (VAHTIn mukaan) eikä kotimaisia mittaustuloksia hiukkaspäästöistä ole käytävissä.

Kupliva leijukerrostekniikka on pääasiallinen tekniikka biomassaa polttavissa energialaitoksissa. BFB-tekniikka on mahdollistanut pientenkin yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantolaitosten taloudellisen käytön, koska hyvinkin erilaatuisia polttoaineita voidaan polttaa kattilan tehokkaan lämmönsiirron vuoksi. Biomassavoimalaitokset ovat taloudellisesti houkuttelevia etenkin silloin, kun polttoaine saadaan voi-

malaitoksen läheltä, esimerkiksi oman kunnan alueelta, mikä lisää myös työllisyysvaikutusta.

### 6.4.1 Esimerkki kuplivasta leijupetikattilasta: Kiimassuon voimalaitos

Kiimassuon voimalaitoksessa on 66 MW:n kupliiva leijupetikattila. Laitos on otettu käyttöön 1.10.1996, joten tässä yhteydessä tarkastellaan poikkeuksellisesti vuoden 1997 hiukkaspäästöjä vuoden 1995 sijasta.

Kiimassuon voimalaitos tuottaa sähköä (17 MW) ja kaukolämpöä (48 MW) yhdistettynä energiantuotantona. Pääpolttoaineina ovat puuperäiset polttoaineet hake, kuori ja puru. Lisäksi laitos käyttää turvetta viidestä kymmeneen prosenttia kokonaispolttoainemäärästä alkuperäisen suunnitelman vastaisesti sekä myös vähän yhdyskuntajätettä. Turve jouduttiin ottamaan lisäpolttoaineeksi leijupedin alkaalisuuden vuoksi. Petimateriaalina on hiekka.

Kattilalaitos on varustettu yksikammioisella, kaksikenttäisellä sähkösuodattimella. Savukaasussa on hiukkasia 12 g/m<sup>3</sup>n ja suodattimen jälkeen valmistajan arvo takuupolttoaineilla on 50 mg/m<sup>3</sup>n, joten suodattimen erotusaste on yli 99,5 % (Energia 10/1996). Laitoksen ympäristölupa määrittelee sallitun arvon tälle tasolle (50 mg/m<sup>3</sup>n eli n. 16 mg/MJ, kun savukaasun O<sub>2</sub>-pitoisuus = 3 %).

Vuonna 1997 Kiimassuon voimalaitos oli käytössä 7 750 tuntia. Taulukossa 21 on esitetty laitoksen prosessitiedot ja niistä laskettu ominaishiukkaspäästö.

Taulukko 21. Kiimassuon voimalaitoksen hiukkaspäästöt vuonna 1997 (Hämeen ympäristökeskus).

P.a.-teho (MW) (*)	Käynti-aika (h/a) (*)	Käyttöaste (%)	P.a.-kulutus (TJ/a) (*)	Polttoaine (*)	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka (*)	Päästö (t/a) (*)	Omin.päästö (mg/MJ(pa))	Rajoittamismenetelmä (*)
66	7750	88,5	285,68	HAKKE	41,9	kupliiva leijupeti	2,955	4,3	Sähkösuodin
			175,85	KUORI	25,8				
			135,70	PURU	19,9				
			74,17	TURVE	10,9				
			7,39	REF (**)	1,1				
			2,75	POR0.5	0,4				
		YHT.	681,54	TJ/a	100,0			4,3	mg/MJ(pa)

(\*) Ympäristönsuojelun vuosiyhteenvetolomake, Kiimassuon voimalaitos 1997, Hämeen ympäristökeskus

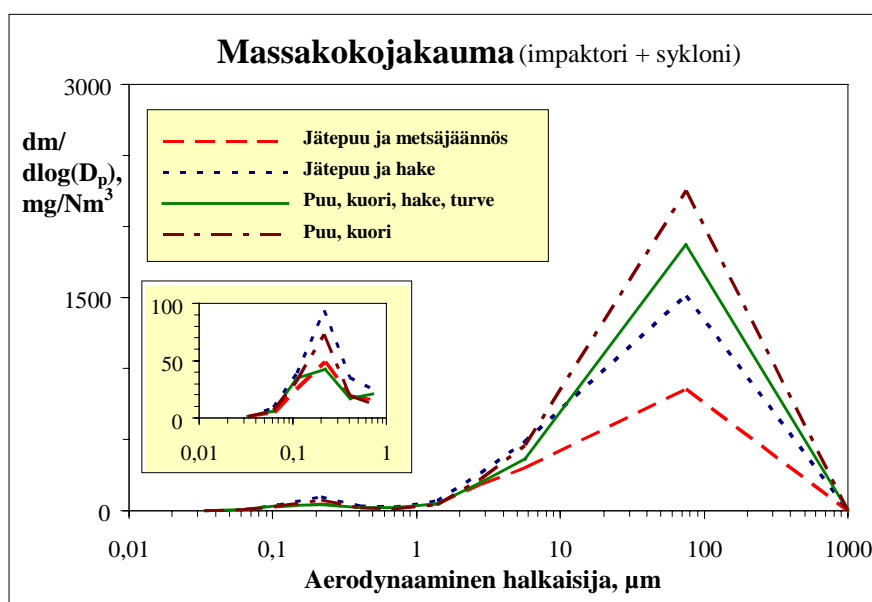
(\*\*) REF = yhdyskuntajäte, syntypaikkalajittelu

Leijupetikattilan hiukkaspäästö v. 1997 oli n. 3 000 kg (määritetty ainetaseesta). Kun polttoaineita käytettiin yhteensä 681,54 TJ, saadaan ominaishiukkaspäästökseen noin 4 mg/MJ<sub>pa</sub>, joten laitoksen päästöraja alitettiin reilusti.

Kiimassuon voimalaitoksen sähkön ja lämmön yhteistuotanto vuonna 1997 oli 187,5 GWh, joten hiukkaspäästökseen tuotettua energiayksikköä kohti saadaan noin 16 g/MWh (16 mg/kWh).

Kiimassuon kuplivan leijupetikattilan savukaasuista mitattu massakokojakauma on esitetty kuvassa 22 neljällä eri puuperäisellä polttoaineyhdistelmällä (Kurkela ym. 1998b). Huomataan, että myös kuplivan leijupetipolton yhteydessä muodostuvien hiukkasten kokojakauma on kaksihuippuinen aivan kuten kivihiilen ja turpeen pölypoltossakin. Pienhiukkasmoodi 0,2  $\mu\text{m}$ :n kohdalla on muodostunut tiivistymällä ja koostuu alkalisulfaateista ja klorideista. Karkea hiukkasmoodi sisältää merkittävän osan happea. Lisäksi siinä esiintyy piitä, kalsiumia, alumiinia, kaliumia, rautaa ja natriumia. (Kurkela ym. 1998b).

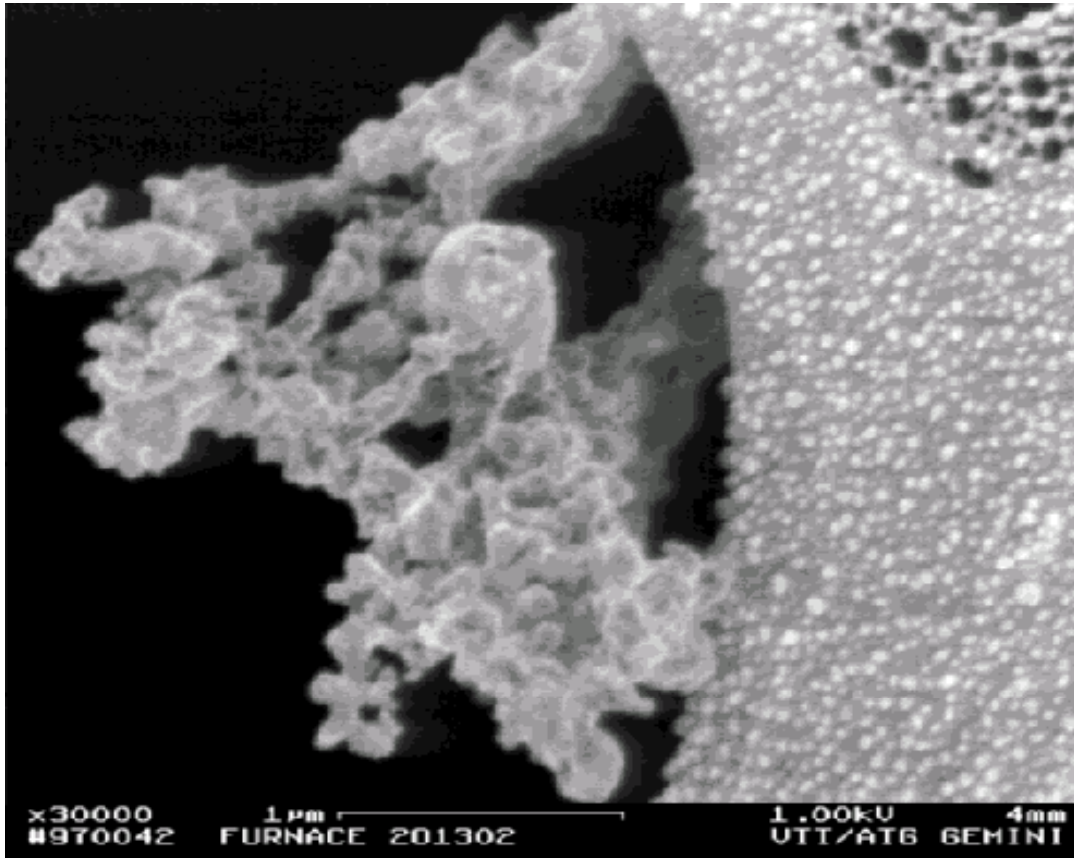
PM10-hiukkasten ja PM2.5-pienhiukkasten osuutta on vaikea arvioida, koska mitaustuloksia samankaltaisten kuplivilien leijupetien savukaasuista erotuslaitteiden jälkeen ei ollut käytettävissä. Mittauksia on kyllä tehty, mutta niiden tulokset eivät ole julkisia.



Kuva 22. Kuplivan leijupedin (BFB) puuperäisten polttoaineiden aiheuttama massapitoisuus savukaasussa ennen pölynerotuslaitteita (Kurkela ym. 1998b). Pienhiukkasmoodi 0,2  $\mu\text{m}$ :n kohdalla on esitetty suurennettuna.

Yksittäisten tuhka hiukkasten muotoa voidaan tarkastella elektronimikroskooppikuvasta (kuva 23). Yli mikrometrin kokoiset hiukkaset ovat pääasiassa agglomeroituneita, kun taas alle mikrometrin kokoiset pienhiukkaset ovat pyöreitä. Agglomeraatit ovat muodostuneet halkaisijaltaan 50 nm:stä yhteen mikrometriin kokoisista primäärihiukkasista. (Kurkela ym. 1998a, 1998b).





*Kuva 23. Elektronimikroskooppikuva kuplivassa leijupetikattilassa muodostuneesta agglomeraatista (vasemmalla) puuperäisiä polttoaineita poltettaessa. Kirkkaat pisteet oikealla ovat pienhiukkasia (alle 100 nm = 0,1 μm), jotka ovat muodostuneet alkalisulfaattien ja kloridien tiivistyessä (Kurkela ym. 1998a).*

#### **6.4.2 Yhteenveto BFB-prosessien ominaishiukkaspäästöistä**

Kuplivat leijupetikattilat on jaoteltu kokoluokittain pääpolttoaineen ja pölynerotuslaitteiden mukaisesti ryhmiin. Näiden ryhmien prosessitiedot sekä lasketut ominaispäästöt hiukkasille on taulukoitu liitteeseen 3. Yhteenveto kaikista BFB-prosesseista on koottu taulukkoon 22. Enemmän kuin yhden kattilan sisältävien ryhmien ominaishiukkaspäästö on laskettu kattiloiden käyttötunneilla painotettuna.

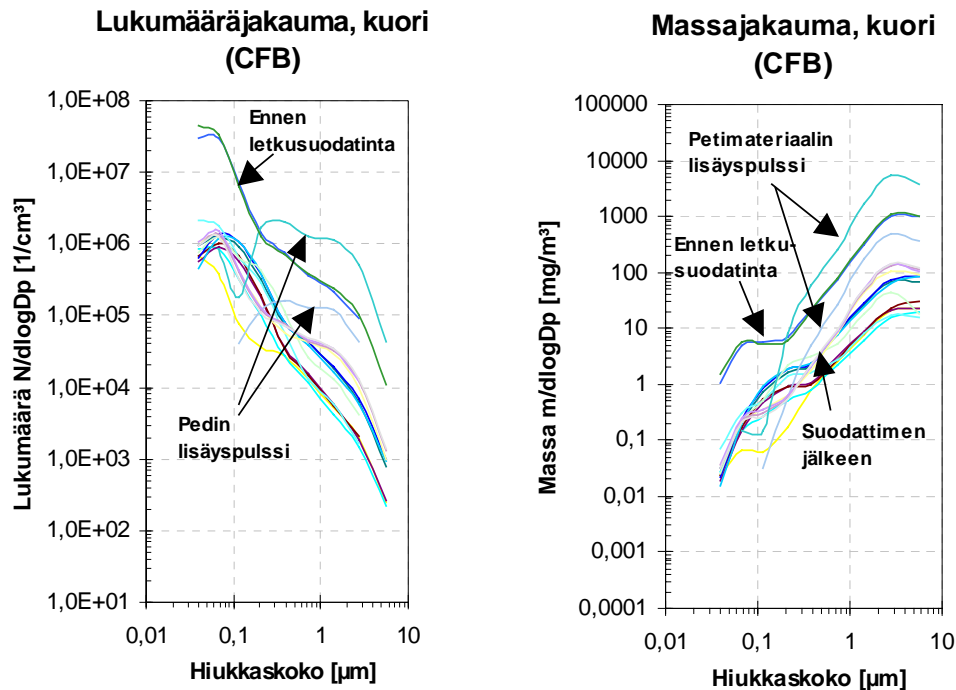
Taulukko 22. Yhteenveto kuplivien leijupetikattiloiden (BFB) ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ) vuonna 1995.

KATTILAT (kokoluokittain)	PÄÄPOLTTO- AINE	EROTUSLAITE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Kuplivat leijupetikattilat kokoluokassa 0 < P < 50 MW	Turve	Sykloni/multisykloni	1	713	mg/MJ
		Sykloni/multisykloni, Kuitusuodin	1	80	mg/MJ
		Sähkösuodin	6	23	mg/MJ
		Sähkösuodin, Pesuri	1	7	mg/MJ
	Puu	Sähkösuodin	1	52	mg/MJ
	Hake	Sykloni/multisykloni, Kuitusuodin	2	181	mg/MJ
	Puru	Sähkösuodin	1	10	mg/MJ
	POR	Sähkösuodin, Pesuri	1	160	mg/MJ
	Kivihiili	Sähkösuodin, Sykloni/multisykloni	1	21	mg/MJ
Kuplivat leijupetikattilat kokoluokassa 50 < P < 300 MW	Turve	Sykloni/multisykloni	1	14	mg/MJ
		Sähkösuodin	4	25	mg/MJ
	Puu/Puujäte	Sähkösuodin	3	38	mg/MJ
	Kuori	Sähkösuodin, Sykloni/multisykloni	1	22	mg/MJ
		Sekapoltto	Sykloni/multisykloni	1	4
		Sähkösuodin	1	5	mg/MJ
Kuplivat leijupetikattilat kokoluokassa 300 < P < 500 MW	ei ole		-		

Yleisin prosessi kuplivissa leijupetikattiloissa on sähkösuodattimella varustettu turpeen poltto, jolla päästään melko alhaiseen hiukkaspäästöön (n. 25 mg/MJ). Puupe-  
räisten polttoaineiden käyttö näyttää johtavan yleensä hieman suurempiin ominais-  
päästöihin, mutta kuten edellä tuli jo ilmi, vain yhden kattilan tiedot sisältävien ryh-  
mien vertailtavuus on huono. Kun erotuslaitteena on pelkkä sykloni, voivat hiukkas-  
päästöt olla varsinkin pienissä kattiloissa todella suuria (lähes 1 g/MJ), jos palamis-  
prosessissa esiintyy vähänkin ongelmia ja kattilan käytettävyys on huono.

## 6.5 KIERTOLEIJUKERROSKATTILAT (CFB)

Samoin kuin BFB-prosesseissa myös kiertoleijupoltossa muodostuu kaksimoodiset  
hiukkaskokojakaumat. Kuvassa 24 on esitetty kuorta polttavan CFB-pilotin (Foster  
Wheeler) hiukkasille mitatut lukumäärä- ja massapitoisuudet ennen letkusuodatinta  
ja sen jälkeen. Pitoisuudet pienenevät noin kaksi kertaluokkaa ja ovat suodattimen  
jälkeen keskimäärin  $3,1 \cdot 10^5$  1/cm<sup>3</sup> (lukumäärä) ja 146 mg/m<sup>3</sup> (massa) (Moisio  
1997). Sekä hiukkaskokojakauma että -pitoisuus vaihtelevat petilämpötilan ja var-  
sinkin petimateriaalin lisäyksen suhteen. Kuten kuvasta 24 hyvin selvästi näkyy, pe-  
timateriaalin lisäys pölläyttää paljon 0,2–5 µm:n hiukkasia savukaasun mukaan jol-  
loin yli 0,2 µm:n hiukkaspitoisuudet kohoavat merkittävästi. Vakioajoparametreilla  
jakaumat ja pitoisuus pysyvät kuitenkin tasaisena kuten pölypoltossakin.



Kuva 24. Kuorenpolton kiertoleijupedistä letkusuodatinta ennen ja sen jälkeen mitatut (ELPI,  $D_p < 8 \mu\text{m}$ ) hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997). Petimateriaalin lisäyspulssi tarkoittaa kattilassa kiertävän leijutushiekan korvaamista uudella inertillä hiekalla (osa petihiekasta myös poistuu savukaasun mukana kattilasta).

### 6.5.1 Esimerkki kiertopetikattilasta: Ahlströmin Pyroflow (Kemira Pigments Oy, Pori)

Kemira Pigments Oy:n voimalaitos koostuu Pyroflow-kiertopetikattilasta sekä kolmesta raskasöljykattilasta. Pyroflow-kattilan polttoaineteho on 87 MW ja polttoaineena käytetään kivihiiltä (puolalainen, venäläinen ja eteläafrikkalainen). Kattila perustuu kiertopetiteknikkaan, jossa polttoaine palaa tulipesässä leijuvassa kalkkikivihiekassa. Hiekka leijuu ja kiertää kattilassa palamisilmapuhaltimen avulla. Se erotetaan kuumista savukaasuista syklonissa ja palautetaan kattilan tulipesän alaosaan, missä siihen syötetään sopivaan raekokoon murskattu polttoaine. Palamisessa muodostuvat savukaasut johdetaan tulistimien ja lämmönvaihtimien läpi kolmikenttiseen sähkösuodattimeen ja sen jälkeen 130 metriä korkeaan tehdaspiippuun.

Vuonna 1995 Pyroflow-kattila oli käytössä 8 160 tuntia. Taulukossa 23 on esitetty koko voimalaitoksen kattilatiedot ja niistä lasketut ominaishiukkaspäästöt.

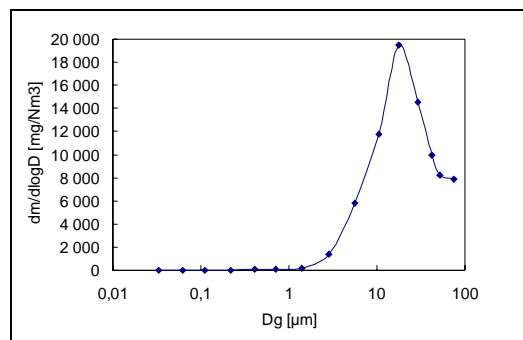
Taulukko 23. Pyroflow-kiertopetikattilan (k1) ja koko Kemira Pigments Oy:n voimalaitoksen prosessitiedot sekä niistä lasketut ominaishiukkaspäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) vuonna 1995 (Suomen ympäristökeskus).

Osapros.-tunnus	Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
k1	87	2100,5	KHHL0.6	92,4	Kiertopeti (Pyroflow)	8160	93,2	60	26,4	Sähkösuodin
		160,0	MUUT	7,0						Sykloni/multisykloni Absorbenttiin syöttö tulipesään
		13,3	POR0.9	0,6						
		<b>Yhteensä:</b>	<b>2273,8</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,0</b>					
k2	28	83,3	POR0.9	100,0	Pyörivä-kuppinen öljypoltin	648	7,4	öljykattiloilla yhteinen hiukkaspäästö		
k3	44	68,4	POR0.9	100,0	Pyörivä-kuppinen öljypoltin	1800	20,5	10	23,0	
k4	32	283,7	POR0.9	100,0	Pyörivä-kuppinen öljypoltin	4940	56,4	(öljykattiloilla yhteinen savupiippu)		
<b>YHT.</b>	<b>191</b>	<b>2709,2</b>	<b>TJ/a</b>			<b>15548</b>	<b>44,4</b>	<b>70</b>	<b>25,8</b>	<b>mg/MJ</b>

Kiertoleijupetikattilan hiukkaspäästö v. 1995 oli 60 tonnia (määrittämissuunnitelman yksittäismittaukset ja käyntiaikataarkkailu). Kun polttoaineita käytettiin yhteensä 2 273,8 TJ, saadaan ominaishiukkaspäästökseen noin 26 mg/MJ<sub>pa</sub>. Kattilan päästöraja 25 mg/MJ<sub>pa</sub> ylitettiin hieman. Myös vuonna 1996 Pyroflow-kattilan ominaishiukkaspäästö oli samaa luokkaa (25,7 mg/MJ<sub>pa</sub>).

Koko voimalaitoksen sähkön ja tehdashöyryn yhteistuotanto vuonna 1995 oli 925,8 GWh, joten hiukkaspäästökseen tuotettua energiayksikköä kohti saadaan noin 76 g/MWh (76 mg/kWh).

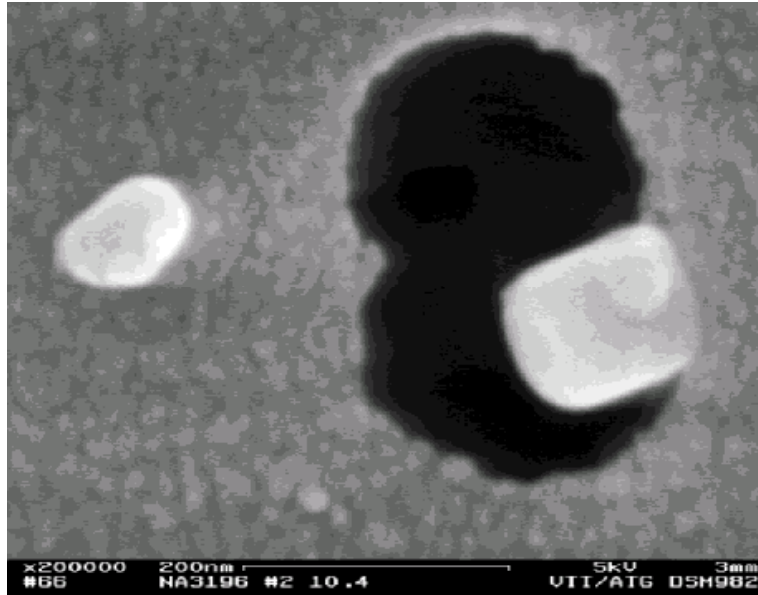
Kuvassa 25 on hiukkasten kokojakauman mittaustulos kyseiseltä Pyroflow-kattilalta. Hiukkaspitoisuus ennen polynerottimia on jopa 20 g/m<sup>3</sup>n. Tämä suurin pitoisuus esiintyy n. 20 µm:n hiukkaskoolla. Hiukkaspäästökseen, ts. suodatinten jälkeisestä hiukkaspitoisuudesta, ei ole tehty mittauksia, joten pienhiukkasten osuutta ei tiedetä.



Kuva 25. Kivihien kiertoleijupolton (Pyroflow-kattila) hiukkaspitoisuus ennen polynerotinta (Lind ym. 1995)

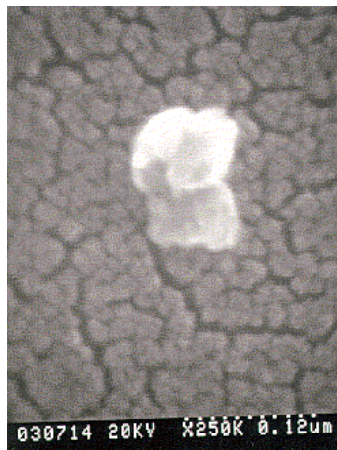
Kuvassa 26 on esitetty elektronimikroskooppikuva pienhiukkasista, jotka ovat muodostuneet metsätähdettä (hakuujätettä) polttavassa kiertoleijupetikattilassa. Pienhiukkaset ovat lähes pyöreitä ja niiden halkaisijat ovat n. 0,1 µm:n luokkaa.

Pienhiukkaset ovat muodoltaan ja kooltaan samankaltaisia kuin edellä esitettyssä kuplivan leijupedin tapauksessakin (kuva 23), jossa myös oli käytetty puuperäisiä polttoaineita.



*Kuva 26. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) metsätähdettä polttavasta CFB-kattilasta syntyneistä pienhiukkasista (Valmari ym. 1998).*

Kivihiilen poltossa kiertopetikattilassa muodostunut pienhiukkanen on puolestaan esitetty kuvassa 27.



*Kuva 27. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) kivihiiltä polttavasta CFB-kattilasta syntyneestä pienhiukkasesta (Lind ym. 1996).*

## 6.5.2 Yhteenveto CFB-prosessien ominaishiukkaspäästöistä

Kiertoleijupetikattilat on jaoteltu kokoluokittain pääpolttoaineen ja polynerotuslaitteiden mukaisiin ryhmiin. Näiden ryhmien prosessitiedot sekä lasketut ominaispäästöt hiukkasille esitetään taulukoituina liitteessä 4. Yhteenveto kaikista CFB-prosesseista on koottu taulukkoon 24.

Taulukko 24. Yhteenveto kiertoleijupetikattiloiden (CFB) ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ<sub>pa</sub>) vuonna 1995.

KATTILAT (kokoluokittain)	PÄÄPOLTTO- AINE	EROTUSLAITE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Kiertopetikattilat kokoluokassa 0 < P < 50 MW	Kivihili	-	1	12	mg/MJ
	POK	Sykloni/multisykloni	1	72	mg/MJ
	Kuori	Sykloni/multisykloni	1	36	mg/MJ
	Turve	Sähkösuodin	2	68	mg/MJ
	Sekapoltto	Sykloni/multisykloni, Kuitusuodin	1	87	mg/MJ
Kiertopetikattilat kokoluokassa 50 < P < 300 MW	Kivihili	Sähkösuodin	2	24	mg/MJ
	Puu/Puujäte	Sähkösuodin	4	14	mg/MJ
	Turve	Sähkösuodin	3	14	mg/MJ
Kiertopetikattilat kokoluokassa 300 < P < 500 MW	Turve	Sähkösuodin, Sykloni/multisykloni	1	4	mg/MJ

Myös kiertopetikattilaprosesseissa turpeen käyttö pääpolttoaineena ja savukaasujen puhdistaminen sähkösuodattimessa on yleisin menetelmä. Hiukkasten ominaispäästöt pienenee kattilakoon suurentuessa (esim. turve: 68, 14 ja 4 mg/MJ).

## 6.6 ARINAKATTILAT

VAHTI-järjestelmän tietokannoissa arinakattiloita ei ole jaettu eri arinatyyppisiin, vaan ne ovat kaikki samassa ryhmässä. Koska arinakattilat ovat pääosin pieniä kattiloita, niin tässä yhteydessä tehdään poikkeus kokoluokitteluun (samoin kuin öljykattiloilla) siten, että ensimmäinen ryhmä käsittää arinakattilat kokoluokassa 0...5 MW ja seuraava 5...50 MW (muissa polttotekniikoissa 0...50 MW, mutta niissä kokoluokka sisältää vain yksittäisiä 0...5 MW:n kattiloita).

Esimerkkilaitosta arinakattilatekniikasta ei käsitellä, koska pienhiukkasten kokoja-kaumamittauksia ei ollut käytettävissä. Myöskään hengitettävien hiukkaspäästöjen ja pienhiukkaspäästöjen määrästä (PM10 ja PM2.5) ei arinakattiloiden osalta ole luotettavaa materiaalia. Toisaalta arinakattilat ovat suuremmissa kokoluokissa syrjäytymässä vähäpäästöisemmän leijukerrostekniikan tieltä, joten tulevaisuudessa arinakattilatekniikkaa käytettäneen pääasiassa enää jätteenpoltossa ja pienpoltossa (esim. asuntojen lämmitys). Pienpoltto on kuitenkin merkittävä tutkimuskohde ihmisten terveyden kannalta, sillä juuri pienpoltossa epäedulliset palamisolosuhteet sekä puhdistamattoman savukaasun matala päästökorkeus saattavat aiheuttaa paikallisesti korkeitakin hiukkaspitoisuuksia (esimerkiksi taajamat, joissa asunnoissa on kattilalämmitys). Hiukkaskokojakaumien ja pienhiukkaspäästö määrrien selvittämi-

nen pienpoltossa on tärkeää ajatellen ennaltaehkäisevää terveydenhuoltoa. Mittaukset edistävät osaltaan pienkattilatoimittajia suunnittelemaan vähäpäästöisempiä tulisijoja sekä kehittämään tehokkaasti toimivia savukaasun suodatinlaitteita, jotka pystyisivät poistamaan savukaasun kiintoainepäästöistä terveydelle haitallisimman kokofraktion (PM<sub>2.5</sub>-pienhiukkaset) mahdollisimman hyvin.

### 6.6.1 Pienpoltto

Tyypillistä pienkattiloille on niiden rakenteen monenkirjaisuus. Myös polttoainevaihtoehdot ovat nykyään hyvin monipuoliset, jolloin polttoaineen laatukin vaihtelee runsaasti. Tällöin on ilmeistä, että tutkimuksella pystytään selvittämään vain osa tyypillisistä tilanteista. Lisäksi kenttämittaukset omakotitaloissa ovat hankalia jo pelkästään mittalaitteiden tila- ym. tarpeiden takia. Tämän vuoksi mittauksia on tähän asti suoritettu lähinnä laboratorio-olosuhteissa, jotka ovat yleensä optimaaliset tulisijan palamistapahtumaa ajatellen. Todellisissa käyttötilanteissa olosuhteet vaihtelevat hyvin paljon käytetyn polttoaineen laadun (lähinnä kosteus) mukaan sekä sen mukaan, miten lämmittäjä käyttää kattilaa. Tällöin myös poltosta syntyvät haitalliset päästöt voivat olla moninkertaisia laboratoriossa tehtyihin takuu- ja hyötysuhdemittauksiin verrattuna.

Hahkala ym. (1986) ovat suorittaneet pienkattilamittauksia laboratorio-olosuhteissa päästöjen ja hyötysuhteiden selvittämiseksi. Kaikki seuraavaksi esitettävät tulokset ovat kyseisestä tutkimuksesta. Polttoaineina tutkimuksessa käytettiin koivuhalkoja, turvepellettejä, turvebrikettejä, haketta, PDF-pellettejä ja puupuristetta.

Alapaloperiaatteella toimivissa pienkattiloissa (4 kpl eri toimittajilta) hiukkasten päästöt olivat 4–500 mg/MJ. Suurimpien päästöjen oletettiin johtuvan korkeassa lämpötilassa (> 200 °C) höyrystyvien hiilivetyjen suuresta määrästä, sillä suurin hiukkaspäästö esiintyy samanaikaisesti suurimman tervapäästön kanssa. Hiilivetypäästöt (muut kuin hiilimonoksidi) olivat 420–3 600 mg/MJ ja tiivistyvän tervan päästöt olivat 1,2–1 200 mg/MJ. Häkäpäästöt (CO) olivat suuria alapalokattilan periaatteessa hyvästä palamisilman sekoittumisesta huolimatta. Häkäpitoisuus oli suurimmillaan yli mittalaitteen asteikon (> 25 g/m<sup>3</sup>). Häkäpäästöt sisäänvietyä energiamäärää kohti olivat 3–10 g/MJ. Kaikkien palamattomien päästöjen vaihteluvälit ovat merkittävän suuria laboratorio-olosuhteista huolimatta. (Hahkala ym. 1986).

Yläpaloperiaatteella toimivissa pienkattiloissa koko polttoainepanos kerrallaan käy läpi palamisen eri vaiheet. Palamisen jaksottaisuuden vuoksi yläpalokattiloissa syntyy enemmän PAH-yhdisteitä, vaikka palamattomien aineiden määrä on keskimäärin samansuuruinen kuin alapalokattiloissa. (Hahkala ym. 1986).

Jatkuvatoimisella ruuvisyötöllä varustetuissa pienkattiloissa palaminen tapahtuu ruuvin päässä. Palamisilma puhalletaan erillisellä puhaltimella ruuvin ja polttoaineen lävitse. Palaminen on tehokasta hyvän sekoittumisen vuoksi. Palamattomien aineiden päästö energiayksikköä kohti on ruuvisyötössä pienempi kuin arinoilla varustetuissa ala- tai yläpalokattiloissa. Parhaimmillaan päästöt energiayksikköä

kohti ovat samaa suuruusluokkaa kuin aluelämpökokoluokan kattiloilla. (Hahkala ym. 1986).

PAH-yhdisteiden päästöt vaihtelivat suuresti eri kattilatyypeillä ja eri polttoaineilla. Suurimmillaan PAH-yhdisteiden päästö oli turvebriketeillä 24 mg/MJ, joka on 500–5 000 kertaa suurempi arvo kuin turvetta tai kivihiiltä polttavien voimalaitosten PAH-päästöt. Yleensä kevyet PAH-yhdisteet esiintyvät kaasumaisessa muodossa ja raskaammat yhdisteet hiukkasiin sitoutuneina. (Hahkala ym. 1986).

## **6.6.2 Arinakattilat kokoluokittain**

### Arinakattilat kokoluokassa 0...5 MW

Kaikissa tarkastelun kohteena olleissa kokoluokan 0...5 MW:n arinakattiloissa savukaasujen puhdistuksessa on käytetty sykklonia tai multisyklonia. Pääpolttoaineita oli käytössä kahdeksan erilaista, joista neljä oli puuperäisiä polttoaineita (puu/puujäte, puru, hake, kuori). Muut olivat kivihiili, turve sekä kevyt ja raskas polttoöljy. Prosessitiedot on esitetty taulukoituna liitteessä 5. Ominaishiukkaspäästöt ovat pääosin luokkaa 100–200 mg/MJ lukuun ottamatta sairaalajätteen polttoarinoita (2 kpl), joissa tukipolttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä (POK). Näiden ominaishiukkaspäästö vuonna 1995 oli peräti 1 198 mg/MJ, mikä ei johdu kevyestä polttoöljystä vaan nimenomaan sairaalajätteen poltosta muodostuvasta pölystä.

### Arinakattilat kokoluokassa 5...50 MW

Myös kokoluokan 5...50 MW:n arinakattiloissa oli käytössä samat kahdeksan pääpolttoainetta kuin edellä (liite 6). Pölynerotus on kuitenkin suoritettu jo monella eri laitteella. Syklonin tai multisyklonin omaavissa prosesseissa ominaishiukkaspäästöt ovat hieman alhaisemmat kuin edellisessä kokoluokassa ollen välillä 41...158 mg/MJ. Kun erotuslaitteena on sähkösuodatin, saadaan ominaishiukkaspäästöksi 3...25 mg/MJ. Pelkän pesurin käyttö yhdessä turve- ja kolmessa puu/puujäte-käytössä arinakattilaprosessissa johti ominaispäästöihin 10 mg/MJ ja 142 mg/MJ, joten vaihtelua on jo melko paljon. Tosin arinakattiloissa palamisolosuhteet saattavat vaihdella paljonkin sekä eri kattiloiden välillä että myös yhden kattilan eri osissa, koska arinakattilan säätö on huomattavasti vaikeampaa kuin esimerkiksi leijukerroskattilan. Arinakattiloissa seurataan yleensä vain savukaasun happiprosenttia, kun leijukerroskattiloissa mitataan lisäksi mm. pedin lämpötilaa ja kattilan painetta. Tämän vuoksi arinakattiloissa päästöt voivat vaihdella hetkellisesti paljonkin verrattuna vakaampiin leijukerrosprosesseihin.

Kivihiiilen arinapoltossa näkyy selvimmin pölynerotuslaitteiston merkitys, sillä ilman puhdistuslaitteita ominaispäästö oli 480 mg/MJ, syklonierottimilla 41 mg/MJ ja sähkösuodattimilla enää 14 mg/MJ.



### Arinakattilat kokoluokassa 50...300 MW

Kokoluokassa 50...300 MW on pääpolttoaineina käytetty kivihiltä, puuta/puujätettä, turvetta, kuorta ja raskasta polttoöljyä. Lisäksi on sekapolttoarinoita. Sekapoltoiksi on luettu vain ne tapaukset, joissa millään polttoaineella ei ole yli 50 prosentin osuutta polttoainevalikoimasta eikä näin ollen voida nimittää mitään polttoainetta pääpolttoaineeksi. Arinakattiloiden prosessitiedot on esitetty liitteessä 7.

Tässä kokoluokassa yleisin pölynerotukseen käytetty laite on sähkösuodatin. Ominaishiukkaspäästöt vaihtelevat eri polttoaineilla välillä 9...55 mg/MJ. Sykloneilla yksin tai yhdessä pesurin kanssa päästään päästötasoihin 166 mg/MJ ja 93 mg/MJ.

### **6.6.3 Yhteenveto arinakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä**

Taulukkoon 25 on koottu kaikki arinakattilaprosessit kokoluokittain ja pääpolttoaineittain sekä lasketut ominaispäästöt (mg/MJ). Kyseisten arinakattiloiden prosessitiedot ja lasketut ominaishiukkaspäästöt on esitetty liitteissä 5–7. VAHTI-järjestelmän tietokannoissa osa prosessitiedoista (n. 0–10 % polttotekniikasta riippuen) on puutteellisia, joten esimerkiksi käyttötuntien puuttuminen merkitsee sitä, ettei kyseinen kattila ole mukana käyttötunneilla painotetuissa ominaispäästölaskelmissa.

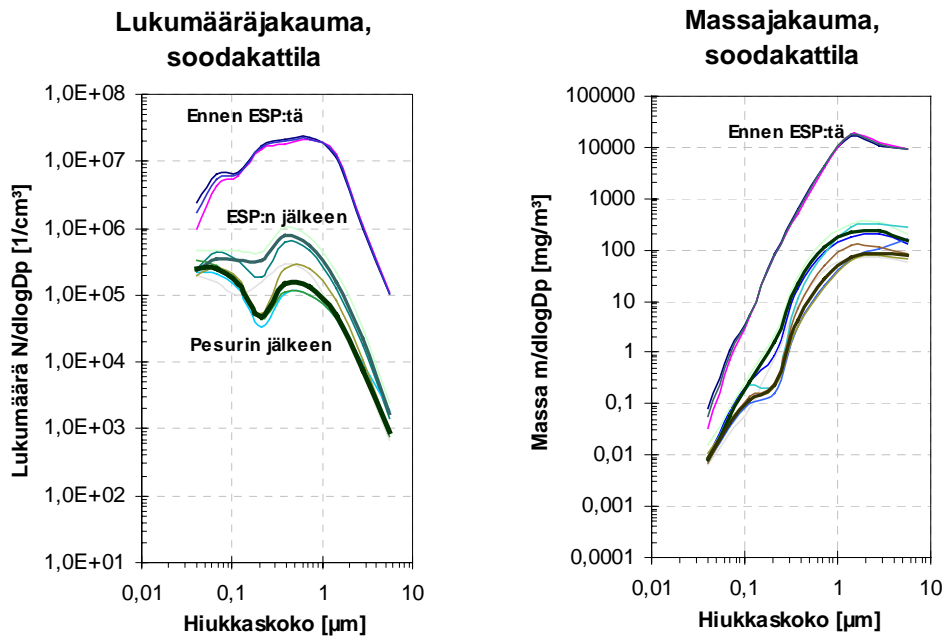
Taulukko 25. Yhteenveto arinakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ<sub>pa</sub>).

KATTILAT (polttoaineittain ja kokoluokittain)	PÄÄPOLTTOAINE	EROTUSLAITE	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Arinakattilat kokoluokassa 0 < P < 5 MW	Puu/Puujäte	Sykloni/multisykloni	25	177	mg/MJ
	Kivihiili	Sykloni/multisykloni	1	117	mg/MJ
	Turve	Sykloni/multisykloni	10	138	mg/MJ
	Puru	Sykloni/multisykloni	8	117	mg/MJ
	Hake	Sykloni/multisykloni	7	194	mg/MJ
	Kuori	Sykloni/multisykloni	6	149	mg/MJ
	POR	Sykloni/multisykloni	3	100	mg/MJ
	(POK) Sairaalaajäte!	Sykloni/multisykloni	2	1198	mg/MJ
Arinakattilat kokoluokassa 5 < P < 50 MW	Puu/Puujäte	-	3	148	mg/MJ
		Sykloni/multisykloni	14	149	mg/MJ
		Pesuri	3	142	mg/MJ
		Sähkösuodin	5	25	mg/MJ
	Kivihiili	-	2	480	mg/MJ
		Sykloni/multisykloni	3	41	mg/MJ
		Sähkösuodin	4	14	mg/MJ
	Turve	Sykloni/multisykloni	4	112	mg/MJ
		Pesuri	1	10	mg/MJ
	Puru	Sähkösuodin	1	3	mg/MJ
	Hake	Sykloni/multisykloni	2	158	mg/MJ
	Kuori	Sykloni/multisykloni	2	75	mg/MJ
	POR	Sykloni/multisykloni	2	147	mg/MJ
		Sähkösuodin	2	8	mg/MJ
	POK	Sykloni/multisykloni	1	71	mg/MJ
	Arinakattilat kokoluokassa 50 < P < 300 MW  (suurin arinakattila 170 MW)	Puu/Puujäte	Sykloni/multisykloni (+ toisessa pesuri)	2	93
Sähkösuodin (+ kahdessa pesuri)			5	55	mg/MJ
Kivihiili		Sykloni/multisykloni	2	166	mg/MJ
		Sähkösuodin	6	57	mg/MJ
Turve		Sähkösuodin	1	9	mg/MJ
Kuori		Sähkösuodin	1	36	mg/MJ
POR		Sähkösuodin	1	53	mg/MJ
Sekapoltto	Sähkösuodin	2	26	mg/MJ	
Arinakattilat kokoluokassa 300 < P < 500 MW	(ei ole)		-		

## 6.7 SOODAKATTILAT

Soodakattilalta mitatuista hiukkaskokojakaumista (kuva 28) nähdään, että pienhiukkaskasfraktio ei ole bimodaalinen kuten pölypoltossa ja leijukerrosprosesseissa, vaan pienhiukkasten massajakaumassa on yksi hallitseva moodi aerodynaamiselta halkaisijaltaan noin 1–2 µm:n kohdalla (Moisio 1997). Pölypoltolle ominainen alle 0,5 µm:n pienhiukkasmoodi puuttuu soodakattilalta siten kokonaan. Tosin pesurin jälkeen mitatuissa jakaumissa on heikko hiukkasmoodi n. 0,1 µm:n kohdalla, mikä viittaa siihen, että pesuri aiheuttaa kyseisen pienhiukkasmoodin. Syynä tähän voi olla joko hiukkaskoosta riippuva erotusaste tai pesurista haihtuvien vesipisaroiden tuottamat pienet hiukkaset (Moisio 1997). Pesurin jälkeisissä mittauksissa esiintyy myös vaikeuksia johtuen savukaasun kosteudesta ja alhaisesta lämpötilasta.

Sen sijaan koko hiukkasjakaumaa tarkasteltaessa (0,02–50  $\mu\text{m}$ ) myös soodakattilan tapauksessa ennen sähkösuodatinta esiintyy kaksi pitoisuushuippua, 1,2  $\mu\text{m}$  ja heikompi moodi 5  $\mu\text{m}$ :n kohdalla (Mikkanen ym. 1996). Sähkösuodattimen jälkeen mittaukset näyttivät enää yhden moodin n. 1,2  $\mu\text{m}$ :n kohdalla (Mikkanen ym. 1996).



Kuva 28. Soodakattilalta ennen ja jälkeen hiukkaspuhdistimien (sähkösuodatin (ESP) ja pesuri) mitatut ( $ELPI$ ,  $D_p < 8 \mu\text{m}$ ) hiukkaskokojakaumat (Moisio 1997).

Ennen pölynerotuslaitteita hiukkaspitoisuus kuvan 28 soodakattilan savukaasussa on (alle 8  $\mu\text{m}$ :n kokofraktiolle) keskimäärin  $12,9 \text{ g}/\text{m}^3$  (massa) ja  $2,2 \cdot 10^7 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  (lukumäärä). Suodattimien jälkeen pitoisuudet laskevat arvoihin  $150 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja  $7,6 \cdot 10^5 \text{ kpl}/\text{cm}^3$  (Moisio 1997, liite 5), joten tässä tapauksessa hiukkassuodattimien erotusaste on 98,8 % massasta ja 96,5 % lukumäärästä.

### 6.7.1 Esimerkki soodakattilasta: Metsä-Botnia Oy, Kemin tehtaat

Kemin tehtaiden nykyinen soodakattila otettiin käyttöön vuonna 1990. Sen polttoaineteho on 310 MW ja kapasiteetti 3 000 tonnia kuiva-ainetta vuorokaudessa. Pääpolttoaineena käytetään selluntuotannossa muodostuvaa mustalipeää ja tukipolttoaineena raskasta polttoöljyä. Myös väkevät ja laimeat hajukaasut, väkevoity bioliete ja likaislauhdelaitoksen metanoli poltetaan soodakattilassa. Varapolttopaikkana on meesauuni.

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan superväkevöinnillä 82–85 prosenttiin ennen polttamista soodakattilassa. Menetelmässä biolietettä haihdutetaan yhdessä mus-

talipeän kanssa ja poltetaan sen jälkeen soodakattilassa. Mustalipeän tuhka-ainepitoisuus on 40–50 % ja rikkipitoisuus 6–7 %. Soodakattilan savukaasut puhdistetaan kolmella kaksikammioisella sähkösuodattimella ja yhdellä alkalipesurilla ja lisäksi on lämmön talteenotto (vesipesu).

Vuonna 1995 soodakattila oli käytössä 8 432 tuntia, joten käyttöaste oli yli 96 %. Taulukossa 26 on esitetty Kemin tehtaiden sellutehtaan ja voimalaitoksen kaikki kattilat ja niiden prosessitiedot sekä niistä lasketut ominaispäästöt. Tässä yhteydessä keskitytään soodakattilaan.

*Taulukko 26. Soodakattilan (sk) ja koko Metsä-Botnia Oy:n Kemin tehtaiden kattilalaitosten prosessitiedot sekä niistä lasketut ominaishiukkaspäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) vuonna 1995 (Suomen ympäristökeskus, Lapin ympäristökeskus, ymp.suoj.päällikkö V.-A. Kivilinna, Metsä-Botnia Oy).*

Osapros.- tunnus (*)	Pateho (MW )	Pakulutus (TJ/a )	Polttoaine (*)	Poltto- tekniikka (*)	Käyttö- tunnit (h/a) (*)	Käyttö- aste (%)	Päästö (t/a) (*)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä (**)
k10	100	1681 53 331	PUUJÄTE POR0.9 TURVE	leijupeti (**)	7954	90,8	215	<b>104,1</b>	Sähkösuodin (2-kammioinen)
k7 (varakattila)	23	157	PUUJÄTE	Arina (kuorikattila)	3647	41,6	35	<b>222,9</b>	Venturipesuri (1-vaih.)
k9 (varakattila)	156	160	POR0.9	Paine- hajoitteinen öljypoltin	635	7,2	10	<b>62,5</b>	-
mu1 Meesauuni	0	468 0,54	POR1.4 METANOLI	Meesauuni	8194	93,5	52	<b>111,0</b>	Sykloni, alkalinen venturipesuri (2-vaih.)
sk Soodakattila	310	7535 260	SA LIEMI POR0.9	Soodakattila	8432	96,3	100	<b>12,8</b>	Sähkösuodin (3 kpl 2-kamm.), alkalipesuri + vesipesu/lto
<b>YHT.</b>	<b>589</b>	<b>10645,5</b>	<b>TJ/a</b>				<b>412</b>	<b>38,7</b>	<b>mg/MJ (pa)</b>

\*) Suomen ympäristökeskuksen VAHTI-järjestelmästä ja osin Lapin ympäristökeskuksesta.

\*\*\*) Tiedot ympäristönsuojelupäällikkö V.-A. Kivilinnalta (Oy Metsä-Botnia Ab, Kemin tehtaat).

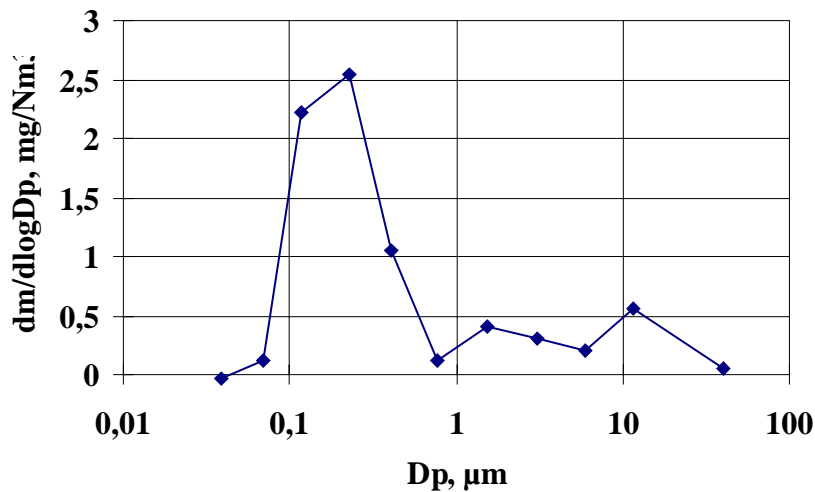
Soodakattilan hiukkaspäästöksi ilmoitettiin vuoteen 1995 asti kattilan takuuarvon mukaisesti 100 t/a, koska käyttöönoton yhteydessä suoritettuihin mittauksiin ei luotettu (liian pienet arvot). Takuuarvon mukainen päästö antaa vuoden 1995 ominaispäästöksi 13 mg/MJ. Vuodesta 1996 lähtien soodakattilan päästötieto on perustunut mittauksiin ollen 48 t/a vuonna 1996 (n. 5 mg/MJ, kun polttoaineita käytettiin 10 002 TJ/a).

Soodakattila tuotti vuonna 1996 sähköä 335,7 GWh ja prosessihöyryä 2 138 GWh, joten hiukkaspäästö tuotettua energiayksikköä kohti oli 19 g/MWh (19 mg/kWh).

Soodakattilan hiukkaspäästön kokonaismassasta arviolta hieman yli puolet on PM2.5-pienhiukkasia, sillä eräessä toisessa soodakattilassa tehdyissä mittauksissa suodattimien jälkeen 57 % (alle 8 µm:n kokofraktiosta) oli alle 2,5 µm:n kokoisia (Moisio 1997, liite 5). Lukumääräisesti pienhiukkasia oli 99 %. Toisaalta Kemin

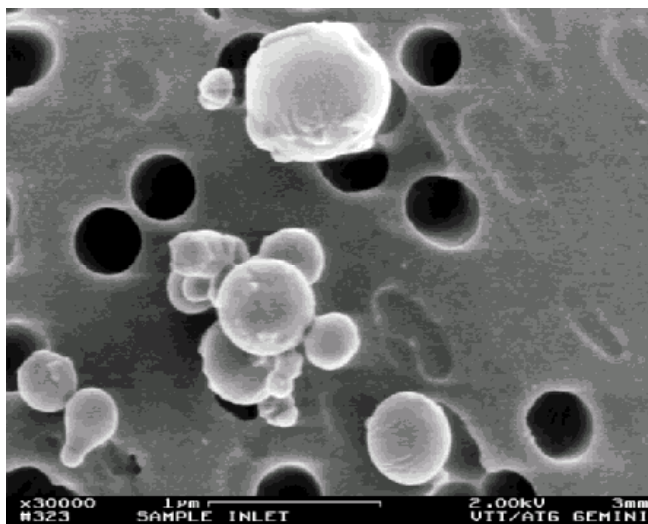
tehtaiden superväkeväinti nostaa kuiva-ainepitoisuutta, jolloin kokonaishiukkaspitoisuus savukaasussa kasvaa ja karkeiden hiukkasten osuus lisääntyy (Kauppinen ym. 1994).

Kuvasta 29 näkyy esimerkkinä olleen soodakattilan piipusta (siis erotuslaitteiden jälkeen) mitattu massakokojakauma. Suurin hiukkaspitoisuus on 0,1–0,3 µm:n kokoalueella. Tulos on ristiriidassa edellä esitettyyn massakokojakaumaan. Syynä voi olla erot mittausten menetelmissä, koska hiukkaskokojakauma on herkkä esim. vesihöyryn suhteelliselle kosteudelle. Myös eri pesurien vaikutukset ovat osoittautuneet erilaisiksi.



Kuva 29. Soodakattilan (Metsä-Botnia Oy, Kemi) hiukkaspitoisuus piipussa ( $t = 37$  °C) (Mikkanen 1993).

Kuvassa 30 on tyypillisiä pienhiukkasia ennen soodakattilan sähkösuodatinta. Yksittäiset hiukkaset ovat tulistimien sisääntulossa halkaisijaltaan noin 0,2–0,7 µm. Nämä hiukkaset kasvavat höyrymäisten yhdisteiden tiivistyessä niiden pinnalle ja/tai agglomeroitumalla toisten hiukkasten kanssa savukanavassa. Ennen sähkösuodatinta on mitattu kaksihuippuinen hiukkaskokojakauma (Mikkanen ym. 1996). Hienot hiukkaset (halkaisija alle 3 µm) ovat yksittäisiä palloja tai muutaman pallon muodostamia agglomeraatteja. Nämä hiukkaset muodostuvat savukaasussa. Suuremmat hiukkaset (halkaisija yli 3 µm) koostuvat sadoista palloista ja muodostuvat irtoamalla lämmönsiirtopinnoilta. Hienojen hiukkasten kokoon ja määrään vaikuttaa vain vähän soodakattilan ajotilanne, kun taas suurempien hiukkasten pitoisuus voi vaihdella 4–74 % kokonaismassasta. (Mikkanen ym. 1994a, Mikkanen ym. 1994b).



Kuva 30. Tyypillisiä pienhiukkasia ennen soodakattilan sähkösuodatinta (Mikkanen 1994a, 1994b). Kuva on otettu korkean erotuskyvyn pyyhkäisyelektronimikroskooppilla (HR-SEM).

## 6.7.2 Soodakattilat kokoluokittain

### Soodakattilat kokoluokassa 0...50 MW

Alle 50 MW:n soodakattiloita on kaksi kappaletta. Prosessitiedot laskettuine ominaispäästöineen on esitetty taulukossa 27. Käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö vuonna 1995 oli 129 mg/MJ<sub>pa</sub>.

Taulukko 27. Polttoaineteholtaan 0...50 MW:n soodakattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).

Polttoainetehto (MW)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
35	633,0	JATELIEM	7497	85,6	80	115,9
YHT.	41,0	POR0.9				
	16,0	BIOKAASU				
	<b>690,0</b>	<b>TJ/a</b>				
45	45,0	POR0.8	8279	94,5	225	139,9
YHT.	1563,0	JATELIEM				
	<b>1608,0</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>80</b>	<b>2298,0</b>		<b>15776</b>	<b>90,0</b>	<b>305</b>	<b>132,7</b>
MW	TJ/a		h/a	%	t/a	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu ominaispäästö:					<b>128,5</b>	<b>mg/MJ</b>

Soodakattilat kokoluokassa 50...300 MW

Tämän kokoluokan soodakattiloita on 11 kappaletta. Käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö vuonna 1995 oli 37 mg/MJ<sub>pa</sub> (taulukko 28).

*Taulukko 28. Polttoaineteholtaan 50...300 MW:n soodakattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).*

Polttoainetehto (MW)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
200	2955,0	JATELIEM	4472	51,1	22	6,9
	2,0	POR				
	214,0	MAAKAASU				
YHT.	<b>3171,0</b>	<b>TJ/a</b>				
93	3110,0	JATELIEM	8303	94,8	184	57,5
	91,0	POR0.8				
YHT.	<b>3201,0</b>	<b>TJ/a</b>				
86	67,0	POR1.0	8407	96,0	183	29,3
	6170,0	MUUT				
YHT.	<b>6237,0</b>	<b>TJ/a</b>				
186	7375,0	SA LIEMI	7704	87,9	670	88,8
	56,6	HAJUKAAS				
	110,2	POR2.5				
YHT.	<b>7541,8</b>	<b>TJ/a</b>				
118	3,0	POR	8083	92,3	113	44,4
	507,0	MAAKAASU				
	2033,0	JATELIEM				
YHT.	<b>2543,0</b>	<b>TJ/a</b>				
79	19,0	POK	8304	94,8	36	10,6
	3384,0	JATELIEM				
YHT.	<b>3403,0</b>	<b>TJ/a</b>				
110	71,0	MAAKAASU	8304	94,8	73	16,8
	4286,0	JATELIEM				
YHT.	<b>4357,0</b>	<b>TJ/a</b>				
90	2050,0	JATELIEM	7001	79,9	53	24,7
	61,0	KOIV.ÖLJ				
	35,0	POR				
YHT.	<b>2146,0</b>	<b>TJ/a</b>				
170	6,0	KOIV.ÖLJ	7964	90,9	193	36,7
	101,0	POR				
	5157,0	JATELIEM				
YHT.	<b>5264,0</b>	<b>TJ/a</b>				
147	3990,0	SA LIEMI	6700	76,5	200	47,4
	3,0	POR0.9				
	227,0	POR1.4				
YHT.	<b>4220,0</b>	<b>TJ/a</b>				
102	17,0	POR0.9	8070	92,1	122	33,3
	3646,0	SA LIEMI				
YHT.	<b>3663,0</b>	<b>TJ/a</b>				
<b>1381,00</b>	<b>45746,8</b>		<b>83312</b>	<b>86,5</b>	<b>1849</b>	<b>40,4</b>
	<b>TJ/a</b>		<b>h/a</b>	<b>%</b>	<b>t/a</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu ominaispäästö:					<b>36,9</b>	<b>mg/MJ</b>

Soodakattilat kokoluokassa 300...500 MW

300...500 MW:n soodakattiloiden (7 kpl) vuoden 1995 käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö oli 24 mg/MJ<sub>pa</sub> (taulukko 29).

*Taulukko 29. Polttoaineteholtaan 300...500 MW:n soodakattilat ja niiden ominaispäästöt (mg/MJ<sub>pa</sub>) hiukkasille (lähtötiedot SYKEN VAHTI-järjestelmästä).*

Polttoainetehto (MW)	Polttoainekulutus (TJ/a)	Polttoaine	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
476	9821,0	JATELIEM	7810	89,2	68	6,6
	190,0	POR1.6				
	252,0	MUUT				
YHT.	10263,0	TJ/a				
400	11878,0	JATELIEM	7849	89,6	106	8,8
	104,0	MAAKAASU				
YHT.	11982,0	TJ/a				
310	7535,0	SA LIEMI	8432	96,3	100	12,8
	260,0	POR0.9				
YHT.	7795,0	TJ/a				
373	7266,0	JATELIEM	8497	97,0	22	2,7
	936,0	MAAKAASU				
YHT.	8202,0	TJ/a				
315	99,0	POR0.9	7540	86,1	193	30,6
	6205,0	SA LIEMI				
YHT.	6304,0	TJ/a				
408	172,0	POR1.0	7625	87,0	205	37,1
	5350,0	MUUT				
YHT.	5522,0	TJ/a				
350	112,0	POR0.9	8500	97,0	665	67,6
	9722,0	JATELIEM				
YHT.	9834,0	TJ/a				
2632	59902,0		56253	91,7	1359	22,7
	TJ/a		h/a	%	t/a	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu ominaispäästö:				23,8	mg/MJ	

### 6.7.3 Yhteenvedo soodakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä

Koska soodakattiloiden savukaasun polynerotuslaitetietoja ei ollut käytettävissä, on taulukkoon 30 koottu soodakattilat yksinomaan kokoluokittain (käytännössä kaikilla



soodakattiloilla on vähintään sähkösuodatin, yleensä myös pesuri). Soodakattiloiden luonteesta johtuen niiden käytettävyyden on oltava hyvä. Kaikilla soodakattiloilla käyttöaste v. 1995 olikin välillä 80–97 %, joten lasketut yhteisominaispäästökertoimet kokoluokkaa kohti ovat varsin edustavia.

*Taulukko 30. Yhteenvedo soodakattiloiden ominaishiukkaspäästöistä.*

LAITOKSET (koko luokittain)	MUKANA (KPL)	YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ	
Soodakattilat kokoluokassa $0 < P < 50$ MW	2	129	mg/MJ
Soodakattilat kokoluokassa $50 < P < 300$ MW	11	37	mg/MJ
Soodakattilat kokoluokassa $300 < P < 500$ MW	7	24	mg/MJ

Kuten odotettua, myös soodakattiloiden ominaishiukkaspäästöt pienevät yksikkökoon kasvaessa. Suurilla soodakattiloilla pölynerotuslaitteita on enemmän ja ne toimivat tehokkaammin kuin pienimmillä kattiloilla. Lisäksi palamistapahtuma on paremmin hallittu runsaampien säätölaitteiden ja pidempien viipymäaikojen avulla, jolloin mustalipeän loppuunpalaminen on varmempaa.

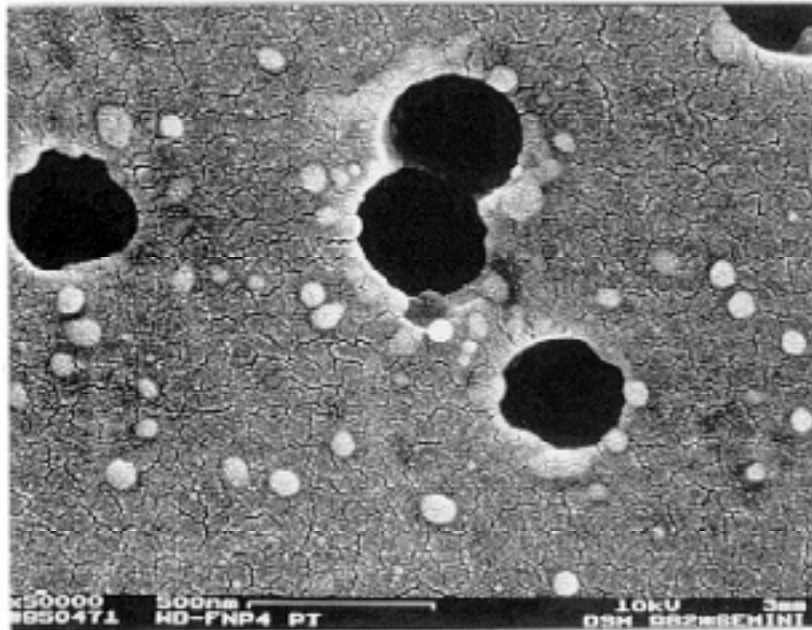
## 6.8 DIESELMOOTTORIT

Suomessa on vain muutama dieselvoimalaitos. Ne ovat luonteeltaan varavoimalaitoksia. Pienempiä dieselgeneraattoreita on enemmän myös jatkuvammassa käytössä (esimerkiksi kauppapuutarhojen ns. kokonaisenergiailaitokset, joilla tuotetaan sähköä ja lämmitysvettä kasvihuoneiden valaistukseen ja lämmitykseen). Yhteistä kaikille Suomessa energiantuotantoon käytetyille dieselmoottoreille on se, että niissä poltetaan lähinnä kevyttä polttoöljyä (POK), joissakin myös maakaasua. Tällöin niistä syntyvä hiukkaspäästö ei ole läheskään niin suuri kuin dieseliä tai raskasta polttoöljyä poltettaessa.

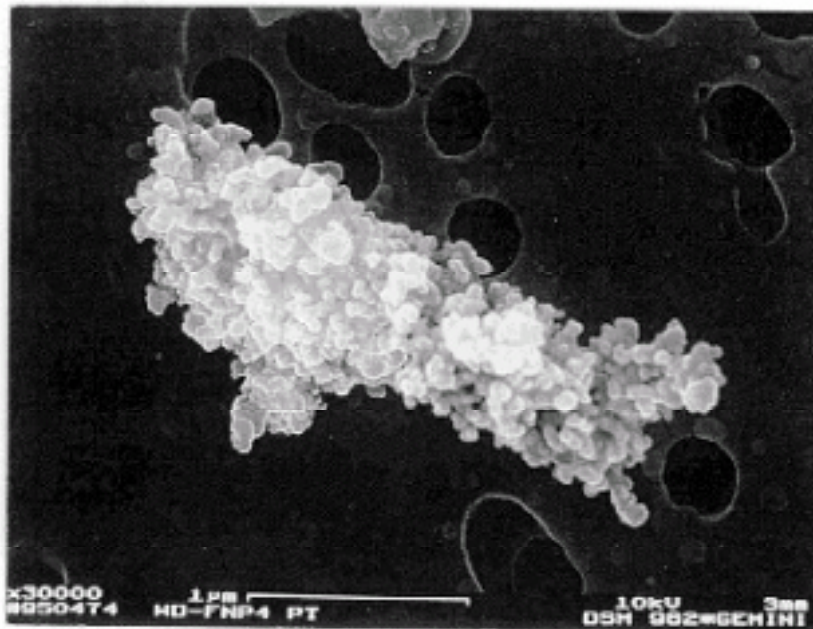
VAHTI-järjestelmän tietokannoista löytyi vain kaksi dieselvoimalaa (vuonna 1995), joiden hiukkaspäästö ja käyttötunnit on ilmoitettu. Pienempi 7,2 MW:n dieselvoimalaitos oli käytössä 32 tuntia eli käyttöaste oli olematon (0,37 %). Laitos käytti kevyttä polttoöljyä 0,65 TJ ja hiukkaspäästökseen oli ilmoitettu 0,02 tonnia, joten ominaispäästökseen saadaan 31 mg/MJ. Suurempi 53,6 MW:n laitos oli käytössä 405 tuntia (käyttöaste 4,6 %), jonka aikana se kulutti 9,17 TJ kevyttä polttoöljyä. Ilmoitettu hiukkaspäästö oli 0,03 tonnia, joten ominaispäästökseen saadaan 3 mg/MJ. Yksittäisinä esimerkkeinä tuloksia ei voi yleistää.

Lyyränen ym. (1998) tutkivat nelitahtisten turboahdettujen keskinopeuksisten (750–1 000 1/min) laiva- ja maakäyttöisten dieselmoottoreiden muodostuneita pakokaasuhiukkasia. Polttoaineena moottoreissa käytettiin matala-arvoisia jäännösjaeöljyjä (residuaaliöljyjä). Mittauskohta oli turboahtimen jälkeen 330–390 °C:n lämpötilassa. Massakokojakauma oli bimodaalinen, jonka huiput olivat 60–90 nm (0,06–0,09 µm, kuva 31) ja 7–10 µm. Pienhiukkasmoodissa ( $\leq 0,4$  µm) oli lähes 60 % kokonaihiukkasmassasta, mikä kertoo polttoöljyn suuresta höyrystymisestä. Suuremmat hiukkaset olivat rypälemäisiä tai ketjumaisia agglomeraatteja (kuva 32), jotka sisäl-

sivät pääasiassa hiiltä (42 p-%) ja happea (35 p-%), mikä viittaisi epätäydelliseen palamiseen.



*Kuva 31. Pyyhkäiselektronimikroskooppikuva (SEM) pienen dieselmoottorin pakokaasun tyypillisistä pienhiukkasista (Lyyränen ym. 1998).*



*Kuva 32. Pyyhkäiselektronimikroskooppikuva (SEM) pienen dieselmoottorin pakokaasun tyypillisestä rypälemäisestä agglomeraatista (Lyyränen ym. 1998).*

## 6.9 YHTEENVETO ERI KATTILOIDEN OMINAISHIUKKAS- PÄÄSTÖISTÄ

Kaikki edellä käsitellyt kattilat on koottu polttoainetehon ja erotinlaittekonseptin mukaisesti jaoteltuun taulukkoon 31, jossa esitetään käyttötunneilla painotetut ominaishiukkaspäästöt kattilaryhmille ilman polttoaineluokitusta. Toisin sanoen erityisesti monipolttoainekattiloilla, kuten arina- ja leijukerroskattiloilla, tällä tavalla lasketut ominaispäästöluvut ovat huonoja, sillä ne eivät kuvaa polttoaineiden välisiä eroja. Edellä on jo kuitenkin esitetty ominaispäästöt polttoaineittain, joten tähän taulukkoon on yhdistetty kaikki samanlaiset prosessit käytetyistä polttoaineista välttämättä, jotta yhteenvetotaulukko ei muodostu liian sekavaksi ja rikkonaiseksi.

*Taulukko 31. Yhteenvetotaulukko eri kattilatyypin käyttötunneilla painotetuista ominaishiukkaspäästöistä (mg/MJ).*

Kokoluokka (MW)	EROTUSLAITE/ EROTUSLAITTEET	KÄYTTÖTUNNEILLA PAINOTETTU YHTEISOMINISPÄÄSTÖ (mg/MJ)							
		kivihiilen pölypoltto	turpeen pölypoltto	paineha- joitteiset öljypolt.	pyörivä- kuppiset öljypolt.	arina- kattilat	kupliva leijupeti (BFB)	kiertoleiju- peti (CFB)	sooda- kattilat ***)
0 < P < 5 MW *)	(-) Ei erotinlaitteita			59	75	-			
	Sykloni/multisykloni			-	-	168			
0 < P < 50 MW **) (5 < P < 50 MW)	(-) Ei erotinlaitteita	-	-	29	33	135	-	-	129
	Sykloni/multisykloni	-	-	-	-	134	713	36	
	Sykloni/multisykloni, Kuitusuodin	-	-	-	-	-	129	87	
	Pesuri	-	-	-	-	142	-	-	
	Sähkösuodin	-	-	-	-	18	24	68	
50 < P < 300 MW	(-) Ei erotinlaitteita	-	-	30	16	-	-	-	37
	Sykloni/multisykloni	279	-	-	-	102	9	-	
	Sähkösuodin	61	33	-	-	45	27	15	
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	8	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin (+sykloni/multisykloni)	23	24	-	-	-	-	4	
300 < P < 500 MW	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	6	-	-	-	-	-	-	24
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	11	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	6	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	3	-	-	-	-	-	-	
P > 500 MW	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	6	-	-	-	-	-	-	-
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	3	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, SCR, Märkämenetelmä	2	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	2	-	-	-	-	-	-	

\*) vain öljy- ja arinakattilat

\*\*) öljy- ja arinakattilat 5 < P < 50 MW

\*\*\*) Soodakattiloita ei ole ryhmitelty erotinlaitteiden mukaan, vain kokoluokittain.

Yhteinen piirre kaikille energiantuotantoprosesseille on ominaishiukkaspäästön pieneminen kattilakoon suurentuessa. Pienillä kattiloilla, joilla ei ole pölynerotuslaitteita tai ainoastaan sykloni savukaasun kiintoaineen erottamiseen, ominaishiukkaspäästöt ovat suuria, yksittäisillä kattiloilla useita satoja, jopa yli 1 000 mg/MJ. Näissä kattiloissa palaminen on epätäydellistä, jolloin savukaasun mukaan joutuu runsaasti palamatonta ainetta, joka on hiukkaskooltaan suurta. Tällöin hiukkasmassakin on suuri ja ominaispäästöt muodostuvat suuriksi. Epätäydellinen palaminen merkit-

see alhaisempia palamislämpötiloja, joten polttoaineen aineksista vähäisempi määrä höyrystyy ja tiivistymällä muodostuva pienhiukkasosuus pienenee, mutta samalla pienten nokihiukkasten osuus kasvaa lisäten vastaavasti pienhiukkasosuutta.

Taulukon 31 ominaispäästöt ovat kokonaishiukkasmassoja sisältäen kaiken kiintoaineen savukaasuissa. Kuitenkin pölypoltossa (kivihiili, turve) lähes samat ominaispäästöluvut pätevät, kun tarkastellaan hengitettäviä hiukkasia (PM10), koska lähes kaikki hiukaspäästön muodostavat hiukkaset ovat alle kymmenen mikrometriä halkaisijaltaan, mikäli sähkösuodatint toimii optimaalisesti. Suodattimien mahdollisten häiriöiden aikana voidaan joutua lyhytaikaisesti päästämään savukaasut puhdistamattomina piippuun, jolloin ominaispäästö kasvaa huomattavasti ja sisältää myös paljon suuria hiukkasia. Laitoksille määrätty ohjearvot ja niiden tilapäisesti sallitut ylitykset voivat kuitenkin suodatinvian pitkittyessä aiheuttaa laitoksen alasajon.

Varsinaisia pienhiukaspäästöjä tarkasteltaessa kivihiilen pölypoltossa noin puolet hiukaspäästön massasta aiheutuu halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin hiukkasista, kun pölynerotuslaitteena käytetään vähintään sähkösuodatinta (luku 6.1). Tällöin taulukon 31 kivihiilen pölypolton ominaispäästöluvut voidaan karkeasti jakaa kahdella. Näin saataisiin PM2.5-pienhiukkasille ominaispäästöjen vaihteluväliksi 1–30 mg/MJ kattilakoosta ja erotinlaitekonseptista riippuen (taulukko 32).

Turpeen pölypoltolle arvioitiin edellä (luku 6.2), että noin neljäs–viidesosa hiukaspäästön massasta olisi PM2.5-pienhiukkasia. Tällöin taulukon 31 ominaispäästöluvut voisi karkeasti jakaa neljällä tai viidellä, jolloin pienhiukkasten ominaispäästökäsi turpeen pölypoltossa saataisiin n. 5–8 mg/MJ (taulukko 32).

Riittämättömän mittausaineiston vuoksi öljykattiloille ei voida tässä yhteydessä määritellä pienhiukkasosuutta kokonaishiukaspäästöstä. Sama koskee arinakattiloita, joilla ominaispäästöt vaihtelevat suuresti kokoluokasta ja käytetystä polttoaineesta riippuen.

Leijukerroskattiloista ei ollut käytettävissä soveltuvia mittauksia pienhiukkasten osuudesta savukaasuissa. Mittauksia on tosin tehty, mutta ne eivät ole julkisia. Lisäksi laaja polttoainevalikoima ja eri leijukerrostekniikat (BFB/CFB) vaikuttavat osaltaan syntyviin pienhiukaspäästöihin. Pölypolttoa matalampi lämpötila ja suurempi polttoaineen raekoko aiheuttavat kuitenkin sen, että mineraalien höyrystymistä ei tapahdu yhtä paljon, joten tiivistymällä muodostuva pienhiukkasosuus on vähäisempi. Lisäksi osa polttoaineen tuhkasta ja syntyneistä hiukkasista deponoituu petimateriaaliin kulkeutuen siten savukaasujen sijasta pohjakuonaan petimateriaalia vaihdettaessa. Foster Wheelerin CFB-pilotissa 21 % suodattimen jälkeisestä hiukkasmassasta oli PM2.5-pienhiukkasia kuorta poltettaessa (Moisio 1997, liite 5). Tällöin kuorta polttavissa sekä samanlaisen hiukkasuodattimen omaavissa kiertopetikatiloissa ominaispienhiukaspäästö olisi taulukon 31 mukaan noin 1–17 mg/MJ, mutta pilottikokoluokan mittaustuloksia ei voi yleistää voimalaitosmittakaavan kattiloille.

Soodakattiloille voidaan arvioida PM2.5-pienhiukkasten massaosuudeksi n. 50–60 % kokonaishiukkaspäästöstä, kun savukaasut puhdistetaan vähintään sähkösuodattimin. Tällöin taulukon 31 ominaispäästöistä saataisiin soodakattiloiden pienhiukkaspäästöksi 12–77 mg/MJ kokoluokasta riippuen (taulukko 32). Soodakattiloiden ominaispienhiukkaspäästö saattaa olla suurin vertailtaessa energiantuotannon eri polttoprosesseja. Nämä pienhiukkaset ovat kuitenkin kemialliselta koostumukseltaan aivan erilaisia kuin esimerkiksi hiilen pölypoltossa syntyneet pienhiukkaset, joten soodakattilan pienhiukkaspäästöjen terveysvaikutuksetkin lienevät erilaisia. Tutkimustuloksia siis kaivattaisiin myös mustalipeän poltossa syntyneiden pienhiukkasten terveysvaikutuksista. Toistaiseksi nämä tutkimukset ovat keskittyneet lähinnä kivihiilen, puun ja dieselpolttoaineen aiheuttamiin pienhiukkasiin, joita kaupunkien ja taajamien yhdyskuntailmassa on enemmän. Soodakattilathan eivät kuitenkaan edusta varsinaista yhdyskuntien energiantuotantoa, vaan ovat puunjalostusteollisuuden välttämättömiä ja hyödyllisiä energiantuottajia ja kemikaalien talteenottajia, joten sikäli niille voitaneen suoda erityisasema pienhiukkaspäästöjen suhteen. Tietenkin jatkuvaa kehitystyötä on tulevaisuudessakin tehtävä, jotta myös nämä pienhiukkaslähteet saadaan kuriin.

Taulukossa 32 on esitetty ominaishiukkaspäästöistä arvioidut ominaispäästökertoimet pienhiukkasille (PM2.5) niiltä osin kuin mittaustuloksia on ollut käytettävissä. Taulukosta käy ilmi, että tarvittaisiin erityisesti leijukerroskattiloiden kuten myös arina- ja öljykattiloiden päästömittauksia, ts. hiukkassuodattimien jälkeen savukaasukanavasta suoritettavia pienhiukkasten pitoisuusmittauksia. Myös muiden poltto-tekniikoiden osalta lisämittauksia tarvittaisiin, jotta oikeasta pienhiukkasten ominaispäästötasosta saataisiin luotettava kuva.

Taulukko 32. Ominaishiukkaspäästökertoimista arvioidut ominaispienhiukkaspäästökertoimet (mg/MJ) ( $D_p \leq 2,5 \mu\text{m}$ ).

Kokoluokka (MW)	EROTUSLAITE/ EROTUSLAITTEET	KÄYTTÖTUNNEILLA PAINOTETTU YHTEISOMINAISPÄÄSTÖ (mg/MJ)							
		kivihillen pölypoltto	turpeen pölypoltto	paine- joitteiset öljypolt.	pyörivä- kuppiset öljypolt.	arina- kattilat	kupliva leijupeti (BFB)	kierto- leijupeti (CFB)	sooda- kattilat ***)
0 < P < 5 MW *)	(-) Ei erotinlaitteita			??	??	-			
	Sykloni/multisykloni			-	-	??			
0 < P < 50 MW **) (5 < P < 50 MW)	(-) Ei erotinlaitteita	-	-	??	??	??	-	-	77
	Sykloni/multisykloni	-	-	-	-	??	??	??	
	Sykloni/multisykloni, Kuitusuodin	-	-	-	-	-	??	??	
	Pesuri	-	-	-	-	??	-	-	
	Sähkösuodin	-	-	-	-	??	??	??	
50 < P < 300 MW	(-) Ei erotinlaitteita	-	-	??	??	-	-	-	22
	Sykloni/multisykloni	??	-	-	-	??	??	-	
	Sähkösuodin	30	8	-	-	??	??	??	
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	4	-	-	-	-	-	-	
300 < P < 500 MW	Sähkösuodin (+sykloni/multisykloni)	12	6	-	-	-	-	??	14
	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	3	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	6	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	6	-	-	-	-	-	-	
P > 500 MW	Sähkösuodin, Märkämenetelmä	6	-	-	-	-	-	-	-
	Sähkösuodin, Kuitusuodin, Puolikuiva rikinpoisto	1	-	-	-	-	-	-	
	Sähkösuodin, SCR, Märkämenetelmä	1	-	-	-	-	-	-	

\*) vain öljy- ja arinakattilat

\*\*) öljy- ja arinakattilat 5 < P < 50 MW

\*\*\*) Soodakattiloita ei ole ryhmitelty erotinlaitteiden mukaan, vain kokoluokittain.

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä hiukkaspäästöjen lähteenä käytetyn VAHTI-tietokannan (SYKE) kattilatieidot on esitetty liitteessä 8. Liitteessä 8 on myös eroteltu erikseen ne kattilat, jotka olivat mukana hiukkasten ominaispäästökertoimien laskennassa. Liitteissä 10 ja 11 on esitetty Suomessa vuonna 1995 käytetyn primäärienergian kokonaiskulutus energialähteittäin sekä eri primäärienergianlähteiden osuus Suomen sähköntuotannossa. Näistä voi suuntaa antavasti päätellä eri polttotekniikoiden suhteellisia osuuksia, koska suoraan tätä tietoa ei ollut käytettävissä. Esimerkiksi soodakattilat kuluttavat n. 8,8 % kokonaisprimäärienergiasta (mustalipeän poltto) ja kivihiilen pölypolto on suurin yksittäinen polttotekniikka hiilen 10,3 %:n siivusta. Lisäksi nähdään, että tässä työssä käsitellyt suoria pienhiukkaspäästöjä aiheuttavat polttotekniikat tuottavat vain noin kolmanneksen koko Suomen sähköntuotannosta. Nitraattihiukkasia muutunnan kautta tuottava maakaasun poltto mukaan luettuna näiden pienhiukkaspäästöjä aiheuttavien tekniikoiden yhteisosuus on 43 % Suomen sähköntuotannosta.

Kaikkien polttotekniikoiden pienhiukkaspäästöjä ei ollut mahdollista arvioida, koska käytettävissä ei ollut soveltuvia päästöpuolen (erotinlaitteiden jälkeisiä) mittaustuloksia. Näitä polttoprosesseja olivat öljy-, arina- ja leijukerroskattilat. Varsinkin leijukerrosprosesseista (BFB/CFB) pienhiukkasmittauksia on kyllä tehty, mutta ainakin julkiset mittaukset on tehty yleensä kattilan jälkeen ennen erotinlaitteita, jolloin varsinaisesta hiukkaspäästöstä ei tiedetä mitään, koska kokojakaumat ja pitoisuudet muuttuvat erotinlaitteissa. Arinakattilat ja leijukerrosprosessit ovat lisäksi monivivahteisia erilaisten polttoaineyhdistelmien ja hiukkasten erotinlaitteekonseptien vuoksi, joten kaikkia eri yhdistelmiä ei ole kyetty mittaamaan niiden suuren määrän takia. Myöskään uusista ympäristöystävällisemmistä polttotekniikoista (paineistetut prosessit, kaasutus) ei vielä ole saatavilla pienhiukkastietoa. Julkisia mittaustuloksia päästöpuolen pienhiukkasista tarvittaisiin siis lisää.

Yhteistä kaikille energiantuotannon polttotekniikoille on, että hiukkaspäästön kokonaismassa (ja siten myös ominaispäästö) pienenee, kun kattilan kokoluokka kasvaa. Tämä on seurausta sekä paremmista palamisolosuhteista että monipuolisemmista ja tehokkaammista hiukkasten erotinlaitteistoista suurissa kattiloissa. Parempiin palamisolosuhteisiin johtavat mm. tarkempi palamisen hallinta, parempi ilman ja polttoaineen sekoittuminen, oikeat ilmakertoimet ja lämpötilat sekä riittävät viipymäajat loppuunpalamiselle. Tehokkaat hiukkasten erotuslaitteet, kuten sähkösuodattimet, kuitusuodattimet ja rikinpoiston märkäpesurit, ovat niin kalliita, että vasta suurimmissa kokoluokissa niiden kaikkien hankinta on mahdollista (ts. ominaisinvestointi kohtuullinen).

Kivihiilen pölypoltossa käytännössä kaikki päästön aiheuttavat hiukkaset ovat hengittettäviä hiukkasia (PM10), koska kivihiilivoimaloissa on polynerotinlaitteena aina vähintään sähkösuodatin. Tällöin pienhiukkasia (PM2.5) on hiukkaspäästön kokonaismassasta noin puolet (lukumäärästä lähes 100 %). Kattilakoosta ja erotinlaitteyhdistelmästä riippuen ovat pienhiukkasten ominaispäästökertoimet välillä 1–30 mg/MJ. Tehokkainta kivihiilen poltossa syntyneiden pienhiukkasten poistamiseen

on käyttäen sähkösuodattimen lisäksi kuitusuodatinta ja rikinpoistopesuria, jolloin päästään 1–6 mg/MJ:n ominaispäästökertoimiin. Tämä on kuitenkin käytännössä mahdollista vasta suurissa kokoluokissa puhdistuslaitteiden korkean hinnan takia.

Turpeen pölypoltossa noin neljäs–viidesosa alle 8 µm:n kokoisen (aerodynaaminen halkaisija) hiukkaspäästön massasta on pienhiukkasia, kun erotinlaitteena on sähkösuodatin. Siten turvepölykattiloiden ominaispäästökertoimet pienhiukkasille ovat n. 5–8 mg/MJ, sillä kaikissa on sähkösuodatin erotinlaitteena, jolloin päästö koostuu lähes sataprosenttisesti alle 8 µm:n hiukkasista. Turvepölykattiloiden ongelmana ovat kuitenkin suuret typenoksidipäästöt (NO<sub>x</sub>), jonka vuoksi vanhoja turvekattiloita on jo korvattu esimerkiksi ympäristöystävällisemmällä leijukerrostekniikalla (esim. Jyväskylän Rauhalahdi).

Soodakattiloiden pienhiukkasten massaosuus on noin 50–60 % kokonaishiukkaspäästöstä, kun erotinlaitteena on vähintään sähkösuodatin. Soodakattiloiden tapauksessa ei ollut käytettävissä erotinlaitetietoja, mutta kaikissa soodakattiloissa on vähintään sähkösuodatin, yleensä myös pesuri. Pienhiukkasten ominaispäästökerroin on noin 12–77 mg/MJ kokoluokasta riippuen.

Suomessa ei juurikaan ole suuria dieselvoimaloita, mutta esimerkiksi laivamoottoreiden pienhiukkaspäästöt olisi selvitettävä tarkemmin, sillä usein suurten risteilijäalusten satamat ovat aivan kaupunkien keskustoissa (esim. Helsingin Eteläsatama ja Katajanokka). Laivojen suhteellisen matalan päästökorkeuden vuoksi ne lisäävät oman osansa kaupunki-ilman pienhiukkaspitoisuuksiin.

Myös pienpoltto on tärkeä jatkotutkimuksen kohde, koska sillä voi olla paikallisesti suurikin merkitys. Esimerkiksi taajamissa, joissa vallitseva lämmitysmuoto on talokohtainen puun, öljyn, turpeen tai hiilen poltto, voivat hengitysilman pienhiukkaspitoisuudet matalan päästökorkeuden sekä puuttuvien pölynerotuslaitteiden vuoksi nousta huomattavasti tietyissä sääolosuhteissa (esim. inversiot). Lisäksi pienpoltto on usein epätäydellistä, jolloin syntyy mm. karsinogeenisiä hiilivety-yhdisteitä. Pienpoltossa muodostuvia pienhiukkasia tulisi mitata ja analysoida, jotta niiden mahdolliset terveysvaikutukset saataisiin selville.

Kaiken kaikkiaan on siis vielä mahdotonta tehdä kattavaa vertailua pienhiukkaspäästöjen suhteen eri energiantuotantotekniikoiden välillä, koska mittauksia ei ole tehty riittävästi tai ollenkaan. Soodakattilat näyttäisivät aiheuttavan suurimmat pienhiukkaspäästöt, mutta ne eivät edusta puhdasta energiantuotantoa, vaan ovat sellutehtaiden hyödyllisiä energiantuottajia (energiaomavaraisuus). Muuten käytetyllä polttoaineella ja -tekniikalla ei ole niin suurta vaikutusta pienhiukkasten ominaispäästökertoimiin kuin käytetyllä hiukkasten erotuslaitteistolla.

Pienhiukkasten ominaispäästökertoimet eivät yksin kerro jonkin polttotekniikan osuutta ilmakehän pienhiukkaspitoisuuteen. Suorien hiukkaspäästöjen päästökertoimia lukiessa täytyy muistaa myös energialaitosten typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöjen vaikutus muutunnan kautta yhdyskuntailman pienhiukkaspitoisuuteen, sillä näin syntyvät hiukkaset ovat nimenomaan pienhiukkasia (alle 1 µm). Kaikista NO<sub>x</sub>-



ja SO<sub>2</sub>-päästöistä arviolta noin puolet muuntuu pienhiukkasiksi. Siten myös tässä työssä käsittelemättä jätetty maakaasun poltto (kaasuturbiinit) on pienhiukkasten aiheuttaja NO<sub>x</sub>-päästöillään. Rikkiä Suomessa käytetyssä venäläisessä maakaasussa ei ole, joten maakaasun polttaminen ei tuota SO<sub>2</sub>-päästöjä.

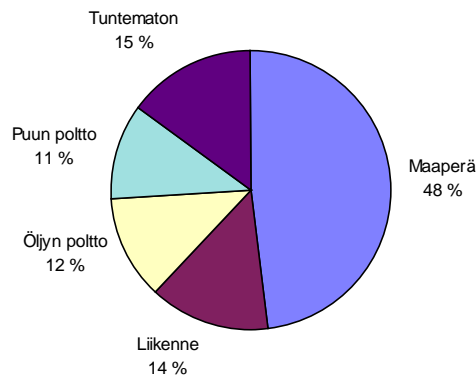
Vähäisten soveltuvien mittausten lisäksi pienhiukkaspäästöjen selvittämiseen sisältyi muitakin epävarmuustekijöitä. Kattiloiden kokonaishiukkaspäästöt (t/a) on yleensä laskettu kertamittauksin määritetyistä ominaispäästökertoimista (tietyllä teholla, yleensä täydellä kuormalla), jotka eivät ota huomioon osakuorma-ajoa, jossa syntyvät pienemmät hiukkaspäästöt (hiukkaspitoisuudet kasvavat kuormitusasteen funktiona, Miettinen ym. 1989). Lisäksi kattiloiden ylös- ja alasajot sekä erotinlaitteiden häiriötilanteet jäävät usein ottamatta huomioon kokonaispäästöissä.

Täytyy myös muistaa, ettei VAHTI-järjestelmän (SYKE) tietokantojen erotinlaitetietoja ole järjestelmällisesti ylläpidetty. Tässä työssä on käytetty SYKEN tekemän kyselyn tuloksia vuodelta 1994, joten kattilaprosessien jaottelussa oikeisiin ryhmiin saattaa olla joitakin virheitä (ei kuitenkaan merkittävästi, koska käsiteltiin vuoden 1995 hiukkaspäästöjä), ja näin ollen myös lasketut ominaispäästökertoimet voivat erityisesti vain yhden tai muutaman kattilan sisältävissä ryhmissä olla virheellisiä. Jotta VAHTIn tiedot olisivat tutkimukselle käyttökelpoisia, täytyisi tulevaisuudessa myös erotinlaitetiedot pitää ajan tasalla. Lisäksi tiedot päästöjen mittaus- tai laskentamenetelmistä tulisi olla saatavilla muutenkin kuin etsimällä alueellisista ympäristökeskuksista laitosten vanhoja mittausraportteja.

### Vertailu liikenteeseen

Eri polttoprosesseissa syntyy erilaisia hiukkasia. Hiukkasten kemiallinen koostumus onkin tärkeä ominaisuus (myös terveysvaikutusten kannalta). Polttoprosesseille tyyppillisten merkkiaineiden (esim. öljyn poltossa vanadiini ja nikkeli) avulla voidaan hiukkaspäästöt kohdentaa niiden aiheuttajille (esimerkiksi eri energiantuotantolaitosten ja liikenteen kesken). Menetelminä käytetään ilmanlaatumittausten analysointia sekä sääolosuhteiden vaikutuksen huomiointia (esim. tuulen suunta ja voimakkuus ja niistä lasketut ilmamassojen kulkeutumisreitit eli trajektorit). Kun haitallimmat pienhiukkaspäästölähteet tunnistetaan, pystytään näiden päästöjen vähentämiseen vaikuttamaan monin keinoin (mm. rajoitukset, prosessimuutokset, suodatinlaitteiden kehittäminen).

Tällä hetkellä tiedot (pien)hiukkasten alkuperästä ovat vielä spekulatiivisia tai puuttuvat kokonaan. Muutamia yksittäisiä tutkimuksia on tehty. Hosiokangas (1995) on selvittänyt Kuopion hengittävien hiukkasten (PM10) lähteet (kuva 33).



Kuva 33. Hengitettävien hiukkasten päästölähteiden osuudet Kuopiossa kevättalvella 1994 (Hosiokangas 1995). Tunnistamaton osuus sisältää mm. kaukokulkeutuman, teollisuuden ja energiantuotannon päästöt.

Maaperästä mm. tuulen ja liikenteen nostattama hiukkasaine on massaltaan pääasiassa karkeata (2,5–10  $\mu\text{m}$ ), joten pienhiukkasia tarkasteltaessa maaperän osuus pienenee ja polttoprosessien (liikenne, energiantuotanto) sekä kaukokulkeutuman osuus kasvaa.

Helsingin keskustan ilmanlaatumittauksien perusteella PM10-pitoisuus vuosikeskiarvona oli Töölön mittausasemalla vuonna 1995 31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja Luukin tausta-asemalla 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Aarnio ym. 1996). Mittaustuloksia on riittämättömästi trendien arvioimiseksi, mutta kaupunki-ilman kokonaishiukkaspitoisuudet (TSP) ovat laskeneet lähinnä hiekoitushiekan aiheuttamien pölyhaittojen vähentämistoimenpiteiden myötä (hiekan raekoko, katujen vesipesu aikaisin keväällä). Myös energiantuotanto- ja teollisuusprosessien kokonaishiukkaspäästöt (t/a) ovat laskeneet reilusti viimeisen kymmenen vuoden aikana (liite 9). Syynä tähän ovat mm. tiukentuneiden ympäristövaatimusten tuomat parannukset polttoprosesseihin sekä hiukkasten erotuslaitteisiin. Pienhiukkasongelma ei kuitenkaan ole ratkennut, vaan nykyään entistä suurempi osuus hiukkaspäästöstä on kevyitä, lukumääräisesti runsaita pienhiukkasia, koska suuremmat ja painavimmat hiukkaset erotetaan tehokkaasti.

Ojanen ym. (1998) ovat tutkineet hengitettävien hiukkasten (myös pienhiukkasten) koostumusta ja lähteitä pääkaupunkiseudulla. Vallilassa pienhiukkasten massapitoisuuksista (ka. 11,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) noin kaksi kolmasosaa on kaukokulkeutunutta ja Luukin tausta-asemalla (ka. 7,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) n. 90 %. Vallilassa paikallista alkuperää olevat pienhiukkaset ovat pääosin liikenteen aiheuttamia ja koostuvat sulfaateista, orgaanisista hiiliyhdisteistä, mustasta hiilestä (ilmentää liikenteen vaikutusta), nitraateista, ammoniumista ja maaperän kiviaineksesta, josta 15–20 % on pienhiukkaskokoluokassa.

Lähteessä Ojanen ym. (1998) on esitetty myös ajoneuvojen hiukkasmittaustuloksia. Liikenteestä peräisin olevasta hiukkasmassasta pääosa on kooltaan 0,03–0,3  $\mu\text{m}$ . Dieselkäyttöisten henkilö- ja pakettiautojen hiukkaspäästöt ovat noin satakertaiset

tavallisiin bensiiniautoihin ja noin kolmesataakertaiset kolmitoimikatalysaattorilla varustettuihin bensiiniautoihin nähden. Raskaan kaluston dieselkoemootorin hiukkasmassapäästöt olivat mittauksissa yli kaksinkertaiset kevyisiin dieselajoneuvoihin verrattuna.

Kaupunki-ilman pienhiukkaslähteistä liikenne on siis selvästi pahin matalan päästökorkeutensa vuoksi, mutta myös energiantuotannon päästöt voivat säätilan pahojen inversiotilanteiden aikana jäädä "savusumuksi" kaupunkien ylle. Tällaisissa tilanteissa myös kaasumaisten päästöjen muuttunta pienhiukkasiksi on nopeaa. Pahimmat kaupunki-ilman pienhiukkaslähteet ovat kuitenkin ajoneuvoliikenteen dieselkäyttöiset moottorit. Katukuiluissa liikenteen aiheuttama pienhiukkaspitoisuus voi nousta vaarallisen korkeaksi (Ojanen ym. 1998). Kun lisäksi tutkimusten mukaan dieselin palamisesta syntyneet pienhiukkaset ovat terveydelle kaikkein vaarallisimpia, on kaupungeissa hengitysilman puhtauden kannalta kiinnitettävä huomiota juuri liikenteen päästöjen vähentämiseen, sillä energiantuotanto on keskittynyt suuriin voimalaitoksiin, joiden palaminen on hallittua ja joiden savukaasut puhdistetaan tehokkaasti ennen kuin ne johdetaan yleensä yli 100 metrin korkeudelle (eli usein inversiokerroksen yläpuolelle). Toisaalta energiantuotannon pienhiukkaset leviävät kaukokulkeutumana, jota Vallilan pienhiukkasissakin todettiin olevan peräti kaksi kolmasosaa (Ojanen ym. 1998). Tämän vuoksi paikallista energiantuotantoa merkittävämpi pienhiukkaspitoisuuksien aiheuttaja voikin ehkä olla lähialueen energiantuotanto.

Vasta terveysvaikutustutkimusten kattaessa kaikkien polttoprosessien koostumukseltaan erilaisten pienhiukkastyypin aiheuttaman altistuksen voidaan luotettavammin arvioida, mistä lähteestä peräisin ovat pienhiukkaset ovat vaarallisimpia. Silloin mittausresurssit ja rajoittamistoimenpiteet voidaan kohdistaa juuri oikeille lähteille. Tämänhetkisen tiedon mukaan terveydelle vaarallisimmat pienhiukkaset olisivat peräisin dieselpolttoaineen palamisesta. Kaiken lisäksi juuri näiden pienhiukkasten suurin päästölähde, liikenne, vaikuttaa ilmakehän alimmassa osassa ja pilaa näin yhdyskuntien hengitysilmaa.

# LÄHDEKIRJALLISUUS

Aarnio, P., Koskentalo, T. & Hämekoski, K. 1996. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla 1995. YTV. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996: 12. 26 s.

Aarnio, P., Koskentalo, T. & Hämekoski, K. 1997. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla 1996. YTV. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1997: 6. 24 s.

Aarnio, P., Koskentalo, T. & Hämekoski, K. 1998. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla 1997. YTV. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1998: 1. 25 s.

Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H. & Zandveld, P.Y.J. 1996. Particulate matter emissions (PM10-PM2.5-PM0.1) in Europe in 1990 and 1993. TNO-report. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation. Apeldoorn, The Netherlands. 90 s.

Bickelhaupt, R.E. 1975. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25, s. 148–152.

Bowman, F.M., Odum, J.R. & Seinfeld, J.H. 1997. Mathematical model for gas-particle partitioning of secondary organic aerosols. *Atmospheric Environment*, vol. 31, 23. s. 3921–3931.

Burnett, R.T., Dales, R., Krewski, D., Vincent, R., Dann, T. & Brook, J.F. 1995. Associations between ambient particulate sulfate and admissions to Ontario hospitals for cardiac and respiratory diseases. *Am. J. Epidemiol.*, 142, s. 15–22.

Bush, P. 1984. Study of rapping reentrainment emissions from pilot-scale electrostatic precipitator. *Environ. Science Technology*. vol 18, no 9, s. 699–705.

Clarke, L. B. 1993. The fate of trace elements during coal combustion and gasification: an overview. *Fuel*, vol. 72, 6. s. 731–736.

Dockery, D.W., Schwartz, J. & Spengler, J.D. 1992. Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols. *Environ. Res.*, 59, s. 362–373.

Dockery, D.W. & Pope, C.A., III. 1994. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu. Rev. Public Health*, 15, s. 107–132.

EC. 1995. ExternE externalities of energy. Vol. 3: Coal and lignite. Report no EUR 16522 EN, Luxembourg, European Commission Directorate-General XII - Science, Research and Development, 589 s.

El-Wakil, M. M. 1984. Powerplant technology. McGraw-Hill, Inc.Singapore. 861 s.

*Energia*, 10/1996, vol. 11. Liite: Forssan voimalaitos. 25 s. ETY-Lehdet Oy.

EPA (the U.S. Environmental Protection Agency). 1997. EPA's revised particulate matter standards. <http://ttnwww.rtpnc.epa.gov/naaqsfm/pmfact.htm>. AltaVista 21.8.1998.

Feldman, P.L. & Kumar, K.S. 1993. Utility particulate emissions of heavy metals. In: Proceedings: Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conference on Electrostatic Precipitation, vol. 1, Birmingham, Alabama, October 1993.

Flagan, Richard C. & Seinfeld, John. 1988. Fundamentals of air polluting engineering. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 542 s.

Hahkala, M., Jormanainen, P., Puustinen, H. & Pohjola, V. 1986. Pienkattiloiden päästöselvitys. VTT Tutkimuksia 454. Espoo. 81 s.

Hinds, W.C. 1982. Aerosol technology. Properties, behavior and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons, Inc. New York. 424 s.

Hosiokangas, J. 1995. Hengitettävien hiukkasten päästölähteiden osuudet Kuopiossa kevättalvella 1994. Pro gradu -tutkielma, Kuopion yliopisto.

Hulkkonen, S. 1994. Savukaasujen puhdistus hiukkasista. Teoksessa: Energiatalous ja ympäristönsuojelu. Toimittanut C.-J. Fogelholm. Hakapaino Oy, Helsinki. s. 85–122.

Huotari, J. & Vesterinen, R. 1995. Muut polton päästöt. Teoksessa: Poltto ja palaminen, luku 11. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. s. 298–322.

Hupa, M. & Hyöty, P. 1995. Mustalipeän poltto ja soodakattila. Teoksessa: Poltto ja palaminen, luku 17. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. s. 447–477.

IPCC. 1995. Climate change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of IPCC IS92 emission scenarios. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lee Hoesung, Callander, B.A., Haites, E., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds). Cambridge, UK, Cambridge University Press, s. 1–339.

IPCC. 1996. Climate change. The science of climate change. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds). Cambridge, UK, Cambridge University Press, s. 1–584.

Jokiniemi, J. 1998. Aerosol formation in light- and heavy-duty diesel engines. 1998. Pienhiukkaseminaari, TTKK, Fysiikan laitos, 6.5.1998.

Jokiniemi, J. & Kauppinen E. 1995. Polttoprosessien aerosolit. Teoksessa: Poltto ja palaminen, luku 7. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. s. 174–209.

- Karas, J. 1998. Pienhiukkaset maailmanlaajuisen mielenkiinnon kohteena. (Toimittanut Pia Oesch). *Kehittyvä Energia 1998*. IVO-yhtiöiden tutkimus- ja kehitystoiminnan vuosijulkaisu. Oy Edita Ab. s. 42-43.
- Karvonen, E. 1997. Jyväskylän Rauhalahden voimalaitoksen rikkidioksidi-päästöjen vähentämiseksi lisääntynyt. Tiedote 4.6.1997. <http://www.vyh.fi/ajankoht/tiedote/ksu/tirau.htm>. AltaVista 25.8.1998.
- Kaukanen, E., Pyykkönen, A. & Larnimaa, K. 1987. Raskaan polttoöljyn vesiemulsiopoltto Suomessa. Tutkimusraportti, Enconsults Oy, Kaarina. Åbo Akademis kopieringscentral. 68 s.
- Kauppinen, E. & Pakkanen, T. 1990. Coal combustion aerosols: a field study. *Environmental Science & Technology (ES&T)*, vol. 24 (12). s. 1811–1818.
- Kauppinen, E., Jokiniemi, J., Lehtinen, K. & Mikkanen, P. 1994. Aerosolit mustalipeän poltossa. Teoksessa: LIEKKI 2 vuosikirja 1994. Åbo Akademis tryckeri, Åbo. s. 865–886.
- Kauppinen, E.I., Lind, T.M., Valmari, T., Ylätaalo, S., Jokiniemi, J.K., Powell, Q., Gurav, A.S., Kodas, T.T. & Mohr, M. 1996. The structure of submicron ash from combustion of pulverized South African and Colombian coals. Applications of advanced technology to ash-related problems in boilers (L. Baxter and R. DeSollar, Eds.), Plenum Press, s. 471–484.
- Kurkela, J., Latva-Somppi, J., Kauppinen, E. I. & Tapper, U. 1998a. Fly ash characterization in fluidized bed combustion of wood residue, forest residue and chipboard. To be published in *Fuel*.
- Kurkela, J., Latva-Somppi, J., Tapper, U., Kauppinen, E. & Jokiniemi, J. 1998b. Fly ash particle formation in fluidized bed combustion of wood-based fuels. Not yet published.
- Lammi, K., Lehtonen, E. & Timonen, T. 1993. Energiantuotannon hiukkaspäästöjen teknis-taloudelliset vähentämismahdollisuudet. Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto. Selvitys 120, 1993. Painatuskeskus Oy, Helsinki. 64 s.
- Laurikko, J. & Kytö, M. 1993. Moottoriajoneuvojen pakokaasupäästöt. Mittaaminen, lainsäädäntö ja päästöjen vähentämistekniikka. VTT Tiedotteita 1501. Espoo. 82 s.
- Lind, T., Kauppinen, E., Jokiniemi, J., Maenhaut, W. & Pakkanen, T. 1994. Alkali metal behaviour in atmospheric circulating fluidised bed coal combustion. In: Williamson, J., Fraser, W.: *The Impact of Ash Deposition on Coal Fired Plant*. The Engineering Foundation Conference proceedings, Solihull, UK 20-25 June 1993. s. 425–434.

- Lind, T., Kauppinen, E., Jokiniemi, J. & Maenhaut, W. 1995. A field study on the trace metal behaviour in atmospheric circulating fluidised bed coal combustion. In: 25th International Symposium on Combustion Proceedings., Irvine, California 31 July - 5 August 1994.
- Lind, T., Kauppinen, E.I., Maenhaut, W., Shah, A. & Huggins, F. 1996. Ash vaporization in circulating fluidized bed coal combustion. *Aerosol Sci. Techn.*, vol. 24 (3). s. 135–150.
- Lyyränen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. & Joutsensaari, J. 1998. Aerosol formation in medium speed diesel engines operating with heavy fuel oils. Submitted for publication in *J. Aerosol Sci.*
- Maskuniitty, H. 1995. Arinapoltto. Teoksessa Poltto ja palaminen, luku 15. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. s. 393–416.
- Meij, R., Van der Kooij, J., Van der Sloot, H.A., Koppius-Odink, J.M. & Clement, L.J. 1986. Emissions and control of particulate matter from coal-fired power plants. In: Aerosols, Research, Risk Assessment and Control Strategies: the U.S.-Dutch International Symposium. 2. Williamsburg, VA, May 19-25, 1985. (S.D. Lee, T. Schneider, L.D. Grant, P.J. Verkerk, eds.). Lewis Publishers, Chelsea, MI. s. 427–440.
- Miettinen, M., Paakkinen, K., Impola, R., Heiskanen, V.-P., Vesterinen, R. & Huotari, J. 1989. Turvevoimalaitosten päästöt ja poltto- ja käsittelytekniikan kehittäminen. VTT Tutkimuksia 636. Espoo. 96 s.
- Mikkanen, P. 1993. Yksittäinen mittaustulos, joka on mitattu 10.9.1993 soodakattilan piipusta. Mittaus liittyy artikkeliin Kauppinen ym. (1994): Aerosolit mustalipeän poltossa (ks. ylempänä lähdeluettelosta).
- Mikkanen, P., Kauppinen, E., Jokiniemi, J., Sinquefield, S. & Frederick, W. 1994a. Bimodal fume particle size distributions from recovery boiler and laboratory scale black liquor combustion. *Tappi Journal*, vol. 77, 12. s. 81–84.
- Mikkanen, P., Kauppinen, E., Jokiniemi, J., Sinquefield, S., Frederick, W. & Mäkinen, M. 1994b. The particle size and chemical species distributions of aerosols generated in kraft black liquor pyrolysis and combustion. In: *AIChE Symposium Series*, vol. 90, no. 302. The 1993 Forest Products Symposium. s. 46–54.
- Mikkanen, P., Kauppinen, E., Pyykönen, J., Jokiniemi, J. & Mäkinen, M. 1996. Alkali salt ash formation during black liquor combustion at kraft recovery boilers. In: Applications of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers, Eds. Larry Baxter and Richard DeSollar. Engineering Foundation Conference, Waterville Valley, USA 16-21 July 1995. s. 409–423.

- Mohr, M., Ylätaalo, S., Klippel, N., Kauppinen, E.I., Riccius, O. & Burtscher, H. 1996. Submicron fly ash penetration through electrostatic precipitators at two coal power plants. *Aerosol Science and Technology*, vol. 24. s. 191–204.
- Moisio, M. 1997. Palamisaerosolien kokojakaumien mittaaminen sähköisellä alipaineimpaktorilla. Lisensiaattityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere. 181 s.
- Monn, C., Fuchs, A., Hogger, D., Junker, M., Kogelschatz, D., Roth, N. & Wanner, H.U. 1997. Particulate matter less than 10 microns (PM10) and fine particles less than 2,5 microns (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. *Sci Total Environment*, 208, 1–2. s. 15–21.
- Ojanen, C., Pakkanen, T., Aurela, M., Mäkelä, T., Meriläinen, J., Hillamo, R., Aarnio, P., Koskentalo, T., Hämekoski, K., Rantanen, L. & Lappi, M. 1998 Hengitettävien hiukkasten kokojakauma, koostumus ja lähteet pääkaupunkiseudulla – Loppuraportti. MOBILE, liikenteen energiankäytön ja ympäristövaikutusten tutkimusohjelma. TEKES. 82 s.
- Ottosson, C. 1996. Dieselpakokaasun hiukkaskoon määrittäminen. Mobile-raportti 107Y-6, tammikuu. 86 s.
- Pleym, H. ym. (useita kirjoittajia). 1989. MILJØSTUDIER. NKI Forlaget. Suomeksi: Sundberg, Jaakko: Ympäristötekniikka. 1991. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. 324 s.
- Quann, R.J.; Neville, M. & Sarofim, A.F. 1990. Laborator study of the effect of coal selection and composition of combustion generated submicron particles. *Combustion Science and Technology*, 74. s. 245–256.
- Riionheimo Y. 1978. Kivihiilikäyttöisten voimalain savukaasunpuhdistus. Puhallin 1978, Voimalaitostekniikka.
- Salmi, Timo. Projektipäällikkö, Ilmatieteen laitos. Puhelinkeskustelu ja sähköpostiviesti 1.4.1998.
- Schleicher, B. & Kauppinen, E. 1998. Performance optimization of an electrostatic precipitator for ultrafine exhaust particles. SIHTI 2 Review Report. 9 s.
- Schwartz, J. 1993. Particulate air pollution and daily mortality in Birmingham, Alabama. *Am. J. Epidemiol.*, 137. s. 1136–1147.
- Schwartz, J. 1994. Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, Alabama. *Am. J. Epidemiol.*, 139. s. 589–590.
- Schwartz, J., Dockery, D.W. & Neas, L.M. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 46, 10. s. 927–939.



- Schwartz, J. & Morris, R. 1995. Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan. *Am. J. Epidemiol.*, 142. s. 22–35.
- Seinfeld, J.H. 1986. Atmospheric chemistry and physics of air pollution. John Wiley & Sons, New York.
- SFS 3866. Ilmansuojelu. Päästöt. Kiintoaineen määrittäminen manuaalisella menetelmällä. Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki. 2. painos, 1990. 13 s.
- SFS 5624. Ilmansuojelu. Päästöt. Savukaasun tilan määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki. 1990. 10 s.
- Timonen, K.L. 1997. Air pollution and respiratory health among children. Publications of National Public Health Institute A4/1997. 83 s.
- Tiuri, M. 1998. Fine particle emissions and human health. Report. Committee on Science and Technology, Council of Europe. Doc. 8167. 9 July 1998. 18 s.
- Turbin, B.J. & Huntzicker, J.J. 1995. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmospheric Environment*, vol. 29, 23. s. 3527–3544.
- Turunen, R. 1995. Palaminen polttomootorissa. Teoksessa: Poltto ja palaminen, luku 19. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. s. 504–533.
- Valmari, T., Lind, T., Kauppinen, E.I., Sfiris, G., Nilsson, K. & Maenhaut, W. 1998. Ash transformations during circulating fluidized bed combustion of forest residue and willow: 2. ash deposition and fine particle formation. Submitted to *Energy&Fuels*.
- Valtioneuvoston päätös Ilmanlaadun ohjeistoista ja rikkilaskeuman tavoitearvosta, 1996.
- Vesterinen, R. 1988. Energiantuotannon päästöjen mittaaminen. Näytteenotto-menettelyt, mittalaitteet, työtavat ja niiden kenttäkelpoisuus. VTT Tiedotteita 887. Espoo. 118 s.
- Wang, X., Jin, Y.G., Suto, M., Lee, L.C. & O’Neal, H.E. 1988. *J. Chem. Phys.*, 89. s. 4853–4860.
- WHO. 1994. Update and revision of the air quality guidelines for Europe. WHO, Regional Office for Europe. Meeting of the Working Group “Classical” Air Pollutants, Bilthoven, The Netherlands, 11-14 October 1994.
- Willeke, K. & Baron, P.A. 1993. Aerosol measurement: principles, techniques and applications. Van Nostrand Reinhold, New York. 876 s.

Ylätaalo, S.I., Kauppinen, E.I., Joutsensaari, J., Jokiniemi, J.K. & Hautanen, J. 1993. Electrostatic precipitator penetration function for pulverised coal combustion aerosols. *J. Aerosol Sci.*, vol. 24.

## LIITELUETTELO:

- LIITE 1. PAINELAJOTTEISET ÖLJYPOLTTIMET
- LIITE 2. PYÖRIVÄKUPPISET ÖLJYPOLTTIMET
- LIITE 3. KUPLIVAT LEIJUPEDIT (BFB)
- LIITE 4. KIERTOLEIJUPEDIT (CFB)
- LIITE 5. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 0...5 MW<sub>pa</sub>
- LIITE 6. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 5...50 MW<sub>pa</sub>
- LIITE 7. ARINAKATTILAT KOKOLUOKASSA 50...300 MW<sub>pa</sub>
- LIITE 8. VAHTI-JÄRJESTELMÄN KATTILAT JA OMINAIS-  
PÄÄSTÖLASKENNASSA MUKANA OLEVAT KATTILAT
- LIITE 9. VAHTI-TIETOKANNAN KOKONAISHIUKKASPÄÄSTÖT (t/a)  
VUOSINA 1988–1995
- LIITE 10. PRIMÄÄRIENERGIAN KOKONAISKULUTUS ENERGIA-  
LÄHTEITTÄIN VUONNA 1995
- LIITE 11. PRIMÄÄRIENERGIALÄHTEET SUOMEN SÄHKÖN-  
TUOTANNOSSA VUONNA 1995

Pateho (MW)	Pakulus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
1,50	6,10	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1370	15,6	0,05	8,2
4,00	0,04	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	10	0,1	0,01	250,0
4,00	12,00	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	860	9,8	1,8	150,0
2,30	3,60	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1600	18,3	0,3	83,3
4,00	1,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	122	1,4	0,05	35,7
2,00	7,60	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1679	19,2	0,31	40,8
3,10	11,56	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2700	30,8	0,46	39,8
5,00	7,33	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2600	29,7	0,084	11,5
4,00	12,66	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4000	45,7	0,092	7,3
1,70	8,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2391	27,3	0,19	21,8
1,70	0,21	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	33	0,4	0,01	48,5
2,80	17,20	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	5506	62,9	0,688	40,0
2,80	12,40	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	2820	32,2	0,36	29,0
2,90	26,53	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3703	42,3	2,096	79,0
2,90	12,42	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2032	23,2	0,15	12,1
1,60	1,87	POK	Painehaj. öljypoltin	2426	27,7	0,31	55,4
	3,73	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>5,60</b>	<b>TJ/a</b>					
4,45	0,18	POK	Painehaj. öljypoltin	898	10,3	0,14	23,2
	5,86	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>6,04</b>	<b>TJ/a</b>					
3,72	3,83	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	422	4,8	0,168	43,9
0,58	0,75	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	647	7,4	0,018	24,1
3,49	15,17	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2132	24,3	0,364	24,0
2,30	1,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	250	2,9	0,12	63,2
2,30	1,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	250	2,9	0,12	63,2
2,30	1,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	250	2,9	0,12	63,2
3,72	25,60	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	3753	42,8	0,5	19,5
3,72	17,90	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	2634	30,1	0,6	33,5
3,27	23,90	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	3519	40,2	0,5	20,9
2,10	5,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	8700	99,3	1	200,0
4,00	7,67	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2500	28,5	0,58	75,6
2,00	12,51	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4500	51,4	0,86	68,7
2,90	61,05	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	7600	86,8	4,326	70,9
0,00	44,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2700	30,8	3,08	70,0
2,33	12,07	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1650	18,8	1,09	90,3
2,32	8,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1203	13,7	0,79	89,8
0,90	3,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1590	18,2	0,24	64,9
3,90	16,40	POR	Painehaj. öljypoltin	1738	19,8	0,35	21,3
0,80	1,50	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	936	10,7	0,07	46,7
2,50	13,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3842	43,9	0,4	28,8
2,50	9,20	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2566	29,3	0,26	28,3
5,00	27,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1800	20,5	2	73,0
4,00	0,88	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	143	1,6	0,05	56,8
2,50	9,23	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2045	23,3	0,6	65,0
2,00	10,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2792	31,9	0,1	9,3
4,00	28,30	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4216	48,1	0,2	7,1
3,80	1,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	251	2,9	0,028	16,5
4,70	20,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	524	6,0	1,2	57,4
2,00	11,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3505	40,0	0,7	59,3
2,80	10,53	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2280	26,0	0,11	10,5
2,80	11,07	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2280	26,0	0,11	9,9
4,80	27,72	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3000	34,2	0,22	7,9
4,40	49,44	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3100	35,4	0,593	12,0
2,60	1,10	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4100	46,8	0,01	9,1
1,86	2,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	595	6,8	0,261	90,1
3,50	51,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	?????		3,8	73,4
3,50	51,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	?????		3,8	73,4
3,50	33,25	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		2,3	69,2
4,10	0,54	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	123	1,4	0,003	5,5
1,30	0,96	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4563	52,1	0,048	49,8

(jatkuu...)

3,00	10,92	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1050	12,0	0,26	23,8
3,60	1,20	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	200	2,3	0,11	91,7
3,00	22,50	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3338	38,1	1,4	62,2
2,35	19,40	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		0,5	25,8
2,35	20,70	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		0,6	29,0
2,00	32,90	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	7008	80,0	1,6	48,6
2,50	6,20	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	1314	15,0	0,3	48,4
4,00	15,50	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4455	50,9	0,8	51,6
5,00	19,60	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	2437	27,82	0,02	1,0
2,30	4,20	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	836	9,54	0,005	1,2
4,65	50,16	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4400	50,23	4,51	89,9
0,90	4,60	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1020	11,64	0,41	89,2
5,00	15,51	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1690	19,29	0,93	60,0
2,00	20,13	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4100	46,80	1,8	89,4
0,93	2,05	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	730	8,33	0,12	58,5
3,50	0,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	94	1,07	0,01	25,0
2,00	5,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1140	13,01	0,14	25,9
2,00	3,10	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	653	7,45	0,08	25,8
2,00	19,48	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2114	24,13	1,01	51,8
1,40	11,18	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	5855	66,84	1,75	156,5
2,50	25,50	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	4105	46,86	1,9	74,5
1,50	12,30	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	4151	47,39	0,9	73,2
3,50	0,45	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	54	0,62	0,02	44,4
3,00	15,71	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2800	31,96	1,4	89,1
2,00	26,80	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		1,8	67,2
4,00	24,50	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		1,7	69,4
5,00	43,20	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		2,9	67,1
4,50	25,80	POR0.8	Painehaj. öljypoltin	3408	38,90	0,17	6,6
4,00	67,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	6222	71,03	4,1	60,6
2,00	9,45	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2060	23,52	0,47	49,7
2,00	10,56	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2750	31,39	0,53	50,2
2,10	10,90	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	2510	28,65	0,4	36,7
4,50	39,40	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	2850	32,53	0,3	7,6
4,00	89,00	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	6100	69,63	0,5	5,6
2,00	42,00	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	2020	23,06	0,3	7,1
2,50	3,90	POR0.8	Painehaj. öljypoltin	1120	12,79	0,3	76,9
4,20	29,60	POR0.8	Painehaj. öljypoltin	4520	51,60	2	67,6
2,80	4,30	POR0.8	Painehaj. öljypoltin	1800	20,55	0,3	69,8
4,00	20,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1946	22,21	0,4	20,0
2,50	11,90	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	2069	23,62	1	84,0
2,50	16,20	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	3126	35,68	1,2	74,1
4,00	24,30	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	1449	16,54	2,5	102,9
1,10	13,00	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		0,8	61,5
3,40	17,20	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		1,2	69,8
1,40	5,15	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		0,4	77,7
1,30	0,05	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	27	0,31	0,01	200,0
3,50	12,30	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1692	19,32	0,6	48,8
1,10	5,30	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2374	27,10	0,6	113,2
1,60	4,10	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1536	17,53	0,4	97,6
2,00	22,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3741	42,71	2,2	98,2
4,00	16,50	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2265	25,86	0,7	42,4
3,00	3,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	150	1,71	0,1	29,4
2,00	2,10	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	130	1,48	0,1	47,6
<b>313,5</b>	<b>1732,1</b>	<b>TJ/a</b>		<b>232858</b>	<b>26,9</b>	<b>87,3</b>	<b>50,4</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>				<b>55,6 mg/MJ</b>	<b>(99 kpl)</b>		

Pateho (MW)	Pakulus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
3,90	22,47	TB POK	Painehaj. öljypoltin	8760	100,0	0,67	29,8
0,56	0,02	TB POK	Painehaj. öljypoltin	40	0,5	0,00064	29,9
2,50	6,10	POK	Painehaj. öljypoltin	500	5,7	0,03	4,9
2,50	2,30	POK	Painehaj. öljypoltin	430	4,9	0,01	4,3
1,50	1,00	POK	Painehaj. öljypoltin	90	1,0	0,01	10,0
0,00	7,26	POK	Painehaj. öljypoltin	900	10,3	0,022	3,0
1,20	1,01	POK	Painehaj. öljypoltin	176	2,0	0,02	14,9
	0,33	MUUT					
<b>Yhteensä:</b>	<b>1,34</b>	<b>TJ/a</b>					
1,76	16,26	POK	Painehaj. öljypoltin	5000	57,1	0,5	30,7
3,00	12,30	POK	Painehaj. öljypoltin	3753	42,8	0,228	13,6
	4,45	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>16,75</b>	<b>TJ/a</b>					
2,30	0,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	105	1,2	0,02	50,0
	0,40	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>0,40</b>	<b>TJ/a</b>					
5,00	47,50	TURVE	Painehaj. öljypoltin	5107	58,3	17,53	369,1
1,00	3,99	POK	Painehaj. öljypoltin	?????		0,6	100,0
	2,01	POR0.8					
<b>Yhteensä:</b>	<b>6,00</b>	<b>TJ/a</b>					
2,00	6,94	POK	Painehaj. öljypoltin	?????		1,05	100,4
	3,52	POR0.8					
<b>Yhteensä:</b>	<b>10,46</b>	<b>TJ/a</b>					
4,00	11,23	POR0.8	Painehaj. öljypoltin	?????		3,35	100,0
	22,27	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>33,50</b>	<b>TJ/a</b>					
1,00	15,20	T JÄTE	Painehaj. öljypoltin	2966	33,9	1,2	78,9
0,63	8,10	POK	Painehaj. öljypoltin	2259	25,8	0,5	61,7
1,16	22,70	POK	Painehaj. öljypoltin	76	0,9	1,5	66,1
1,16	30,80	POK	Painehaj. öljypoltin	3836	43,8	2	64,9
2,30	15,20	POK	Painehaj. öljypoltin	5200	59,4	1	65,8
1,50	38,60	POK	Painehaj. öljypoltin	6087	69,5	2,6	67,4
0,84	9,30	POK	Painehaj. öljypoltin	2750	31,4	0,6	64,5
0,48	0,30	POK	Painehaj. öljypoltin	133	1,5	0,02	66,7
1,90	4,45	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3565	40,7	1,27	43,1
	25,00	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>29,45</b>	<b>TJ/a</b>					
2,90	16,70	POK	Painehaj. öljypoltin	3257	37,2	0,94	47,7
	3,00	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>19,70</b>	<b>TJ/a</b>					
3,70	13,90	POK	Painehaj. öljypoltin	2811	32,1	0,78	47,6
	2,50	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>16,40</b>	<b>TJ/a</b>					
0,40	1,91	POK	Painehaj. öljypoltin	3033	34,6	0,14	73,3
1,80	9,16	POK	Painehaj. öljypoltin	2895	33,0	0,275	30,0
1,00	8,82	POK	Painehaj. öljypoltin	2778	31,7	0,265	30,0
1,85	1,19	POK	Painehaj. öljypoltin	618	7,1	0,036	30,3
2,60	6,90	POK	Painehaj. öljypoltin	4800	54,8	1	72,5
	6,90	POR1.0					
<b>Yhteensä:</b>	<b>13,80</b>	<b>TJ/a</b>					
1,60	1,46	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	1200	13,7	0,2	58,0
	1,99	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>3,45</b>	<b>TJ/a</b>					
0,82	0,38	POK	Painehaj. öljypoltin	250	2,9	0,03	78,9
<b>58,9</b>	<b>415,8</b>	<b>TJ/a</b>		<b>73375</b>	<b>28,9</b>	<b>38,4</b>	<b>92,3</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>				<b>71,2 mg/MJ</b>	<b>(29 kpl)</b>		

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
7,80	0,16	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	40	0,5	0,148	898,1
29,00	72,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	761	8,7	1,4	19,4
6,50	24,46	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2000	22,8	0,98	40,1
5,60	63,47	POR0.7	Painehaj. öljypoltin	8099	92,5	1,243	19,6
5,60	74,97	POR0.7	Painehaj. öljypoltin	7741	88,4	1,413	18,8
20,00	40,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2700	30,8	3	75,0
7,80	57,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	8643	98,7	0,966	16,7
30,60	187,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3552	40,5	6,5	34,8
43,00	0,09	POK	Painehaj. öljypoltin	480	5,5	0,5	10,5
	47,60	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>47,69</b>	<b>TJ/a</b>					
43,00	0,06	POK	Painehaj. öljypoltin	339	3,9	0,4	11,9
	33,60	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>33,66</b>	<b>TJ/a</b>					
43,00	37,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	382	4,4	0,4	10,5
	0,07	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>37,97</b>	<b>TJ/a</b>					
43,00	49,20	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	496	5,7	0,5	10,1
	0,10	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>49,30</b>	<b>TJ/a</b>					
43,00	43,90	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	443	5,1	0,5	11,4
	0,08	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>43,98</b>	<b>TJ/a</b>					
43,00	0,08	POK	Painehaj. öljypoltin	455	5,2	0,5	11,1
	45,10	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>45,18</b>	<b>TJ/a</b>					
31,00	0,20	POK	Painehaj. öljypoltin	121	1,4	0,04	6,3
	6,20	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>6,40</b>	<b>TJ/a</b>					
31,00	0,30	POK	Painehaj. öljypoltin	195	2,2	0,07	6,9
	9,90	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>10,20</b>	<b>TJ/a</b>					
12,00	3,51	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	149	1,7	0,15	42,7
6,00	4,83	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	288	3,3	0,16	31,0
	0,33	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>5,15</b>	<b>TJ/a</b>					
12,80	49,44	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3700	42,2	1,414	28,6
33,00	0,10	POK	Painehaj. öljypoltin	752	8,6	2,422	63,4
	11,23	MAAKAASU					
	26,88	POR0.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>38,20</b>	<b>TJ/a</b>					
36,00	21,35	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	316	3,6	1,921	90,0
36,00	22,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	336	3,8	2,043	90,0
7,00	43,63	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4577	52,2	0,528	12,1
13,00	0,12	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	4	0,046	0,001	8,5
13,00	0,14	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	5	0,057	0,002	14,1
13,00	0,02	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2	0,023	0	0,0
13,00	3,45	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	130	1,5	0,013	3,8
13,00	2,13	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	63	0,7	0,022	10,3
13,00	9,23	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	248	2,8	0,185	20,0
7,80	71,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	5200	59,4	0,85	12,0
5,20	38,21	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3400	38,8	0,65	17,0
12,00	11,70	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	500	5,7	0,29	24,8
12,00	15,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	524	6,0	0,13	8,7

(jatkuu...)

5,29	41,50	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		2	48,2
6,47	31,10	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	?????		1,5	48,2
6,00	39,05	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	1164	13,3	1,9	48,7
17,80	117,00	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	3926	44,8	5,6	47,9
16,20	26,00	POR0.6	Painehaj. öljypoltin	704	8,0	0,8	30,8
6,70	1,47	POR2.3	Painehaj. öljypoltin	205	2,34	0,0016	1,1
43,50	15,70	POR2.0	Painehaj. öljypoltin	166	1,89	0,59	37,6
12,00	0,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	29	0,33	0,01	12,5
12,00	0,40	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	14	0,16	0,007	17,5
8,00	27,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2487	28,39	1,1	40,7
44,00	1,60	POK	Painehaj. öljypoltin	119	1,36	0,4	36,4
	9,40	POR1.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>11,00</b>	<b>TJ/a</b>					
35,00	180,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3899	44,51	1	5,6
12,00	73,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2924	33,38	0,5	6,8
5,50	36,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	3833	43,76	1	27,8
39,00	388,00	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	5202	59,38	14,4	37,1
9,80	171,60	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	2490	28,42	3,8	22,1
9,80	28,80	POR0.9	Painehaj. öljypoltin	896	10,23	3,9	135,4
<b>979,8</b>	<b>2317,6</b>	<b>TJ/a</b>		<b>84699</b>	<b>20,1</b>	<b>67,8</b>	<b>29,3</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>				<b>26,7</b>	<b>mg/MJ</b>	<b>(48 kpl)</b>	



Pateho (MW)	Pakulusus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
6,00	36,22	POK	Painehaj. öljypoltin	?????		0,03	0,4
	36,22	MAA-KAASU					
<b>Yhteensä:</b>	<b>72,44</b>	<b>TJ/a</b>					
12,00	7,70	POK	Painehaj. öljypoltin	287	3,3	0,4	51,9
12,00	9,90	POK	Painehaj. öljypoltin	223	2,5	0,3	30,3
22,00	2,90	POR1.9	Painehaj. öljypoltin	132	1,5	0,4	33,9
	8,90	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>11,80</b>	<b>TJ/a</b>					
44,00	17,60	POK	Painehaj. öljypoltin	229	2,6	0,6	32,6
	0,80	POR1.9					
<b>Yhteensä:</b>	<b>18,40</b>	<b>TJ/a</b>					
5,80	8,70	POR1.0	Painehaj. öljypoltin	5000	57,1	2,1	70,2
	21,20	POK					
<b>Yhteensä:</b>	<b>29,90</b>	<b>TJ/a</b>					
<b>101,8</b>	<b>150,1</b>	<b>TJ/a</b>		<b>5871</b>	<b>13,4</b>	<b>3,8</b>	<b>25,5</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>65,5 mg/MJ</b>	(5 kpl)		

POR, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulusus (TJ/a)	Polttoaine	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
66,00	47,00	POR2.0	Painehajoitteinen öljypoltin	335	3,8	1,4	29,8

PYÖRIVÄKUPPISET ÖLJYPOLTTIMET  
 POR, 0...5 MW<sub>pa</sub>

LIITE 2 (1/4)

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttoteknikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
3,40	43,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	8740	99,8	1,8	41,7
5,00	5,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1600	18,3	0,1	18,5
5,00	66,70	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	???		0,14	2,1
4,35	24,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3000	34,2	0,6	24,8
3,70	6,70	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1057	12,1	0,3	44,8
2,90	22,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3709	42,3	1,4	61,1
4,00	12,60	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1742	19,9	0,3	23,8
4,00	39,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	8561	97,7	1,2	30,2
4,00	4,90	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1000	11,4	0,5	102,0
4,00	51,70	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	6832	78,0	3,1	60,0
2,30	14,30	POR2.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1800	20,5	11,7	818,2
4,90	25,10	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4186	47,8	1,1	43,8
3,40	9,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4061	46,4	0,6	63,8
<b>50,95</b>	<b>326,90</b>	<b>TJ/a</b>			<b>46288</b>	<b>40,65</b>	<b>22,84</b>	<b>69,9</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					<b>74,9</b>	<b>mg/MJ</b>		

POK, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttoteknikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
12,00	39,00	POK	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3717	42,4	1,7	43,6

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
16,00	0,20	POK	0,05	Pyöriväkup. öljypoltin	7545	86,1	2,8	7,3
	383,20	POR0.9	99,95					
<b>Yhteensä:</b>	<b>383,40</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
44,00	16,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	173	2,0	0,2	12,5
44,00	9,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	170	1,9	0,1	11,1
49,00	73,90	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1008	11,5	1	13,5
12,00	96,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4494	51,3	0,6	6,2
12,00	90,60	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4058	46,3	0,5	5,5
12,00	139,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	5291	60,4	0,8	5,7
12,00	84,10	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2803	32,0	0,7	8,3
12,00	121,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3876	44,2	1	8,3
5,80	20,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	6400	73,1	0,2	9,8
28,50	74,00	MUUT	39,66	Pyöriväkup. öljypoltin	8100	92,5	2,6	13,9
	112,60	POR1.0	60,34					
<b>Yhteensä:</b>	<b>186,60</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
11,00	3,00	POR2.3	37,50	Pyöriväkup. öljypoltin	511	5,8	0,1	12,5
	5,00	POR1.0	62,50					
<b>Yhteensä:</b>	<b>8,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
11,00	2,00	POR2.3	40,00	Pyöriväkup. öljypoltin	322	3,7	0,1	20,0
	3,00	POR1.0	60,00					
<b>Yhteensä:</b>	<b>5,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
13,00	45,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3576	40,8	0,54	11,9
45,00	0,30	POR0.9	75,00	Pyöriväkup. öljypoltin	5	0,1	0,005	12,5
	0,10	POK	25,00					
<b>Yhteensä:</b>	<b>0,40</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
45,00	0,06	POR0.9	75,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1	0,0	0,001	12,5
	0,02	POK	25,00					
<b>Yhteensä:</b>	<b>0,08</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
45,00	0,99	POR0.9	79,20	Pyöriväkup. öljypoltin	16	0,2	0,02	16,0
	0,26	POK	20,80					
<b>Yhteensä:</b>	<b>1,25</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
45,00	0,06	POR0.9	75,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1	0,0	0,001	12,5
	0,02	POK	25,00					
<b>Yhteensä:</b>	<b>0,08</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
6,00	2,67	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	275	3,1	0,006	2,2
8,10	17,90	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	???		1,2	67,0
40,00	20,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	299	3,4	1,8	90,0
6,00	37,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3225	36,8	1,5	39,7
11,10	167,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	8556	97,7	8,3	49,4
7,90	106,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	8159	93,1	5,3	49,6
40,00	46,00	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	499	5,7	18	391,3
40,00	18,70	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4980	56,8	0,46	24,6
10,00	87,70	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3626	41,4	1,7	19,4
6,00	36,30	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2563	29,3	0,7	19,3
28,00	22,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	777	8,9	0,1	4,5
15,00	0,60	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	6	0,1	0,02	33,3
5,43	20,60	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3000	34,2	0,6	29,1
8,00	0,12	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	7	0,1	0,006	50,0
6,00	18,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2069	23,6	0,8	42,6
8,00	22,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	484	5,5	0,6	27,3
10,00	0,30	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	40	0,5	0,006	20,0
7,40	55,50	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4532	51,7	2,8	50,5
6,00	15,30	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2667	30,4	0,6	39,2
13,10	4,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	149	1,7	0,18	40,9
13,10	6,07	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	206	2,4	0,24	39,5
45,00	36,30	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	560	6,4	0,5	13,8
43,00	65,60	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1011	11,5	0,6	9,1
16,70	50,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1869	21,3	0,9	17,9
16,70	26,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	897	10,2	0,8	29,9
10,00	21,00	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	789	9,0	1,5	71,4
12,00	22,90	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	666	7,6	1,6	69,9

(jatkuu...)

25,40	149,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1848	21,1	3	20,1
16,00	82,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2760	31,5	2,8	34,1
10,00	20,88	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	804	9,2	0,79	37,8
20,00	8,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	200	2,3	0,6	67,4
30,00	5,30	POR1.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	250	2,9	1	188,7
6,00	16,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1298	14,8	0,6	37,0
8,00	31,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1766	20,2	1,3	41,4
6,00	7,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	826	9,4	0,3	42,9
6,00	23,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2497	28,5	0,9	39,1
12,00	113,50	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3980	45,4	4,5	39,6
8,00	3,13	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	388	4,4	0,2	63,9
36,00	147,40	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1632	18,6	63	427,4
13,50	0,30	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	8	0,1	0,02	66,7
35,00	119,80	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1828	20,9	0,35	2,9
5,35	42,40	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4499	51,4	2,1	49,5
5,50	41,80	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	5800	66,2	1,7	40,7
11,00	33,20	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3500	40,0	1,3	39,2
7,80	68,00	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3500	40,0	0,8	11,8
7,00	78,00	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4000	45,7	0,7	9,0
6,20	12,50	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1924	22,0	0,3	24,0
6,20	3,00	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	463	5,3	0,01	3,3
7,70	46,90	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3844	43,9	1,2	25,6
10,40	29,00	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	3372	38,5	1,2	41,4
7,90	47,70	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	4441	50,7	1,5	31,4
40,00	22,10	POR1.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	166	1,9	0,3	13,6
40,00	108,50	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	968	11,1	1,5	13,8
40,00	30,90	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	309	3,5	0,4	12,9
5,80	17,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	798	9,1	0,05	2,8
40,00	132,10	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1375	15,7	1,8	13,6
40,00	159,10	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1597	18,2	2,2	13,8
5,80	35,98	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		2,5	69,5
5,80	4,00	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		0,3	75,0
9,30	60,30	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		4,1	68,0
9,30	34,50	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		2,3	66,7
7,50	20,10	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2214	25,3	1,4	69,7
7,50	19,30	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	2122	24,2	1,3	67,4
10,00	20,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		1,57	75,1
10,00	20,90	POR0.9	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	?????		1,57	75,1
40,00	0,13	POK	2,83	Pyöriväkup. öljypoltin	48	0,5	0,18	39,2
	4,46	POR1.0	97,17					
<b>Yhteensä:</b>	<b>4,59</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
33,00	113,82	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1421	16,2	4,32	38,0
33,00	118,91	POR1.0	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	1427	16,3	4,52	38,0
45,00	0,85	POK	8,42	Pyöriväkup. öljypoltin	116	1,3	0,3	29,7
	9,25	POR1.6	91,58					
<b>Yhteensä:</b>	<b>10,10</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
45,00	0,56	POK	5,64	Pyöriväkup. öljypoltin	100	1,1	0,23	23,2
	9,37	POR1.6	94,36					
<b>Yhteensä:</b>	<b>9,93</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
47,00	44,50	POR0.8	100,00	Pyöriväkup. öljypoltin	333	3,8	1,1	24,7
<b>1721,78</b>	<b>4330,71</b>	<b>TJ/a</b>			<b>168683</b>		<b>184,20</b>	<b>42,5</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>					<b>32,8</b>	<b>mg/MJ</b>	<b>(82 kpl)</b>	

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)
52,00	1,00	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	9	0,1	0	0,0
63,50	16,50	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	125	1,4	0,08	4,8
63,50	17,90	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	136	1,6	0,09	5,0
63,50	9,00	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	68	0,8	0,05	5,6
63,50	5,40	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	41	0,5	0,03	5,6
75,00	5,50	POR1.0	91,67	Pyöriväakup. öljypoltin	37	0,4	0,1	16,7
	0,50	POK	8,33					
<b>Yhteensä:</b>	<b>6,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
75,00	0,20	POK	0,76	Pyöriväakup. öljypoltin	177	2,0	0,6	22,8
	26,10	POR1.0	99,24					
<b>Yhteensä:</b>	<b>26,30</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
75,00	39,40	POR1.0	99,14	Pyöriväakup. öljypoltin	267	3,0	0,9	22,6
	0,34	POK	0,86					
<b>Yhteensä:</b>	<b>39,74</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
75,00	15,10	POR1.0	99,15	Pyöriväakup. öljypoltin	102	1,2	0,3	19,7
	0,13	POK	0,85					
<b>Yhteensä:</b>	<b>15,23</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>					
133,00	70,70	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	305	3,5	0,4	5,7
133,00	41,30	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	178	2,0	0,2	4,8
140,00	108,00	POR0.9	100,00	Pyöriväakup. öljypoltin	584	6,7	3	27,8
<b>1012</b>	<b>357,07</b>	<b>TJ/a</b>			<b>2029</b>	<b>1,9</b>	<b>5,75</b>	<b>16,1</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisminäispäästö:</b>					<b>16,5 mg/MJ</b>	<b>(12 kpl)</b>		

TURVE, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
15,00	59,00	PURU	18,21	Kupliva leijupeti	6840	78,1	1,2	3,7	Sähkösuodin
	265,00	<b>J TURVE</b>	<b>81,79</b>						
<b>Yhteensä:</b>	<b>324,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
12,00	27,00	PURU	11,49	Kupliva leijupeti	7053	80,5	5,9	25,1	Sähkösuodin
	42,00	P TURVE	17,87						
	165,00	<b>J TURVE</b>	<b>70,21</b>						
	1,00	POK	0,43						
<b>Yhteensä:</b>	<b>235,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
27,00	1,00	POK	1,20	Kupliva leijupeti	1413	16,1	2	24,1	Sähkösuodin
	10,00	PUU	12,05						
	67,00	<b>TURVE</b>	<b>80,72</b>						
	5,00	POR2.3	6,02						
<b>Yhteensä:</b>	<b>83,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
20,00	3,10	<b>TURVE</b>	<b>100,00</b>	Kupliva leijupeti	550	6,3	0,5	161,3	Sähkösuodin
29,50	733,00	<b>J TURVE</b>	<b>97,60</b>	Kupliva leijupeti	3200	36,5	6,2	8,3	Sähkösuodin
	18,00	POK	2,40						
<b>Yhteensä:</b>	<b>751,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
12,00	2,27	POR0.2	1,02	Kupliva leijupeti	7128	81,4	7,9	35,5	Sähkösuodin
	11,34	HAKE	5,09						
	2,72	PURU	1,22						
	165,75	<b>J TURVE</b>	<b>74,44</b>						
	40,60	P TURVE	18,23						
<b>Yhteensä:</b>	<b>222,67</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
<b>115,5</b>	<b>1618,77</b>	<b>TJ/a</b>			<b>26184</b>	<b>49,8</b>	<b>23,7</b>	<b>14,6</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					<b>23,1 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
3,00	73,31	<b>J TURVE</b>	<b>100,00</b>	Kupliva leijupeti	8100	92,5	5,89	80,3	Kuitusuodin, Sykloni/multisykloni

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
7,00	0,30	POR0.9	0,84	Kupliva leijupeti	2432	27,8	25,6	713,1	Sykloni/multisykloni
	25,60	<b>TURVE</b>	<b>71,31</b>						
	10,00	JATELIEM	27,86						
<b>Yhteensä:</b>	<b>35,90</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
25,00	47,90	P TURVE	15,05	Kupliva leijupeti	5888	67,2	2,1	6,6	Pesuri
	270,30	<b>J TURVE</b>	<b>84,95</b>						Sähkösuodin
<b>Yhteensä:</b>	<b>318,20</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						Savukaasujen takaisinkierrätys

PUU, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
9,00	145,20	PUU	73,11	Kupliva leijupeti	6573	75,0	10,3	51,9	Sähkösuodin
	0,50	POR0.9	0,25						
	52,90	<b>TURVE</b>	<b>26,64</b>						
<b>Yhteensä:</b>	<b>198,60</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						

HAKE, 0...50 MW<sub>pa</sub>

## LIITE 3 (2/4)

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
2,50	25,10	HAKE	97,29	Kupliva leijupeti	2000	22,8	1,93	74,8	Sykloni/multisykloni
	0,70	POK	2,71						Kuitusuodin
<b>Yhteensä:</b>	<b>25,80</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						Savukaasujen takaisinkierätyks
2,50	9,90	P TURVE	20,54	Kupliva leijupeti	5500	62,8	10,6	219,9	Kuitusuodin
	38,30	HAKE	79,46						Sykloni/multisykloni
<b>Yhteensä:</b>	<b>48,20</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						
<b>5,0</b>	<b>74,00</b>	<b>TJ/a</b>			<b>7500</b>	<b>42,8</b>	<b>12,5</b>	<b>169,3</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					181,2 mg/MJ				

PURU, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
6,00	12,00	KUORI	23,17	Kupliva leijupeti	3500	40,0	0,5	9,7	Sähkösuodin
	33,80	PURU	65,25						
	6,00	J TURVE	11,58						
<b>Yhteensä:</b>	<b>51,80</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						

POR, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
4,00	1,25	POR0.9	100,00	Kupliva leijupeti	200	2,3	0,2	160,0	Sähkösuodin Pesuri

KIVIHIILI, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
40,00	160,90	PUU	19,27	Kupliva leijupeti	7826	89,3	17,6	21,1	Savukaasujen takaisinkierätyks
	4,20	POR0.6	0,50						Sykloni/multisykloni
	669,90	KHIL0.6	80,23						Sähkösuodin
<b>Yhteensä:</b>	<b>835,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						Muu palamisilman vaiheistus tulipesään

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
120,0	550,00	PUU	24,56	Kupliva leijupeti	7504	85,7	140	62,5	Sähkösuodin
	1339,00	<b>TURVE</b>	<b>59,80</b>						
	64,00	POR0.9	2,86						
	286,00	KHIILO.8	12,77						
<b>Yhteensä:</b>	<b>2239,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
80,0	70,00	POR0.9	5,02	Kupliva leijupeti	8139	92,9	37,1	26,6	Sähkösuodin
	357,00	KUORI	25,61						
	72,00	LIETE	5,16						
	73,00	HAKE	5,24						
	822,00	<b>TURVE</b>	<b>58,97</b>						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1394,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
67,0	67,00	POR0.9	4,69	Kupliva leijupeti	7648	87,3	5,1	3,6	Sähkösuodin
	70,00	HAKE	4,90						
	367,00	KUORI	25,66						
	851,00	<b>TURVE</b>	<b>59,51</b>						
	75,00	LIETE	5,24						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1430,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
61,0	10,00	POR1.0	0,88	Kupliva leijupeti	8415	96,1	9	7,9	Sähkösuodin
	741,00	<b>TURVE</b>	<b>65,40</b>						
	280,00	MAAKAASU	24,71						
	102,00	PUU	9,00						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1133,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
<b>328,0</b>	<b>6196,00</b>	<b>TJ/a</b>			<b>31706</b>	<b>90,5</b>	<b>191,2</b>	<b>30,9</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					24,6 mg/MJ				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
295,00	46,00	KHIILO.9	0,77	Kupliva leijupeti	8328	95,1	84	14,0	Muu palamisilman vaiheistus tulipesään
	5163,00	<b>TURVE</b>	<b>85,94</b>						Sykloni/multisykloni
	782,00	MUUT	13,02						
	17,00	POR0.5	0,28						
<b>Yhteensä:</b>	<b>6008,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						

PUU/PUUJÄTE, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
104,00	2465,00	PUU	98,36	Kupliva leijupeti	8338	95,2	24	9,6	Sähkösuodin
	41,00	POR1.6	1,64						Savukaasujen takaisinkierätyks
<b>Yhteensä:</b>	<b>2506,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
200,00	4455,00	<b>PUUJÄTE</b>	<b>96,51</b>	Kupliva leijupeti	8007	91,4	6	1,3	Sähkösuodin
	161,00	MAAKAASU	3,49						
<b>Yhteensä:</b>	<b>4616,00</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
70,00	43,40	MUUT	2,81	Kupliva leijupeti	8476	96,8	156	101,0	Sähkösuodin
	1056,10	<b>PUU</b>	<b>68,40</b>						
	7,80	KHIILO.6	0,51						
	436,60	<b>TURVE</b>	<b>28,28</b>						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1543,90</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,00</b>						
<b>374,0</b>	<b>8665,90</b>	<b>TJ/a</b>			<b>24821</b>	<b>94,4</b>	<b>186,0</b>	<b>21,5</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					38,1 mg/MJ				



Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
66,00	407,98	<b>KUORI</b>	<b>61,49</b>	Kupliva leijupeti	8330	95,1	14,6	<b>22,0</b>	Sähkösuodin
	58,67	POR0.9	8,84						
	27,53	KHIILO.5	4,15						
	8,92	LIETE	1,34						
	160,43	KHIILO.6	24,18						
<b>Yhteensä:</b>	<b>663,53</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						Sykloni/multisykloni

SEKAPOLTTO, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
104,00	453,60	<b>KUORI</b>	19,72	Kupliva leijupeti	8448	96,4	9,2	<b>4,0</b>	Sykloni/multisykloni
	373,80	P TURVE	16,25						
	26,80	KH NL PE	1,17						
	78,20	POR0.9	3,40						
	651,70	<b>J TURVE</b>	<b>28,33</b>						
	410,20	HAKE	17,83						
	305,70	LIETE	13,29						
<b>Yhteensä:</b>	<b>2300,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Polttotekniikka	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
175,00	1681,20	<b>MUUT</b>	<b>62,62</b>	Kupliva leijupeti	8522	97,3	13,4	<b>5,0</b>	Sähkösuodin
	938,10	MAAKAASU	34,94						
	0,51	KHIIII	0,02						
	64,80	J TURVE	2,41						
<b>Yhteensä:</b>	<b>2684,61</b>	<b>TJ/a</b>	100,00						

KIVIHIILI, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
12,00	309,30	KHIIL0.6	100,0	Kiertopeti	4500	51,4	3,7	12,0	-

POK, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
35,00	0,21	POK	100,0	Kiertopeti	12	0,1	0,015	72,1	Sykloni/multisykloni

KUORI, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
7,00	98,20	J TURVE	94,6	Kiertopeti	5700	65,1	7,3	70,3	Sähkösuodin
	5,60	PUU	5,4						
<b>Yhteensä:</b>	<b>103,80</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,0</b>						

TURVE, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
7,00	98,20	J TURVE	94,6	Kiertopeti	5700	65,1	7,3	70,3	Sähkösuodin
	5,60	PUU	5,4						
<b>Yhteensä:</b>	<b>103,80</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,0</b>						
36,20	163,01	KHIIL0.7	16,12	Kiertopeti	7659	87,4	67,6	66,9	Sähkösuodin
	0,32	POR0.9	0,03						
	794,34	TURVE	78,57						
	26,74	PURU	2,64						
	13,04	JATELIEM	1,29						
	5,70	MUUT	0,56						
	7,43	HAKKE	0,73						
	0,40	POR0.1	0,04						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1010,98</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,0</b>						
<b>43,20</b>	<b>1114,78</b>				<b>13359</b>	<b>76,3</b>	<b>74,9</b>	<b>67,2</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					<b>68,3 mg/MJ</b>				

SEKAPOLTTO, 0...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
15,00	5,99	NESTEKAA	26,0	Kiertopeti	627	7,2	2	86,7	Sykloni/multisykloni
	6,06	HAKKE	26,3						Muu palamisilman vaiheistus tulipesään
	10,55	KUORI	45,7						Keraaminen suodin
	0,47	KHIIL0.7	2,0						Absorbentin syöttö tulipesään
<b>Yhteensä:</b>	<b>23,07</b>	<b>TJ/a</b>	<b>100,0</b>						

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
89,00	581,00	KHIL0.4	99,3	Kiertopeti	2621	29,9	9,9	16,9	Sähkösuodin
	1,00	POK	0,2						Absorbenttin syöttö tulipesään
	3,00	POR3.1	0,5						
<b>Yhteensä:</b>	<b>585,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
87,00	2100,50	KHIL0.6	92,4	Kiertopeti	8160	93,2	60	26,4	Sähkösuodin
	160,00	MUUT	7,0						Sykloni/multisykloni
	13,30	POR0.9	0,6						Absorbenttin syöttö tulipesään
<b>Yhteensä:</b>	<b>2273,80</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
<b>176,00</b>	<b>2858,80</b>				<b>10781</b>	<b>61,5</b>	<b>69,9</b>	<b>24,5</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>					<b>24,1</b>	<b>mg/MJ</b>			

PUU/PUUJÄTE, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
65,00	105,70	TURVE	9,5	Kiertopeti	8015	91,5	14	12,6	Sähkösuodin
	56,50	JÄTEPAP.	5,1						
	39,30	MUUT	3,5						
	598,50	PUU	53,9						
	303,30	KHIL0.8	27,3						
	1,80	POK	0,2						
	4,30	POR1.0	0,4						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1109,40</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
75,00	75,00	POR0.9	11,9	Kiertopeti	3761	42,9	3	4,8	Sähkösuodin
	554,00	PUU	88,1						
<b>Yhteensä:</b>	<b>629,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
150,00	139,00	KHIL0.8	4,1	Kiertopeti	8505	97,1	23	6,8	Absorbenttin syöttö tulipesään
	790,00	TURVE	23,3						Savu kaasujen takaisinkierrätys
	2,00	MUUT	0,1						Sähkösuodin
	8,00	POR0.9	0,2						
	63,00	LIETE	1,9						
	2388,00	PUU	70,4						
<b>Yhteensä:</b>	<b>3390,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
76,00	1716,20	PUUJÄTE	98,6	Kiertopeti	7812	89,2	45,9	26,4	Sähkösuodin
	8,50	POR0.9	0,5						
	15,40	KH VEN	0,9						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1740,10</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
<b>366,00</b>	<b>6868,50</b>				<b>28093</b>	<b>80,2</b>	<b>85,9</b>	<b>12,5</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>					<b>13,6</b>	<b>mg/MJ</b>			

TURVE, 50...300 MW<sub>pa</sub>

## LIITE 4 (3/3)

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
240,00	3410,00	<b>P TURVE</b>	<b>55,0</b>	Kiertopeti	7920	90,4	125	<b>20,2</b>	Sähkösuodin
	49,00	KHIL0.4	0,8						
	41,80	POK	0,7						
	1203,00	PUU	19,4						
	1496,00	J TURVE	24,1						
<b>Yhteensä:</b>	<b>6199,80</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
84,00	7,00	POK	0,3	Kiertopeti	7830	89,4	22	<b>10,2</b>	Sähkösuodin
	9,00	POR2.3	0,4						
	1346,00	<b>TURVE</b>	<b>62,7</b>						
	786,00	PUU	36,6						
<b>Yhteensä:</b>	<b>2148,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
61,50	53,00	KHIL0.9	4,2	Kiertopeti	8362	95,5	13	<b>10,4</b>	Sähkösuodin
	4,80	MUUT	0,4						
	242,00	PUU	19,3						
	949,00	<b>TURVE</b>	<b>75,8</b>						
	3,00	POR1.0	0,2						
<b>Yhteensä:</b>	<b>1251,80</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						
<b>385,50</b>	<b>9599,60</b>				<b>24112</b>	<b>91,8</b>	<b>160</b>	<b>16,7</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominais päästö:</b>					<b>13,6</b>	<b>mg/MJ</b>			

TURVE, 300...500 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaineosuus (%)	Poltto-tekniikka	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
325,00	3,00	POK	0,04	Kiertopeti	7841	89,5	30	<b>3,6</b>	Absorbenttin syöttö tulipesään
	453,00	PUU	5,41						Polttoaineen vaiheistus (reburning)
	13,00	POR1.9	0,16						Sähkösuodin
	7900,00	<b>TURVE</b>	<b>94,40</b>						Sykloni/multisykloni
<b>Yhteensä:</b>	<b>8369,00</b>	<b>TJ/a</b>	100,0						

PUU/PUUJÄTE, 0...5 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
4,5	137,10	PUU	100,0	7200	82,2	30,6	223,2	Sykloni/multisykloni
5,0	102,00	PUU	100,0	7800	89,0	27,3	267,6	Sykloni/multisykloni
5,0	104,00	PUU	100,0	7500	85,6	32	307,7	Sykloni/multisykloni
3,5	15,00	PUU	100,0	????		2,2	146,7	-
4,2	60,20	<b>PUU</b>	<b>98,0</b>	6188	70,6	14,9	242,7	Sykloni/multisykloni
	1,20	POR2.3	2,0					
yhteensä:	<b>61,40</b>	TJ/a	100,0					
3,5	15,10	PUU	100,0	2800	32,0	0,5	33,1	-
2,0	37,90	PUU	100,0	????		4	105,5	Sykloni/multisykloni
4,0	112,40	PUU	100,0	6384	72,9	21,7	193,1	Sykloni/multisykloni
5,0	75,30	PUU	100,0	8000	91,3	14,7	195,2	Sykloni/multisykloni
2,0	45,36	PUUJÄTE	100,0	8760	100,0	1,7	37,5	Sykloni/multisykloni
4,4	142,10	PUU	100,0	8000	91,3	5,5	38,7	Sykloni/multisykloni, Pesuri
5,0	57,10	<b>PUU</b>	<b>77,9</b>	6000	68,5	5,7	77,8	Sykloni/multisykloni
	16,20	POR0.8	22,1					
yhteensä:	<b>73,30</b>	TJ/a	100,0					
3,0	33,00	PUU	100,0	6130	70,0	4,5	136,4	Sykloni/multisykloni
5,0	57,00	P TURVE	48,8	6400	73,1	16,4	140,4	Sykloni/multisykloni
	59,80	<b>PUU</b>	<b>51,2</b>					
yhteensä:	<b>116,80</b>	TJ/a	100,0					
4,6	41,34	PUU	100,0	4500	51,4	3,1	75,0	Sykloni/multisykloni
1,8	2,73	PUU	100,0	300	3,4	0,22	80,7	-
5,0	100,00	PUU	100,0	4000	45,7	14	140,0	Sykloni/multisykloni
4,0	0,70	TURVE	1,0	8500	97,0	6	81,6	Sykloni/multisykloni
	72,80	<b>PUU</b>	<b>99,0</b>					
yhteensä:	<b>73,50</b>	TJ/a	100,0					
1,3	27,93	PUU	100,0	6205	70,8	6,87	246,0	Sykloni/multisykloni
1,4	13,64	PUU	100,0	2708	30,9	0,859	63,0	Sykloni/multisykloni
2,0	10,90	PUU	100,0	1200	13,7	1,6	146,8	Sykloni/multisykloni
1,2	16,30	PUU	100,0	4848	55,3	1,33	81,6	Sykloni/multisykloni
5,0	71,70	PUU	100,0	7680	87,7	7,2	100,4	Sykloni/multisykloni
4,5	109,70	PUU	100,0	8112	92,6	36,4	331,8	Sykloni/multisykloni
4,0	80,80	PUU	100,0	7776	88,8	28,2	349,0	Sykloni/multisykloni
5,0	69,56	PUU	100,0	????		35,2	506,0	Sykloni/multisykloni
2,0	17,40	PUU	100,0	8250	94,2	5,4	310,3	Sykloni/multisykloni
3,9	49,10	PUU	100,0	8000	91,3	7,4	150,7	-
3,5	0,40	MUUT	0,6	????		3,1	48,9	Sykloni/multisykloni, Pesuri,
	32,90	<b>PUU</b>	<b>51,9</b>					Savukaasun lauhdutus
	30,10	TURVE	47,5					
yhteensä:	<b>63,40</b>	TJ/a	100,0					
<b>105,3</b>	<b>1818,76</b>	<b>TJ/a</b>		<b>153241</b>	<b>70,0</b>	<b>338,579</b>	<b>186,2</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteis ominaispäästö:				<b>176,6 mg/MJ</b>		(25 kpl)		

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
3,5	11,00	TURVE	100,0	6000	68,5	5	454,5	Sykloni/multisykloni
3,5	89,90	<b>TURVE</b>	<b>92,0</b>	8200	93,6	14,7	150,5	Sykloni/multisykloni
	7,80	HAKE	8,0					
yhteensä:	<b>97,70</b>	TJ/a	100,0					
5,0	23,40	TURVE	100,0	????		6,2	265,0	Sykloni/multisykloni
4,5	21,97	TURVE	100,0	????		5,7	259,4	Sykloni/multisykloni
2,5	14,19	TURVE	100,0	5500	62,8	1,7	119,8	Sykloni/multisykloni, Yläilman syöttö
3,5	55,80	<b>TURVE</b>	<b>79,7</b>	????		9	128,6	Sykloni/multisykloni
	14,20	PUU	20,3					
yhteensä:	<b>70,00</b>	TJ/a	100,0					
3,0	?	HAKE	?	7848	89,6	5,6	100,5	Sykloni/multisykloni
	4,20	PURU	7,5					
	11,60	KUORI	20,8					
	39,90	<b>P TURVE</b>	<b>71,6</b>					
yhteensä:	<b>55,70</b>	TJ/a	100,0					
2,2	27,90	P TURVE	100,0	5760	65,8	1,89	67,7	Sykloni/multisykloni
1,6	8,68	TURVE	100,0	7624	87,0	0,67	77,2	-
3,5	18,70	P TURVE	100,0	4320	49,3	2,8	149,7	-
1,0	4,20	P TURVE	100,0	4320	49,3	0,6	142,9	Sykloni/multisykloni
4,8	0,90	POR0.9	0,9	8500	97,0	6	61,3	Sykloni/multisykloni
	96,90	<b>P TURVE</b>	<b>99,1</b>					
yhteensä:	<b>97,80</b>	TJ/a	100,0					
2,0	25,09	P TURVE	100,0	7000	79,9	3	119,6	Sykloni/multisykloni
<b>40,6</b>	<b>476,33</b>	<b>TJ/a</b>		<b>65072</b>	<b>74,3</b>	<b>62,86</b>	<b>132,0</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>138,5 mg/MJ</b>				

HAKE, 0...5 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
5,0	48,30	HAKE	93,0	8200	93,6	10,7	206,0	Sykloni/multisykloni
	3,64	P TURVE	7,0					
yhteensä:	<b>51,94</b>	TJ/a	100,0					
2,0	1,00	P TURVE	20,8	984	11,2	1	208,3	Sykloni/multisykloni
	3,80	HAKE	79,2					
yhteensä:	<b>4,80</b>	TJ/a	100,0					
4,5	7,80	HAKE	100,0	800	9,1	1,17	150,0	Sykloni/multisykloni
2,9	15,30	HAKE	100,0	4888	55,8	4,8	313,7	Sykloni/multisykloni
2,5	5,30	<b>HAKE</b>	<b>64,6</b>	2100	24,0	0,9	109,8	Sykloni/multisykloni
	2,90	PUUJÄTE	35,4					
yhteensä:	<b>8,20</b>	TJ/a	100,0					
3,0	14,40	<b>HAKE</b>	<b>47,1</b>	2801	32,0	2	65,4	Sykloni/multisykloni
	8,00	PURU	26,1					
	8,20	KUORI	26,8					
yhteensä:	<b>30,60</b>	TJ/a	100,0					
3,8	25,00	HAKE	100,0	1502	17,1	2,93	117,2	Sykloni/multisykloni
<b>23,7</b>	<b>143,64</b>	<b>TJ/a</b>		<b>21275</b>	<b>34,7</b>	<b>23,5</b>	<b>163,6</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>194,5 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
2,0	22,40	PURU	85,8	3000	34,2	2,4	92,0	Sykloni/multisykloni,	
	2,70	HAKE	10,3					Polttoaineen vaiheistus,	
	1,00	KUORI	3,8					Pesuri	
yhteensä:	<b>26,10</b>	TJ/a	100,0						
4,0	17,70	HAKE	33,5	200	2,3	3	56,7	Sykloni/multisykloni	
	35,20	PURU	66,5						
yhteensä:	<b>52,90</b>	TJ/a	100,0						
2,5	10,10	PURU	66,4	3500	40,0	0,9	59,2	Sykloni/multisykloni	
	5,10	HAKE	33,6						
yhteensä:	<b>15,20</b>	TJ/a	100,0						
4,0	9,90	KUORI	32,8	2800	32,0	3,2	106,0	Sykloni/multisykloni	
	20,30	PURU	67,2						
yhteensä:	<b>30,20</b>	TJ/a	100,0						
3,5	6,18	KUORI	48,1	2200	25,1	2,6	202,3	Sykloni/multisykloni	
	6,67	PURU	51,9						
yhteensä:	<b>12,85</b>	TJ/a	100,0						
4,0	10,81	PURU	53,9	8000	91,3	1,845	92,0	Sykloni/multisykloni	
	9,24	HAKE	46,1						
yhteensä:	<b>20,05</b>	TJ/a	100,0						
3,0	39,30	PURU	58,2	8750	99,9	10,1	149,6	Sykloni/multisykloni	
	21,80	KUORI	32,3						
	6,40	HAKE	9,5						
yhteensä:	<b>67,50</b>	TJ/a	100,0						
2,0	3,00	PURU	100,0	2700	30,8	0,4	133,3	Sykloni/multisykloni	
<b>25,0</b>	<b>227,80</b>	<b>TJ/a</b>		<b>31150</b>	<b>44,4</b>	<b>24,445</b>	<b>107,3</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>116,9 mg/MJ</b>					

KUORI, 0...5 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttötunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
4,0	11,80	HAKE	14,6	5800	66,2	7,4	91,8	Sykloni/multisykloni	
	68,80	KUORI	85,4						
yhteensä:	<b>80,60</b>	TJ/a	100,0						
4,0	30,00	KUORI	100,0	6120	69,9	8,34	278,0	Sykloni/multisykloni	
5,0	81,00	KUORI	100,0	5832	66,6	6,5	80,2	Sykloni/multisykloni	
2,5	13,30	P TURVE	23,9	7920	90,4	4,43	79,7	Sykloni/multisykloni	
	40,90	KUORI	73,6						
	1,40	PURU	2,5						
yhteensä:	<b>55,60</b>	TJ/a	100,0						
3,0	45,90	KUORI	87,9	7920	90,4	10,4	199,2	Sykloni/multisykloni	
	1,00	PURU	1,9						
	5,30	HAKE	10,2						
yhteensä:	<b>52,20</b>	TJ/a	100,0						
2,5	13,14	KUORI	100,0	1820	20,8	2,6	197,9	Sykloni/multisykloni	
<b>21,0</b>	<b>312,54</b>	<b>TJ/a</b>		<b>35412</b>	<b>67,4</b>	<b>39,67</b>	<b>126,9</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>148,8 mg/MJ</b>					

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
5,0	33,00	KHIL0.8	96,5	7000	79,9	4	117,0	Sykloni/multisykloni,	
	1,20	POK	3,5					Savukaasujen takaisin kierrätys	
yhteensä:	<b>34,20</b>	TJ/a	100,0						
5,0	38,30	KHIL0.7	100,0	????		2	52,2	-	
<b>10,0</b>	<b>72,50</b>	<b>TJ/a</b>		<b>7000</b>	<b>79,9</b>	<b>6</b>	<b>82,8</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>117,0 mg/MJ</b>					

POR, 0...5 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
2,5	22,78	POR0.9	100,0	4300	49,1	2,1	92,2	Sykloni/multisykloni, Yläilman syöttö	
0,9	9,64	POR0.8	100,0	????		0,58	60,2	Sykloni/multisykloni	
<b>3,4</b>	<b>32,42</b>	<b>TJ/a</b>		<b>4300</b>	<b>49,1</b>	<b>2,68</b>	<b>82,7</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>- mg/MJ</b>					

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
4,0	5,10	POR0.8	100,0	500	5,7	0,8	156,9	-	
4,0	1,30	POR0.8	100,0	100	1,1	0,2	153,8	-	
<b>8,0</b>	<b>6,40</b>	<b>TJ/a</b>		<b>600</b>	<b>3,4</b>	<b>1,0</b>	<b>156,3</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>156,4 mg/MJ</b>					

(POK) SAIRAALAJÄTTEEN POLTTO, 0...5 MW<sub>pa</sub>

Kevyt polttoöljy on vain tukiliekkinä, kiintoaine muodostuu sairaalajätteestä!

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä	
0,7	1,96	POK	100,0	1460	16,7	1,5	763,7	Sykloni/multisykloni	
0,5	1,50	POK	100,0	1574	18,0	2,4	1600,0	Sykloni/multisykloni	
<b>1,2</b>	<b>3,46</b>	<b>TJ/a</b>		<b>3034</b>	<b>17,3</b>	<b>3,9</b>	<b>1125,9</b>	<b>mg/MJ</b>	
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>1197,6 mg/MJ</b>					



PUU/PUUJÄTE, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
7,00	98,90	PUU	100,0	8000	91,3	20,1	203,2	-
23,20	0,60	POR0.9	0,5	3790	43,3	9,5	84,4	-
	112,00	PUU	99,5					
yhteensä:	112,60	TJ/a	100,0					
9,90	45,00	PUU	100,0	3280	37,4	3,9	86,7	-
40,10	256,50	TJ/a		15070	57,3	33,50	130,6	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				148,0 mg/MJ				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
12,00	329,70	PUU	100,0	8116	92,6	20,4	61,9	Sykloni/multisykloni
6,50	90,40	PUU	100,0	6891	78,7	27,6	305,3	Sykloni/multisykloni
5,80	99,80	PUU	100,0	8400	95,9	8,8	88,2	Sykloni/multisykloni
6,00	106,20	PUU	100,0	8400	95,9	9,3	87,6	Sykloni/multisykloni
10,00	89,20	PUU	100,0	2100	24,0	17,8	199,6	Sykloni/multisykloni
18,30	190,50	PUU	99,7	????		16	83,7	Sykloni/multisykloni
	0,60	TURVE	0,3					
yhteensä:	191,10	TJ/a	100,0					
8,00	5,45	PUU	100,0	330	3,8	0,14	25,7	Sykloni/multisykloni, Pesuri
8,40	154,85	PUU	100,0	7998	91,3	14,6	94,3	Sykloni/multisykloni, Polttoaineen vaiheistus
6,50	78,44	PUU	100,0	????		4,1	52,3	Sykloni/multisykloni
7,00	124,00	PUU	100,0	6100	69,6	10,2	82,3	Sykloni/multisykloni
5,80	0,20	POK	0,2	7920	90,4	18,2	139,3	Sykloni/multisykloni
	130,50	PUU	99,8					
yhteensä:	130,70	TJ/a	100,0					
20,00	387,10	PUU	100,0	8128	92,8	146,2	377,7	Sykloni/multisykloni
22,50	2,80	POR0.8	1,4	7895	90,1	21,3	105,6	Sykloni/multisykloni,
	199,00	PUUJÄTE	98,6					Pesuri
yhteensä:	201,80	TJ/a	100,0					
10,00	356,00	PUU	99,97	8350	95,3	71,2	199,9	Pesuri,
	0,10	POK	0,03					Sykloni/multisykloni
yhteensä:	356,10	TJ/a	100,0					
24,00	792,00	PUUJÄTE	97,9	7550	86,2	112	138,4	Märkämenetelmä,
	2,00	POR0.9	0,2					Pesuri,
	15,00	POR1.4	1,9					Sykloni/multisykloni
yhteensä:	809,00	TJ/a	100,0					
10,00	30,30	PUU	85,4	2840	32,4	0,53	14,9	Pesuri,
	5,20	TURVE	14,6					Sykloni/multisykloni
yhteensä:	35,50	TJ/a	100,0					
180,80	3189,34	TJ/a		91018	74,2	498,37	156,3	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				148,6 mg/MJ				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
22,00	498,80	PUU	79,9	8304	94,8	38,6	61,8	Pesuri
	125,60	MAAKAASU	20,1					
yhteensä:	624,40	TJ/a	100,0					
23,00	157,00	PUUJÄTE	100,0	????		35	222,9	Pesuri
24,00	2,80	POR0.9	1,2	7501	85,6	31	133,2	Pesuri
	230,00	PUU	98,8					
yhteensä:	232,80	TJ/a	100,0					
15,00	51,80	PUUJÄTE	100,0	3900	44,5	17	328,2	Pesuri
84,00	1066,00	TJ/a		19705,00	75,0	121,60	114,1	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				141,7 mg/MJ				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
30,50	459,00	PUU	87,3	8116	92,6	7,6	14,5	Pesuri,
	52,70	TURVE	10,0					Sähkösuodin
	14,10	POR0.9	2,7					
yhteensä:	<b>525,80</b>	TJ/a	100,0					
20,00	7,00	PUU	100,0	166	1,9	0,2	28,6	Sähkösuodin
27,00	376,00	PUUJÄTE	92,4	5396	61,6	16,173	39,7	Sähkösuodin
	0,20	POR0.9	0,0					
	30,90	MAAKAASU	7,6					
yhteensä:	<b>407,10</b>	TJ/a	100,0					
19,00	247,60	PUUJÄTE	89,5	4567	52,1	10,652	38,5	Sähkösuodin
	0,20	POR0.9	0,1					
	28,90	MAAKAASU	10,4					
yhteensä:	<b>276,70</b>	TJ/a	100,0					
23,00	637,60	PUU	100,0	7584	86,6	11,5	18,0	Sähkösuodin
<b>119,50</b>	<b>1854,20</b>	<b>TJ/a</b>		<b>25829,00</b>	<b>59,0</b>	<b>46,13</b>	<b>24,9</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>25,1 mg/MJ</b>				

KIVIHIILI, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
23,00	8,00	KHIILI	100,0	148	1,7	3	375,0	-
15,00	7,60	KHIIL0.7	84,4	367	4,2	4,7	522,2	-
	1,40	KHIIL0.9	15,6					
yhteensä:	<b>9,00</b>	TJ/a	100,0					
<b>38,00</b>	<b>17,00</b>	<b>TJ/a</b>		<b>515</b>	<b>2,9</b>	<b>7,7</b>	<b>452,9</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>479,9 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
16,00	141,70	KHIIL0.7	100,0	2424	27,7	6	42,3	Sykloni/multisykloni
26,00	20,90	MAAKAASU	7,9	4652	53,1	11	41,8	Sykloni/multisykloni
	242,20	KHIIL0.7	92,1					
yhteensä:	<b>263,10</b>	TJ/a	100,0					
26,00	240,60	KH VEN	97,3	8109	92,6	9,8	39,6	Sykloni/multisykloni
	1,40	POR0.9	0,6					
	5,40	KH PUOLA	2,2					
yhteensä:	<b>247,40</b>	TJ/a	100,0					
<b>68,00</b>	<b>652,20</b>	<b>TJ/a</b>		<b>15185</b>	<b>57,8</b>	<b>26,80</b>	<b>41,1</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>40,7 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
29,50	24,33	POR0.9	4,2	7844	89,5	2,3	4,0	Sykloni/multisykloni,
	553,10	KHIIL0.7	95,8					Sähkösuodin
yhteensä:	<b>577,43</b>	TJ/a	100,0					
26,40	455,90	KHIIL0.6	98,2	5832	66,6	11	23,7	Sähkösuodin
	8,50	MAAKAASU	1,8					
yhteensä:	<b>464,40</b>	TJ/a	100,0					
6,20	102,30	KHIIL0.6	100,0	5280	60,3	2,56	25,0	Sähkösuodin
36,00	287,20	KHIIL0.6	100,0	5424	61,9	2	7,0	Sähkösuodin
<b>98,10</b>	<b>1431,33</b>	<b>TJ/a</b>		<b>24380</b>	<b>69,6</b>	<b>17,86</b>	<b>12,5</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>13,9 mg/MJ</b>				

TURVE/PALATURVE, 5...50 MW<sub>pa</sub>

## LIITE 6 (3/4)

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
26,00	17,06	POR0.9	28,0	821	9,4	6,18	101,4	Sykloni/multisykloni
	43,90	<b>P TURVE</b>	<b>72,0</b>					
yhteensä:	<b>60,96</b>	TJ/a	100,0					
6,00	74,30	<b>P TURVE</b>	<b>83,2</b>	6400	73,1	12,5	140,0	Sykloni/multisykloni
	15,00	HAKKE	16,8					
yhteensä:	<b>89,30</b>	TJ/a	100,0					
7,00	48,40	PUU	35,2	8553	97,6	7,6	55,3	Sykloni/multisykloni
	89,10	<b>TURVE</b>	<b>64,8</b>					
yhteensä:	<b>137,50</b>	TJ/a	100,0					
6,00	84,50	<b>P TURVE</b>	<b>89,0</b>	8000	91,3	14,4	151,7	Sykloni/multisykloni
	10,40	HAKKE	11,0					
yhteensä:	<b>94,90</b>	TJ/a	100,0					
6,00	12,90	<b>TURVE</b>	<b>97,0</b>	????		0,7	52,6	Savukaasun lauhdutus
	0,40	MUUT	3,0					
yhteensä:	<b>13,30</b>	TJ/a	100,0					
<b>51,00</b>	<b>395,96</b>	<b>TJ/a</b>		<b>23774</b>	<b>67,8</b>	<b>41,38</b>	<b>104,5</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>112,1 mg/MJ</b>				

JYRSINTURVE, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
8,50	138,13	<b>J TURVE</b>	<b>98,7</b>	6503	74,2	1,36	9,7	Pesuri
	1,88	PURU	1,3					
yhteensä:	<b>140,01</b>	TJ/a	100,0					

PURU, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
18,00	220,50	<b>PURU</b>	<b>62,9</b>	6300	71,9	1,1	3,1	Polttoaineen vaiheistus,
	22,70	HAKKE	6,5					Sähkösuodin
	0,90	TB POK	0,3					
	0,50	POR0.8	0,1					
	105,80	KUORI	30,2					
yhteensä:	<b>350,40</b>	TJ/a	100,0					

HAKKE, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
9,00	11,10	PURU	12,7	6714	76,6	15	171,4	Pesuri,
	48,00	<b>HAKKE</b>	<b>54,9</b>					Sykloni/multisykloni
	28,40	KUORI	32,5					
yhteensä:	<b>87,50</b>	TJ/a	100,0					
33,00	8,60	POR0.9	3,0	4056	46,3	38,7	136,0	Sykloni/multisykloni
	276,00	<b>HAKKE</b>	<b>97,0</b>					
yhteensä:	<b>284,60</b>	TJ/a	100,0					
<b>42,00</b>	<b>372,10</b>	<b>TJ/a</b>		<b>10770,00</b>	<b>61,5</b>	<b>53,70</b>	<b>144,3</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>158,1 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
8,0	7,50	PURU	5,6	7800	89,0	8,6	64,4	Sykloni/multisykloni,
	116,00	KUORI	86,8					Pesuri
	10,10	MAAKAASU	7,6					
yhteensä:	<b>133,60</b>	TJ/a	100,0					
13,0	275,00	KUORI	94,05	7756	88,5	25,1	85,8	Sykloni/multisykloni
	17,33	HAKKE	5,93					
	0,08	POR1.0	0,03					
yhteensä:	<b>292,41</b>	TJ/a	100,0					
<b>21,0</b>	<b>426,01</b>	TJ/a		<b>15556</b>	<b>88,8</b>	<b>33,70</b>	<b>79,1</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>75,1 mg/MJ</b>				

POR, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
20,0	0,21	POR0.9	100,0	14	0,2	0,004	19,0	Sykloni/multisykloni
6,0	10,10	POR1.0	100,0	1100	12,6	1,5	148,5	Sykloni/multisykloni
<b>26,0</b>	<b>10,31</b>	TJ/a		<b>1114</b>	<b>6,4</b>	<b>1,504</b>	<b>145,9</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>146,9 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
47,5	37,60	POR0.8	99,5	196	2,2	0,3	7,9	Sähkösuodin
	0,20	POK	0,5					
yhteensä:	<b>37,80</b>	TJ/a	100,0					
47,5	52,40	POR0.8	99,6	273	3,1	0,4	7,6	Sähkösuodin
	0,20	POK	0,4					
yhteensä:	<b>52,60</b>	TJ/a	100,0					
<b>95,0</b>	<b>90,40</b>	TJ/a		<b>469,0</b>	<b>2,7</b>	<b>0,7</b>	<b>7,7</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>7,7 mg/MJ</b>				

POK, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
5,80	2,54	POK	100,0	550	6,3	0,18	70,9	Sykloni/multisykloni

SEKAPOLTTO, 5...50 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
36,00	13,00	KHIIL1.0	2,0	7727	88,2	199	299,2	Sykloni/multisykloni
	<b>248,00</b>	TURVE	<b>37,3</b>					
	145,00	POR0.8	21,8					
	<b>259,00</b>	PUU	<b>38,9</b>					
yhteensä:	<b>665,00</b>	TJ/a	100,0					

PUU/PUUJÄTE, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
64,00	79,70	MÖ-PIKI	4,5	8410	96,0	114	63,9	Sykloni/multisykloni,
	201,90	POR1.0	11,3					Pesuri
	438,80	P TURVE	24,6					
	1026,70	<b>PUUJÄTE</b>	<b>57,6</b>					
	36,70	MUUT	2,1					
yhteensä:	<b>1783,80</b>	TJ/a	100,0					
103,00	883,40	<b>PUUJÄTE</b>	<b>60,5</b>	5276	60,2	201,8	138,3	Sykloni/multisykloni
	518,70	MAAKAASU	35,5					
	15,20	POR	1,0					
	41,90	TURVE	2,9					
yhteensä:	<b>1459,20</b>	TJ/a	100,0					
<b>167,0</b>	<b>3243,0</b>	TJ/a		<b>13686</b>	<b>78,1</b>	<b>315,8</b>	<b>97,4</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>				<b>92,6 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menetelmä
86,00	1301,00	PUU	<b>94,0</b>	8400	95,9	38	27,5	Sähkösuodin
	83,00	POR1.0	6,0					
yhteensä:	<b>1384,00</b>	TJ/a	100,0					
100,00	1681,00	<b>PUUJÄTE</b>	<b>81,4</b>	????		215	104,1	Sähkösuodin
	53,00	POR0.9	2,6					
	331,00	TURVE	16,0					
yhteensä:	<b>2065,00</b>	TJ/a	100,0					
90,00	133,90	MÖ-PIKI	5,3	8460	96,6	413	162,5	Pesuri,
	50,60	MUUT	2,0					Sähkösuodin
	607,50	P TURVE	23,9					
	329,10	POR1.0	13,0					
	1420,00	<b>PUUJÄTE</b>	<b>55,9</b>					
yhteensä:	<b>2541,10</b>	TJ/a	100,0					
72,00	925,00	<b>PUUJÄTE</b>	<b>85,3</b>	7991	91,2	31	28,6	Sähkösuodin,
	160,00	MAAKAASU	14,7					Pesuri
yhteensä:	<b>1085,00</b>	TJ/a	100,0					
170,00	2541,00	PUU	<b>84,8</b>	8516	97,2	64	21,3	Sähkösuodin
	318,00	POR1.0	10,6					
	139,00	MUUT	4,6					
yhteensä:	<b>2998,00</b>	TJ/a	100,0					
75,00	75,00	POR0.9	11,9	3761	42,9	3	4,8	Sähkösuodin
	554,00	PUU	<b>88,1</b>					
yhteensä:	<b>629,00</b>	TJ/a	100,0					
<b>593,0</b>	<b>10702,1</b>	TJ/a		<b>37128</b>	<b>84,8</b>	<b>764,0</b>	<b>71,4</b>	<b>mg/MJ</b>
<b>käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:</b>				<b>54,8 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
70,0	1,30	POR1.0	0,5	3868	44,2	2	8,1	Sähkösuodin
	246,70	<b>KHIIL0.7</b>	<b>99,5</b>					
yhteensä:	<b>248,00</b>	TJ/a	100,0					
54,0	55,06	KHIIL0.5	3,7	8047	91,9	83,2	55,8	Yläilman syöttö,
	1435,12	<b>KHIIL0.6</b>	<b>96,3</b>					Sykloni/multisykloni,
yhteensä:	<b>1490,18</b>	TJ/a	100,0					Sähkösuodin
120,0	929,70	<b>KHIIL0.9</b>	<b>61,2</b>	6439	73,5	111	73,0	Sähkösuodin
	95,20	PUUJÄTE	6,3					
	495,10	MAAKAASU	32,6					
yhteensä:	<b>1520,00</b>	TJ/a	100,0					
104,0	95,00	POR0.9	3,3	7978	91,1	174	60,0	Sähkösuodin,
	1,00	JÄTEÖLJY	0,0					Polttoaineen vaiheistus (reburning)
	2480,00	<b>KHIIL0.5</b>	<b>85,5</b>					
	323,00	KUORI	11,1					
yhteensä:	<b>2899,00</b>	TJ/a	100,0					
<b>348,0</b>	<b>6157,2</b>	<b>TJ/a</b>		<b>26332</b>	<b>75,1</b>	<b>370,2</b>	<b>60,1</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>54,3 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
125,0	7,40	KHIIL0.7	100,0	47	0,5	1,1	148,6	-
57,0	43,00	KHIILI	100,0	543	6,2	8	186,0	-
<b>182,0</b>	<b>50,4</b>	<b>TJ/a</b>		<b>590</b>	<b>3,4</b>	<b>9,1</b>	<b>61,1</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>57,1 mg/MJ</b>				

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
130,0	518,70	KHIIL0.6	100,0	2016	23,0	86	165,8	Sykloni/multisykloni
65,0	0,26	KHIILI	100,0	28	0,3	0,05	192,3	Sykloni/multisykloni
<b>195,0</b>	<b>519,0</b>	<b>TJ/a</b>		<b>2044</b>	<b>11,7</b>	<b>86,05</b>	<b>165,8</b>	<b>mg/MJ</b>
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:				<b>166,2 mg/MJ</b>				

TURVE, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
100,00	236,00	POR0.9	10,0	8544	97,5	20,7	8,8	Sähkösuodin,
	8,00	PUUJÄTE	0,3					Yläilman syöttö
	49,00	KUORI	2,1					
	2069,00	<b>TURVE</b>	<b>87,6</b>					
yhteensä:	<b>2362,00</b>	TJ/a	100,0					

KUORI, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine- osuus (%)	Käyttö- tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis- menetelmä
64,00	10,80	JATELIEM	2,5	8651	98,8	15,6	36,2	Sähkösuodin
	308,30	<b>KUORI</b>	<b>71,6</b>					
	111,60	POR0.9	25,9					
yhteensä:	<b>430,70</b>	TJ/a	100,0					

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
70,00	18,90	POR0.7	100,0	297	3,4	1	52,9	Sähkösuodin

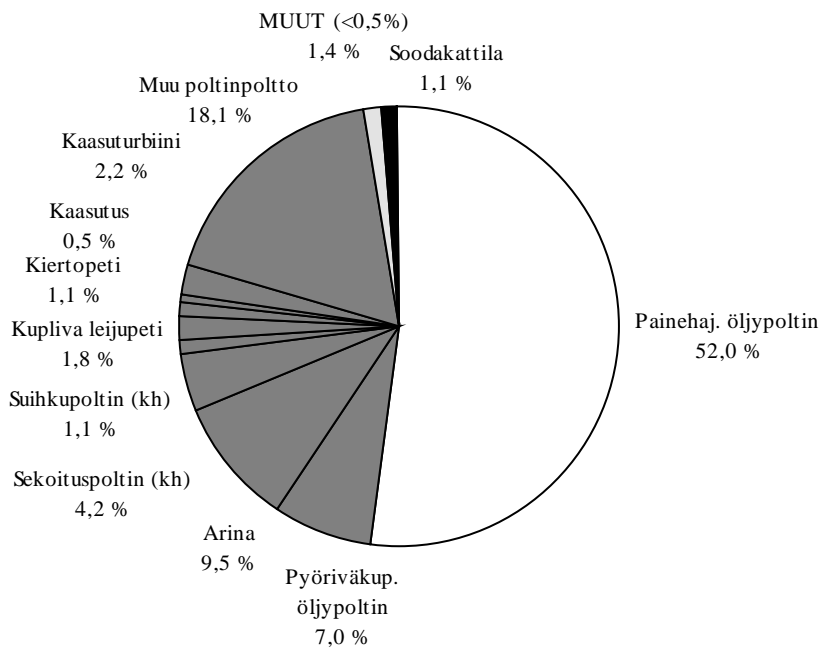
SEKAPOLTTO, 50...300 MW<sub>pa</sub>

Pateho (MW)	Pakulutus (TJ/a)	Polttoaine	Polttoaine-osuus (%)	Käyttö-tunnit (h/a)	Käyttöaste (%)	Päästö (t/a)	Omin.päästö (mg/MJ)	Rajoittamis-menettelmä
140,00	68,90	POR0.9	15,5	1298	14,8	28,7	64,6	Sähkösuodin
	33,90	KHIILO.4	7,6					
	169,30	P TURVE	38,1					
	169,30	PUUJÄTE	38,1					
	3,10	POK	0,7					
yhteensä:	444,50	TJ/a	100,0					
122,00	1252,00	MAAKAASU	46,7	8463	96,6	55	20,5	Sähkösuodin,
	107,00	POR0.6	4,0					Pesuri
	1277,00	PUUJÄTE	47,6					
	47,00	MÄNTYÖLJ	1,8					
yhteensä:	2683,00	TJ/a	100,0					
262,0	3127,5	TJ/a		9761	55,7	83,70	26,8	mg/MJ
käyttötunneilla painotettu yhteisominaispäästö:					26,4 mg/MJ			

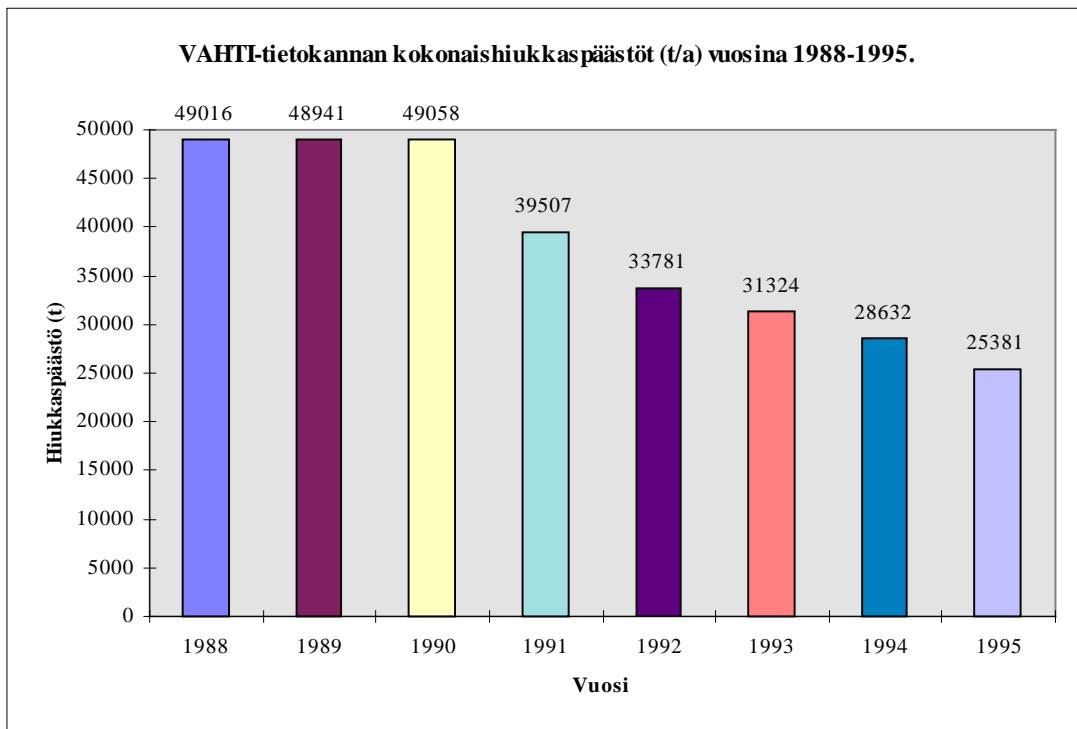
	polttotekniikka	lkm (kpl)	osuus kok.lkm (%)	yhteisteho (MW)		mukana lasken- nassa (MW)	lkm (kpl)	mukana olevien osuus pa- tehosta (%)	keski- teho (MW)		
1	Painehajoitteinen öljypoltin	1029	kpl	52,0	%	7781	MW *)	1520	201	19,5	7,6
2	Pyöriväkuppinen öljypoltin	139	kpl	7,0	%	3031	MW	2797	110	92,3	25,4
3	Arina	187	kpl	9,5	%	3519	MW	3247	131	92,3	24,8
4	Sekoituspoltin (kh)	83	kpl	4,2	%	7503	MW	7458	19	99,4	392,5
	Sekoituspoltin (turve)	6	kpl	0,3	%	1075	MW	958	4	89,1	239,5
5	Suihkupoltin (kh)	21	kpl	1,06	%	2001	MW	2001	7	100,0	285,9
	Suihkupoltin (turve)	2	kpl	0,1	%	432	MW	432	2	100,0	216,0
6	Sykloni	1	kpl	0,05	%	32	MW	0	0	-	-
7	Kupliva leijupeti	36	kpl	1,82	%	1680	MW	1557	26	92,6	59,9
8	Kiertopeti	22	kpl	1,11	%	1401	MW	1379	16	98,4	86,2
9	Kaasutus	10	kpl	0,51	%	?	MW	0	0	-	-
10	Kaasuturbiini	44	kpl	2,2	%	?	MW	0	0	-	-
11	Polttomoottori	6	kpl	0,30	%	86	MW	0	0	-	-
12	Kombikytkentä sähköntuotannossa	9	kpl	0,46	%	?	MW	0	0	-	-
13	Muu poltinpoltto	357	kpl	18,1	%	?	MW	0	0	-	-
14	PFP paineistettu leijupeti	1	kpl	0,05	%	10	MW	0	0	-	-
15	kiertopetikaasutin	1	kpl	0,05	%	-	MW	-	0	-	-
16	Sähkökattila	1	kpl	0,05	%	-	MW	-	0	-	-
17	epäsuorapölypoltto	1	kpl	0,05	%	165	MW	165	1	100,0	165,0
	SOODAKATTILA	21	kpl	1,06	%	4163	MW	4163	20	100,0	208,2
	YHT.	1977	kpl	100,00	%	????	MW	25676	537		47,8

\*) ARVIO!! (201 kpl keskitheho n. 7,6 MW/kpl \* 1029 kpl)

**VAHTI-järjestelmän polttotekniikkaosuudet kattiloiden  
kokonaismäärästä (1977 kpl) v. 1995.**







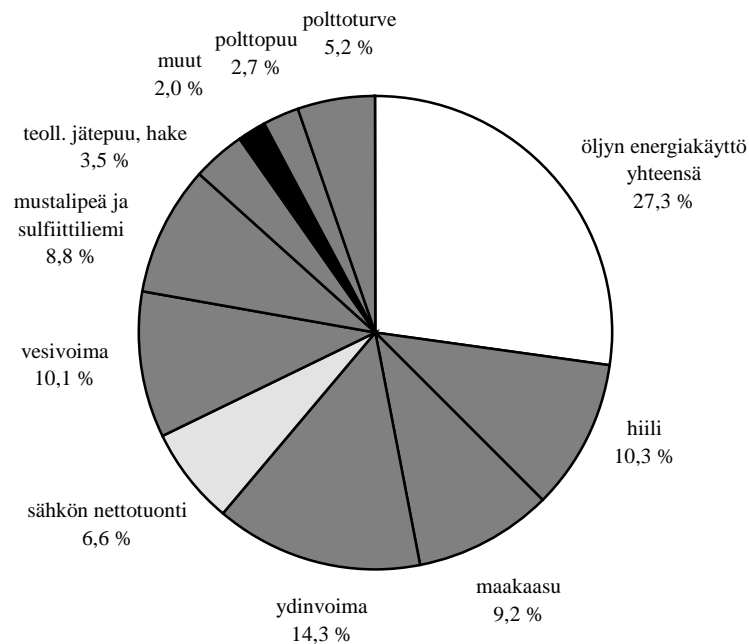
Taulukossa ylempi luku on yksikössä PJ (= 10<sup>15</sup> J) ja alempi %:

öljyn energia- käyttö (sis. liikenteen ym.)	hiili	maa- kaasu	ydin- voima	sähkön netto- tuonti	vesi- voima	mustalipeä ja sulfiitti- liemi
350,7	132,4	118,5	184	85,3	129,9	112,8
27,29	10,30	9,22	14,32	6,64	10,11	8,78

teollisuuden. jätepuu, hake yms.	masuuni- ja koksamo- kaasu	teolli- suuden jäte- lämpö	poltto- puu	poltto- turve	yhdys- kunta- jäte yms.	energian kokonais- kulutus	
45,2	17,9	6,5	34,3	66,8	0,9	<b>1285,2<sup>*)</sup></b>	PJ
3,52	1,39	0,51	2,67	5,20	0,07	<b>100,00</b>	%

<sup>\*)</sup> 1285 PJ  $\approx$  31,5 Mtoe

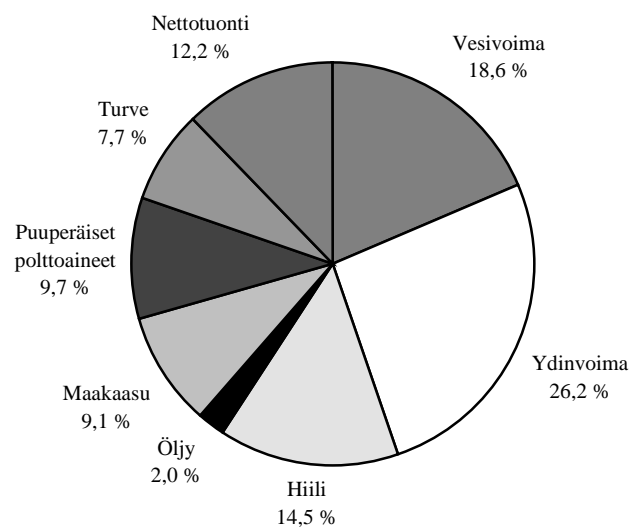
**Primäärienergian kokonaiskulutus energialähteittäin v. 1995  
(Tilastokeskus 1996)**



Lähde: Tilastokeskus (1996). Energiatilastot 1995.

Vesivoima	12,8	TWh	18,6	%
Ydinvoima	18,1	TWh	26,2	%
Hiili	10	TWh	14,5	%
Öljy	1,4	TWh	2,0	%
Maakaasu	6,3	TWh	9,1	%
Puuperäiset polttoaineet	6,7	TWh	9,7	%
Turve	5,3	TWh	7,7	
Nettotuonti	8,4	TWh	12,2	%
<b>Yhteensä:</b>	<b>69</b>	<b>TWh</b>	<b>100,0</b>	<b>%</b>

Primäärienergiälähteet Suomen sähköntuotannossa v. 1995.



Lähde: Tilastokeskus (1996). Energiatilastot 1995.