

Mikael Ohlström, Eemeli Tsupari,
Antti Lehtilä & Taisto Raunemaa

Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa

Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen
vaikutukset

Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa

Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset

Mikael Ohlström, Eemeli Tsupari & Antti Lehtilä
VTT Prosessit

Taisto Raunemaa
Kuopion yliopisto



ISBN 951-38-6720-X (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6721-8 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT Prosessit, Biologinkuja 7, PL 1602, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT Processer, Biologgränden 7, PB 1602, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Processes, Biologinkuja 7, P.O.Box 1602, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Toimitus Leena Ukoski

Valopaino Oy, Helsinki 2005

Ohlström, Mikael, Tsupari, Eemeli, Lehtilä, Antti & Raunemaa, Taisto. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset [Fine particle emissions and their reduction potentials in Finland. The effects of greenhouse gas emission reduction]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2300. 91 s. + liitt. 1 s.

Avainsanat fine particle, particulate emissions, PM2.5, PM1, greenhouse gas emissions, energy production, industry, small-scale wood burning, scenarios, emissions reduction

Tiivistelmä

Julkaisuun on koottu uudet mittaus- ja tutkimustulokset Suomen polttoperäisistä primääripienhiukkasista ja niiden päästökertoimista (PM2,5 ja PM1) sekä eri vähennystekniikoiden vaikutukset pienhiukkaspäästöihin ja niiden ominaisuuksiin ja arvioitu vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Tiedot on liitetty VTT:ssä käytössä olevaan IEA:n ETSAP-yhteistyössä kehitettyyn TIMES-energiajärjestelmämalliin, jolla voidaan arvioida päästöjen kustannustehokasta rajoittamista ja rajoittamisen vaikutuksia muihin ilmapäästöihin. Erityisesti keskityttiin kotimaisiin polttoaineisiin (puuhun, turpeeseen, jätteenpolttoon). Hankkeessa yhdistettiin tietämys pienhiukkasten päästöistä eri prosesseissa (polttoaineet, polttotekniikat, rajoitustekniikat, laitoskoko- luokat, teollisuusprosessit jne.) energiajärjestelmämallinnukseen ja skenaariotarkasteluihin siitä, miten Suomen energia- ja teollisuusjärjestelmä tulee muuttumaan Kioton 1. velvoitekauden ja oletettujen myöhempien velvoitekausien rajoitusten alaisena. Työssä hyödynnettiin uusimpia kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaksi talvella 2005 tehtyjä VTT:n skenaarioita ja niiden lähtöoletuksia.

Suurkattiloilla ja öljypoltossa ovat PM2,5-pienhiukkasten ominaispäästöt parhaimmillaan alle sadasosa 10–50 kW:n puukattiloiden ja tulisijojen päästömääristä (tasot n. 0,5–50 mg/MJ vs. 50–600 mg/MJ). Pienhiukkasten ominaispäästöt riippuvat voimakkaimmin käytetystä hiukkaserotuslaitteistosta. Käytetyllä polttoaineella tai -tekniikalla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Pienhiukkasten erottamiseksi savukaasusta letkusuodatin on kaikkein tehokkain erotuslaite. Tuoreiden mittausten perusteella voidaan sanoa, ettei niistä juuri pääse PM1-pienhiukkasia läpi (massasta 1–10 %), vaan hiukkaspäästö muodostuu lähinnä suodattimesta tai savukaasukanavistosta irtoavista karkeista partikkeleista tai materiaalista. Työssä arvioitiin lisäksi erotuslaitteiden erotusasteita sekä investointi- ja käyttökustannuksia.

PM2,5-pienhiukkaspäästöt vähenevät eri skenaarioissa vuoden 2002 tasosta 15–21 % vuoteen 2010 mennessä ja 30–38 % vuoteen 2020 mennessä, vaikka Suomen primäärienergian kokonaiskulutus nousee kaikissa skenaarioissa selvästi. Kasvihuonekaasujen rajoittaminen nopeuttaa jonkin verran päästöjen vähenemistä. Bioenergian käytön lisäys kohdistuu pääasiassa lämpö- ja voimalaitoksiin, joissa puun polton hiukkaspäästöt eivät oletusten mukaan poikkea merkittävästi fossiilisten polttoaineiden tai turpeen päästöistä, kun käytössä on tehokkaat hiukkaserotuslaitteet, kuten sähkösuodatin ja kuitusuodatin.

Hiilidioksidin päästökauppa vaikuttaa hiukkaspäästöihin epäsuorasti päästöoikeuksien hinnan kautta. Jos hinta jää alhaiseksi, päästöoikeuksia kannattaa ostaa Suomeen runsaasti, jolloin päästöjen kehitys on vuoteen 2015 saakka lähellä perusskenaarion kehitystä. Korkeammilla päästöoikeuksien hinnoilla hiukkaspäästöjen kehitys on lähempänä kotimaisiin toimiin perustuvaa rajoitusskenaariota (Kioto) ja jää Kioton 1. jakson jälkeen jo sen alapuolelle. Uusiutuvien energialähteiden edistämisohjelman mukaisessa UEO-skenaariossa puun pienpolton runsas lisääminen johtaa hiukkaspäästöjen vähenemiseen hidastumiseen, mutta tämän vaikutus päästöjen kokonaistaseeseen on melko pieni.

Ohlström, Mikael, Tsupari, Eemeli, Lehtilä, Antti & Raunemaa, Taisto. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset [Fine particle emissions and their reduction potentials in Finland. The effects of greenhouse gas emission reduction]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2300. 91 p. + app. 1 p.

Keywords fine particle, particulate emissions, PM2.5, PM1, greenhouse gas emissions, energy production, industry, small-scale wood burning, scenarios, emissions reduction

Abstract

In this study, new measuring and research results from combustion-based primary fine particles in Finland were gathered up in order to calculate the emission factors (PM2.5 and PM1). Also the effects of particle separation devices on fine particle emissions, and some emission reduction costs were evaluated. The fine particle data modules were then added to VTT's national energy system model TIMES that has been developed under the IEA ETSAP co-operation. With TIMES model, cost-efficient emission reduction can be evaluated, and the simultaneous changes occurring in the emissions of other air pollutants can be observed. The focus has been especially on the nationally important fuels like wood, peat, and waste derived fuels in mixed fuel combustion. Knowledge of fine particle emissions from different processes has been combined to energy system modelling and to scenario studies on how the Finnish energy production and industrial system will be changing due to commitments of the first and assumed following Kyoto periods.

In large-scale boilers the specific emissions of PM2.5 fine particles are even less than hundredth part of the emissions of small-scale (10–50 kW) boilers, i.e. 0.5–50 mg/MJ compared to 50–600 mg/MJ. The specific emissions of fine particles depend most of all on particle separation device(s) used. The used fuel or combustion technique does not have as great influence. The most effective separation device for fine particles is fabric filter. Recent measurements show that after fabric filter the share of PM1 in flue gas is only 1–10 % of the total particle mass that is mainly composed of coarse particles/material released from filter or from exhaust gas duct. In addition, collecting efficiencies as well as investment and operating costs of particle separation devices were roughly calculated in this study.

PM2.5 fine particle emissions are reduced 15–21 % from year 2002 to 2010, and 30–38 % till year 2020 in different scenarios calculated, despite the fact that primary energy consumption rises clearly in all the scenarios considered. Reducing greenhouse gas emissions speeds up fine particle emission reduction. Additional use of bioenergy will mainly take place in heat and power plants where fine particle emissions of burning wood don't diverge significantly from emissions from fossil fuels or peat because of efficient particle separation devices, as electrostatic precipitator and fabric filter, used.

Emission trading of carbon dioxide has indirect impact on particle emissions through the price of emission allowances. If the price remains low, it's cheaper to buy plenty of emission allowances to Finland in which case the volume of energy production remains at high level and the amount of particle emissions till 2015 is closely-based to base scenario emissions. At the higher prices of CO₂ emission allowances, the progress of particle emissions is more like that in the Kyoto scenario basing on national actions to reduce greenhouse gases, and after the first Kyoto period remains already lower. In the Renewable Energy Sources (UEO) scenario, the great increase of small-scale wood burning leads to slower decrease of particle emissions, but the effect on the total emissions is still rather low.

Alkusanat

Tämä raportti esittelee VTT Prosesseissa tehdyn selvityksen, joka toteutettiin osana Tekesin Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys -teknologiaohjelmaa (FINE). FINE-ohjelman rahoituksen lisäksi rahoittajina olivat Finergyn ympäristöpooli (nyk. Energiateollisuus ry) ja VTT. Tässä julkaisussa esiteltävän tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää Suomen poltto- ja prosessiperäiset primääriset eli suorat pienhiukkaspäästöt (PM_{2,5} ja PM₁) eri kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisskenaarioissa vuoteen 2025 saakka. Tutkimuksella saadaan arvioita siitä, mitkä ilmastonmuutoksen hillinnässä käytettävät teknologiat samalla edistävät myös pienhiukkaspäästöjen vähentämistä ja mitkä teknologiat toisaalta aiheuttavat terveysriskin kohoamista lisääntyvien pienhiukkaspäästöjen muodossa. Tämä tieto on tarpeellista eri kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinojen vaikutusten arvioinnissa, jotta voitaisiin ohjata puhtaiden teknologioiden käyttöönottoa kaikilta kannoilta kestäviin ratkaisuihin. Työ tehtiin VTT Prosesseissa vuosien 2003–2005 aikana.

Tämän työn johtoryhmän puheenjohtajana toimi Jukka Leskelä (Finergy/Energiateollisuus ry). Johtoryhmän jäseninä olivat Sami Tuhkanen tai Mikko Moisio (Tekes), Pekka Järvinen (FINE-ohjelman päällikkö), Niko Karvosenoja (SYKE), Taisto Raunemaa (KY), Veli Linna (VTT Prosessit) ja Jorma Jokiniemi (VTT Prosessit). Sihteerinä toimi projektipäällikkö Mikael Ohlström (VTT Prosessit). Esitän lämpimät kiitokset puheenjohtajalle ja koko johtoryhmälle antoisasta yhteistyöstä!

Kiitän myös kaikkia asiantuntijoita, jotka ovat osallistuneet tietojen tuottamiseen ja kommentoimiseen projektin eri vaiheissa (mm. hiukkaskyselyyn vastanneet). Kiitos erityisesti prof. Taisto Raunemalle, joka kirjoitti kattavasti puun pienpolton päästöistä ja kehitysmahdollisuuksista (kohta 4.1).

Erityiset kiitokseni myös Antti Lehtilälle VTT Prosesseista yhteistyöstä TIMES-energiajärjestelmämallin laajentamisessa tämän tutkimuksen tarpeisiin sekä Eemeli Tsuparille mm. hiukkaskyselyn suorittamisesta ja päästökertoimien analysoinnista.

Espoossa 24.5.2005

Mikael Ohlström

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Lyhenne- ja symboliluettelo	8
1. Johdanto	11
2. Pienhiukkaset ja ilmastonmuutos.....	13
2.1 Kansainväliset rajoittamistavoitteet ja -sopimukset	14
2.1.1 Kasvihuonekaasujen rajoittaminen	14
2.1.2 Pienhiukkasten rajoittaminen	15
2.2 Hyötyjä pienhiukkas- ja khk-päästöjen samanaikaisesta tarkastelusta	16
3. Pienhiukkaspäästöjen vähentämistekniikat ja -kustannukset.....	17
3.1 Dynaamiset erottimet.....	18
3.1.1 Sedimentaatiokammiot ja lamellierottimet	18
3.1.2 Sykloni ja multisykloni	18
3.2 Sähkösuodattimet	20
3.3 Kuitusuodattimet	23
3.4 Märkäerottimet	26
3.5 Yhteenveto hiukkaspäästöjen puhdistuslaitteista	27
3.5.1 Erotusasteet ja ominaisuudet.....	27
3.5.2 Kustannukset ja päästötasot	30
4. Polttoperäiset pienhiukkasten ominaispäästöt Suomessa	36
4.1 Puun pienpoltto.....	36
4.1.1 Päästön muodostuminen ja hallinta puun poltossa.....	36
4.1.2 Puun pienpolttolaitteiden tekninen kehitystyö ja tulevaisuus	43
4.1.3 Yhteenveto suomalaisten pienpolttolaitteiden päästöistä ennakkotulosten perusteella	45
4.2 Energiantuotanto.....	46
4.2.1 Pölypoltto	46
4.2.2 Leijupetikattilat	48
4.2.3 Arinakattilat.....	50
4.2.4 Öljykattilat.....	52
4.2.5 Dieselmoottorit ja muut energiantuotantoprosessit.....	54
4.3 Teollisuusprosessit	55

4.3.1	Metalliteollisuus.....	55
4.3.2	Metsäteollisuus.....	56
4.3.3	Muu teollisuus.....	57
4.4	Liikenne.....	58
5.	Skenaariotarkastelu Suomen polttoperäisten pienhiukkaspäästöjen kehittymisestä..	60
5.1	Eri teknologioiden ilmansaasteiden päästöjen esittäminen TIMES-mallissa...	60
5.1.1	Päästölähteiden kuvaus	60
5.1.2	Hiukkaspäästöjen päästökertoimet.....	61
5.2	Tarkastellut kokonaisskenaariot	64
6.	Tulokset.....	66
6.1	Energian kokonaiskulutus ja kasvihuonekaasut	66
6.2	Hiukkasten kokonaispäästöt	69
6.3	Pienpolton hiukkaspäästöt	73
6.4	Teollisuuden hiukkaspäästöt	76
6.5	Tulosten epävarmuudet	79
7.	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	81
	Lähdeluettelo	88

Liite 1: Hiukkaskyselyn tiedonkeruulomake

Lyhenne- ja symboliluettelo

BFB	kupliva leijupeti (bubbling fluidised bed)
CFB	kiertoleijupeti (circulating fluidised bed)
CLRTAP	kv. päästöraportointi (inventaarit)
EC	alkuainehiili (elemental carbon)
EPA	Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto
ESP	Sähkösuodatin (electrostatic precipitator)
ETSAP	IEA:n (ks. IEA) energiateknologian tutkimusohjelma (Energy Technology Systems Analysis Programme)
FINE	Tekesin pienhiukkasiin keskittyvä teknologiaohjelma
FF	kuitusuodatin, letkusuodatin, pussisuodatin (fabric filter)
IEA	International Energy Agency
IPCC	hallitustenvälinen ilmastopaneeli
KHK-päästöt	kasvihuonekaasupäästöt
LCP-direktiivi	direktiivi suurille voimalaitoksille (>50 MW _{pa})
Luvo	kattilan palamisilman esilämmitin
MW _{pa}	polttoainetehto megawatteina
OC	orgaaninen hiili (organic carbon)
PAH	polyaromaattiset hiilivedyt
Pienhiukkaset	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 µm (erikseen vielä PM1-pienhiukkaset, joiden halkaisija on alle 1 µm)
PM	kokonaishiukkaspäästö (Particle Matter)
PM2,5	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 µm (pienhiukkaset)
PM1	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 1 µm (pienhiukkaset)
PM10	hiukkaset, joiden halkaisija on alle 10 µm (hengitettävät hiukkaset)

POK	kevyt polttoöljy
POR	raskas polttoöljy
REF	syntypaikkalajiteltu yhdyskuntajäte
T10-20 %	päästökauppaskenaario 10 €/t CO ₂ hinnalla, kun khk-päästöt rajoitetaan -20 %:iin vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä
TIMES-malli	VTT:n käytössä oleva energiajärjestelmämalli, joka on kehitetty IEA:n ETSAP-yhteistyössä
TSP	kokonaishiukkasmassa (Total Suspended Particles)
UEO	Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman mukainen skenaario
UNFCCC	YK:n ilmastomuutoksen puitesopimus
WM	With Measures -skenaario, ts. tietyillä toimilla aikaansaattava kasvihuonekaasujen päästöjen vähennysura
c	(hiukkasten) konsentraatio
D_p, d	hiukkasten halkaisija (aerodynaaminen)
F_c	keskipakovoima
r	(syklonin) säde
v	(hiukkasen) tangentiaalinopeus
η	erotusaste
ρ	(hiukkasen) tiheys

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillintä edellyttää erittäin suuria muutoksia energian tuotannon ja kulutuksen teknologioissa ja rakenteissa. Näillä kasvihuonekaasujen vähentämistoimilla on myös hyvin merkittäviä suoria vaikutuksia muiden haitallisten aineiden päästöihin ja niihin liittyviin ympäristö- ja terveysongelmiin. Monissa tapauksissa Euroopan ja globaalissa mittakaavassa nämä muut ympäristötekijät ovat joko määräävä tai yksi merkittävä tekijä investoinneissa puhtaampaan teknologiaan. Mm. IPCC on kolmannessa arviointiraportissaan arvioinut ilmastonmuutoksen torjunnan sivuvaikutukset ja mahdolliset synergiahyödyt tärkeäksi lähivuosien tutkimustarpeeksi (IPCC, 2001). Terveysvaikutusten ohella hiukkaset ja muut paikalliset ilmansaasteet vaikuttavat myös maapallon säteilytasapainoon ja ilmaston muutokseen. Erityisesti amerikkalaisissa tieteellisissä artikkeleissa on käsitelty paikallisten ilmansaasteiden huomioonottamista kasvihuoneilmion rajoittamisessa (Hansen ym. 2001).

Terveydelle haitallisten pienhiukkasten ominaispäästökertoimista on Suomessa ollut vähän julkaistua tietoa. Suomen energiantuotannon pienhiukkaspäästöjä on arvioitu SIHTI 2 -ohjelman tulosten perusteella (Ohlström 1998, Ohlström ym. 2000), jolloin todettiin, että mittaustuloksia oli riittävästi lähinnä kivihiilen pölypoltosta. Myös soodakattiloiden ja turpeen pölypoltosta syntyviä pienhiukkaspäästöjä pystyttiin arvioimaan yksittäisten mittaustulosten perusteella. Tekesin FINE-ohjelmassa (2002–2005) on saatu uutta mittaustietoa, jonka perusteella voidaan arvioida myös mm. leijupetikattiloiden, öljykattiloiden ja puun pienpolton päästökertoimia. Lisäksi liikenne aiheuttaa huomattavan osan Suomen polttoperäisistä pienhiukkaspäästöistä, mutta se on lähtökohtaisesti rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle lukuun ottamatta luvuissa 5–6 tarkasteltavia skenaarioita, joita varten tärkeimmät pienhiukkaspäästökertoimet päivitettiin viimeaikaisilla mittaustuloksilla.

Tähän työhön on koottu uudet mittaus- ja tutkimustulokset primäärisistä eli suorista pienhiukkaspäästöistä ja niiden päästökertoimista sekä eri vähennystekniikoiden vaikutukset pienhiukkaspäästöihin ja niiden ominaisuuksiin ja arvioitu karkeasti vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Tiedot on liitetty VTT:ssä käytössä olevaan IEA:n ETSAP-yhteistyössä kehitettyyn TIMES-energiajärjestelmämalliin, jolla voidaan päästöjen kustannustehokasta rajoittamista ja rajoittamisen vaikutuksia muihin ilmapäästöihin. Tämä on nähty tärkeäksi, jotta jatkossa voidaan samanaikaisesti selvittää kasvihuonekaasujen rajoittamisen – Kioton pöytäkirjan 1. velvoitekauden ja mahdollisten tai oletettujen tulevien lisävelvoitteiden – vaikutuksia terveydelle haitallisiin pienhiukkaspäästöihin ja niiden lähteisiin. Näin saadaan kokonaiskuva eri päästövähennystoimenpiteiden vaikutuksista sekä kansantaloudellisesti kustannustehokkaasta päästöjen rajoittamisesta. Lisäksi paikalliset ja alueelliset ilmansaasteongelmat voivat varsinkin lyhyellä aikavälillä olla laukaiseva tekijä investoinnille esimerkiksi puhtaampaan ener-

giantuotantoteknologiaan. Samoin päästörajoituslainsäädännön tiukentaminen muuttaa toimijoiden valintoja. Kansainväliset rajoitussopimukset, kansallisen lainsäädännön tiukentaminen ja ympäristöongelmien ratkaisupyrkimykset voivat myötävaikuttaa merkittävästi ilmastomyötäisen teknologian käyttöönotto- ja vientimahdollisuuksiin, mikäli ilmastomyötäiset teknologiat tarjoavat samalla ratkaisuja myös muihin ympäristöongelmiin. Tämä pätee myös kääntäen, eli ilmastomyötäisen teknologian käyttöönottoa voivat jarruttaa sen vaihtoehtoisia tekniikoita huonommat ominaisuudet muiden ympäristöpäästöjen suhteen.

Hankkeessa on kehitetty yksityiskohtainen TIMES-energiajärjestelmämallin osana toimiva laskentajärjestelmä Suomen polttoperäisten pienhiukkasten päästöille. TIMES-malli sisälsi ennestään jo kaikki Kioton pöytäkirjan rajoittamat kasvihuonekaasupäästöt sekä SO₂-, NO_x- ja kokonaishiukkaspäästöt (TSP), joten mallia oli luontevaa täydentää myös pienhiukkaspäästöillä (PM_{2,5} ja PM₁) niiden haitallisten terveysvaikutusten vuoksi. Kaikkein pienimmät hiukkaset (PM₁, alle 1 µm) ovat vaarallisimpia, koska ne pääsevät tunkeutumaan syväälle hengityselimistöön ja uusimpien tietojen mukaan aina verenkiertoon saakka. PM₁ on mielekkäämpi kokoraja myös mittaustekniseltä kannalta, sillä usein PM_{2,5} sattuu kaksihuippuisen pienhiukkasjakauman jälkimmäisen jakauman keskivaiheille aiheuttaen epävarmuutta laskettuun päästökertoimeen. PM₁ rajaa pienhiukkasiksi selkeästi vain pienemmän kokoluokan jakauman. Nykyään puhutaankin (ainakin mittaajapiireissä) yhä useammin PM₁:stä PM_{2,5}:n sijasta, kun tarkoitetaan pienhiukkasia. Eräänä ongelmana on regulaation jälkeenjääneisyys, sillä ilmanlaatusäännöksissä puhutaan vasta PM₁₀-hiukkasista. PM_{2,5}- ja PM₁-hiukkasiin liittyy toki suurempia mittaasepävarmuuksia, koska nykyisin käytössä oleva mittaustekniikka eli kuumasta kaasusta mittaaminen ei välttämättä kerro todellisia pienhiukkaspäästöjä. Täähän lienee odotettavissa mittaustekniikan kehittymistä mm. lisääntyneiden liikenteen päästömittausten ohjaamana.

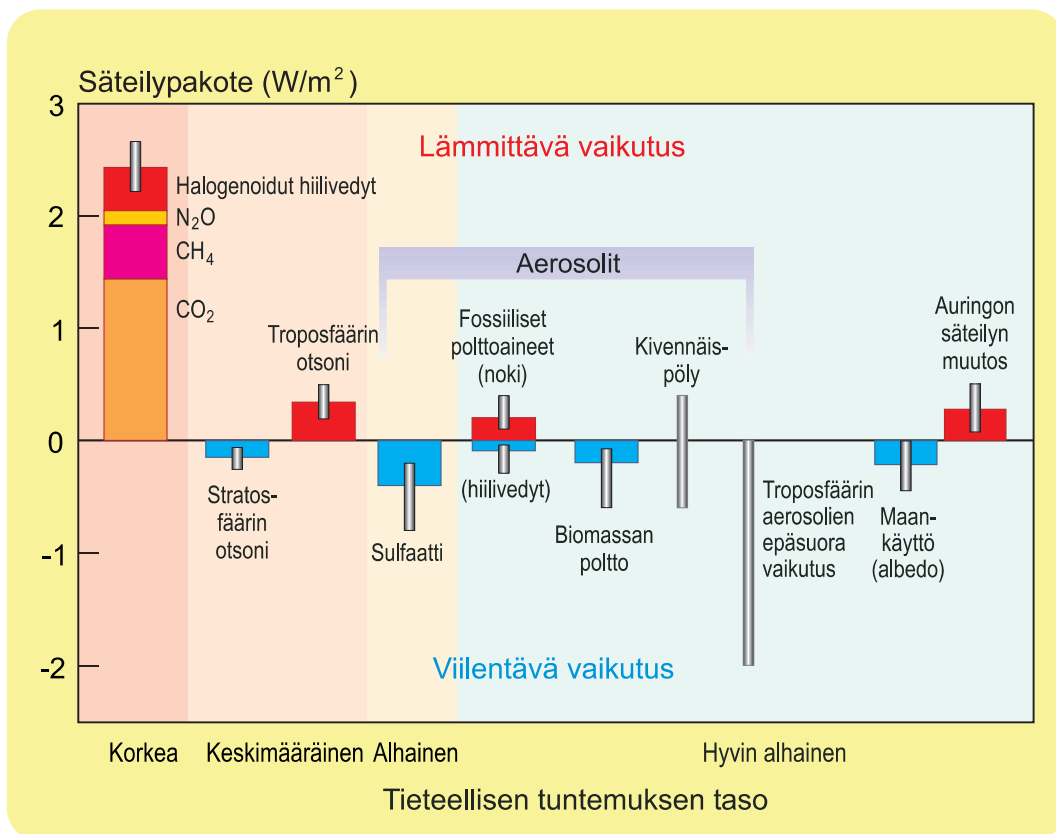
Hankkeen käyttöön on saatu uusinta Tekesin FINE-ohjelman ja VTT:n mittaustietoa (päästöt, jakaumat, kemialliset koostumukset) eri pienhiukkaslähteistä. Erityisesti on keskitytty kotimaisiin polttoaineisiin (puuhun, turpeeseen, jätteenpolttoon). Hankkeessa on yhdistetty tietämys pienhiukkasten päästöistä eri prosesseista (polttoaineet, polttotekniikat, rajoitustekniikat, laitoskokoluokat, teollisuusprosessit jne.) energiajärjestelmämallinnukseen ja skenaariotarkasteluihin siitä, miten Suomen energia- ja teollisuusjärjestelmä tulee muuttumaan Kioton 1. velvoitekauden ja oletettujen myöhempien velvoitekausien rajoitusten alaisena. Työssä hyödynnettiin uusimpia kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaksi talvella 2005 tehtyjä VTT:n skenaarioita ja niiden lähtöoletuksia.

Työ on jatkoa Tekesin CLIMTECH-ohjelmassa aloitettuun työhön, jolloin VTT:n silloiseen energiajärjestelmämalliin (EFOM-ENV) liitettiin kokonaishiukkaspäästöt (PM/TSP) (Syri & Lehtilä 2003).

2. Pienhiukkaset ja ilmastonmuutos

Ilmakehän aerosolit vaikuttavat suoraan ilmastoon sirottamalla tai absorboimalla tulevaa auringon säteilyä. Lisäksi aerosolit vaikuttavat ilmastoon epäsuorasti toimimalla nukleatioytiminä pilvien syntymiselle. Yhdessä nämä vaikutukset edustavat suurinta epävarmuutta maapallon energiataseessa, jota kuvataan säteilypakotteen avulla (kuva 2.1).

Kuvan 2.1 mukaisesti nokihiukkasia lukuun ottamatta aerosoleilla on pääasiassa ilmakehää viilentävä vaikutus. Epätarkkuudet ovat kuitenkin vielä suuria verrattuna Kioton pöytäkirjan rajoittamiin kaasuihin (vasen pylväs kuvassa 2.1). Erityisesti rikkidioksidipäästöjen vähentynyt selvästi viimeisen parinkymmenen vuoden aikana ovat sulfaattiaerosolit vähentyneet ilmakehästä, jolloin niiden ilmasto viilentävä vaikutus on heikentynyt selvästi. Rikkidioksidit ja typenoksidipäästöistä tyypillisesti noin puolet muodostaa hiukkasia ilmakehän muuntumisprosesseissa. Nämä ns. sekundääriset pienhiukkaset eivät ole mukana tarkastelussa, koska työssä keskitytään vain suoriin pienhiukkaspäästöihin eli ns. piippupäästöihin.



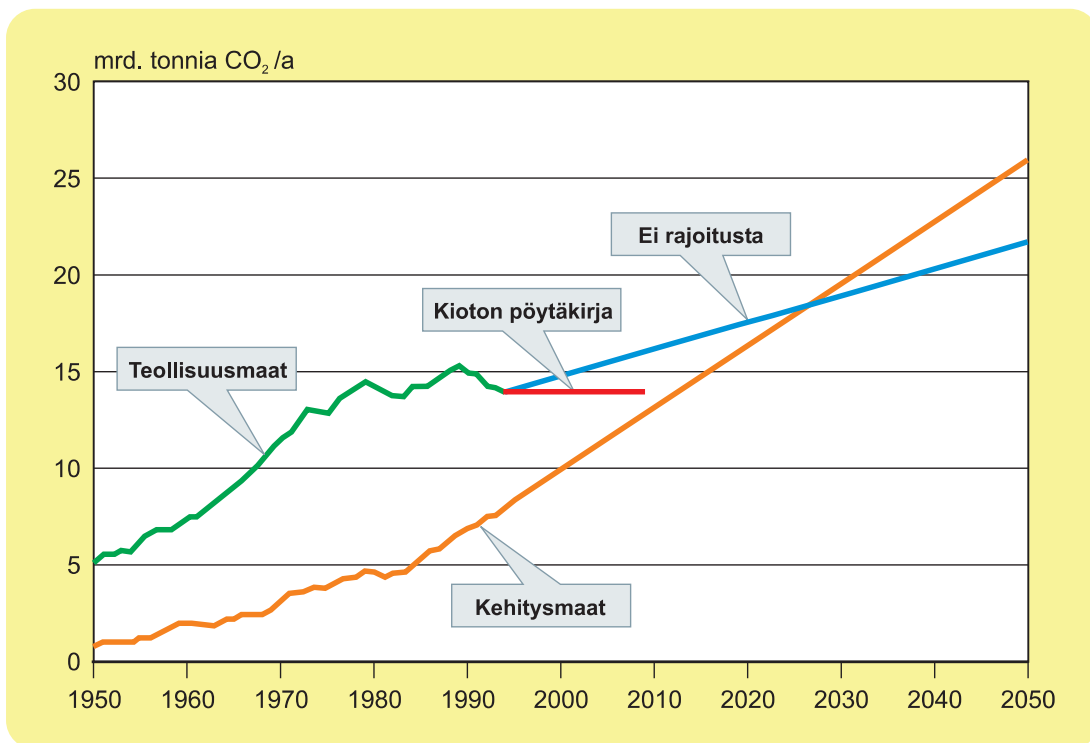
Kuva 2.1. Maapallon keskimääräisen säteilypakotteen komponentit. Pystysuora ohut jana esittää kunkin pylvään epätarkkuutta. Pylväiden alapuolella on vielä sanallinen käsitys arvioiden luotettavuudesta. Auringon säteilypakotteen muutosarvio kuvaa aikaväliä vuodesta 1850 viime vuosikymmenelle. Aerosoleilla on pääasiassa ilmakehää viilentävä vaikutus, mutta epätarkkuudet ovat vielä suuria. (IPCC 2001)

2.1 Kansainväliset rajoittamistavoitteet ja -sopimukset

2.1.1 Kasvihuonekaasujen rajoittaminen

Vuonna 1997 neuvoteltu Kioton pöytäkirja astui voimaan 16.2.2005. Pöytäkirja asettaa rajoitusvelvoitteita kuudelle kasvihuonekaasu(ryhmä)lle: CO₂, CH₄, N₂O, HFC:t, PFC:t ja SF₆. Suomen tulee vähentää näiden päästöjen kokonaismäärä (ekvivalenttisina hiilidioksiditonneina) vuoden 1990 tasolle. EU-kuplan vähennysvelvoite on -8 %. Kioton pöytäkirjan toisen vaiheen (2013–) neuvottelut ovat käynnistymässä EU-tasolla. Todennäköistä on, että päästöjä tullaan edelleen rajoittamaan, sillä ilmakehän CO₂-pitoisuuden vakiinnuttamiseksi tietylle tasolle – esim. kaksinkertaiseksi esiteollisen ajan pitoisuuteen verrattuna – vaatii huomattavia päästövähennyksiä maailmanlaajuisesti. Kuva 2.2 havainnollistaa tehtävän hankaluutta, sillä maailman hiilidioksidipäästöt ovat voimakkaassa kasvusuunnassa.

Lukujen 5 ja 6 skenaarioissa yhtenä pääoletuksena on käytetty kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamista vuonna 2020 -20 %:iin vuoden 1990 tasosta. Tätä oletusta tukee mm. EU:n virallinen, ns. kahden asteen tavoite, jolloin kasvihuonekaasupäästöjä on rajoitettava hyvin nopeasti jopa alle puoleen nykyisestä välttääksemme suuren riskin ilmaston lämpenemisestä enemmän kuin kahdella asteella.



Kuva 2.2. Hiilidioksidipäästöt fossiilisista polttoaineista. Kioton pöytäkirja likimain vakiinnuttaisi teollisuusmaiden päästöt 1990-luvun alun tasolle. (Energia Suomessa 2004)

2.1.2 Pienhiukkasten rajoittaminen

Pienhiukkasten osalta lainsäädäntö on vasta kehittymässä. EU:n CAFE-ohjelmassa (Clean Air for Europe) on hahmoteltu tulevia pienhiukkaspitoisuuksien rajoituksia ja sallittuja tasoja. Ilmanlaadulle on olemassa vasta PM10-raja-arvot, mutta pienhiukkasia (PM2,5) mitataan jo varsin laajasti eurooppalaisissa kaupungeissa ja tausta-alueilla. Pienhiukkasten raja-arvojen säätämisessä ongelmana on se, ettei ole voitu todeta mitään erillistä kynnyksiarvoa, jonka ylittyessä vasta ilmenisi terveysvaikutuksia, vaan vaikutukset alkavat näkyä heti, kun pitoisuudet kasvavat taustapitoisuudesta, mikä puolestaan vaihtelee alueellisesti paljonkin. Lähteen Schwartz ym. (1996) mukaan PM2,5:n kahden päivän keskiarvossa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n pitoisuuslisäykseen liittyi 1,5 %:n päivittäisen kuolleisuuden lisäys. Hieman suurempi vaikutus tällä ulkoilman pienhiukkaspitoisuuden lisäyksellä oli keuhkosairauksiin (+3,3 %) ja sydänsairauksiin (+2,1 %). WHO on puolestaan arvioinut, että pienhiukkaset lyhentävät ihmisten keskimääräistä elinikää reilulla vuodella. CAFE-ohjelman työryhmä ehdottaakin PM2,5-raja-arvojen käyttöönottoa ilmanlaadun seurannassa (CAFE 2004).

Pienhiukkaspäästöjä ei lainsäädännöllä toistaiseksi rajoiteta mitenkään. EU:n suurten polttolaitosten direktiivi (2001/80/EY) sekä jätteenpolttodirektiivi (2000/76/EY) aiheuttavat kuitenkin lähivuosina oleellisia muutoksia polttolaitosten hiukkaspäästöjenkin tarkkailuun. Nämä direktiivit on pantu täytäntöön Suomen lainsäädännössä vastaavina asetuksina. LCP-asetus (large combustion plants) suurille voimalaitoksille (yli 50 MW_{pa}) rajaa kokonaishiukkaspäästöjä vuodesta 2008 lähtien seuraavasti (Vnp 1017/2002, LCP-asetuksen perustelumuiotio):

- kiinteät polttoaineet $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ n (n. 20 mg/MJ)
- öljy $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ n (n. 15 mg/MJ)
- kaasut $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ n (n. 2 mg/MJ).

Uusille laitoksille nämä raja-arvot ovat jo voimassa. Käytännössä näillä raja-arvoilla ei ainakaan Suomessa ole kovin suurta ohjaavaa vaikutusta hiukkaspäästöjen vähentämiseksi, koska jo nyt suurissa voimalaitoksissa toimitaan pääosin näiden rajojen tuntumassa tai alapuolella.

Pienemmille kattiloille (5–10 MW) on voimassa kokonaishiukkaspäästöjen raja-arvo 60 mg/MJ (Vnp 2000).

2.2 Hyötyjä pienhiukkas- ja khk-päästöjen samanaikaisesta tarkastelusta

Edellä mainitut asiat johtavat siihen, että kasvihuonekaasujen päästövähennysvelvoitteiden piirissä olevissa maissa tutkitaan ja kehitetään entistä kiivaammin uusia ilmasto- myönteisiä teknologioita ja energiantuotantotapoja. Uusilla teknologioilla voi olla myös omat haittavaikutuksensa, joten eri teknologiapolkujen kokonaisvaikutuksia pyritään tarkastelemaan mm. erilaisten skenaarioiden avulla. Tämän työn lähtökohtana on ollut juuri selvittää valtakunnallisten kasvihuonekaasujen rajoittamisskenaarioiden vaikutukset Suomen pienhiukkaspäästöihin. VTT:n TIMES-energiajärjestelmämallilla lasketaan näitä kasvihuonekaasuskenarioita eri käyttötarkoituksiin, jolloin on hyvä tiedostaa esitettyjen skenaarioiden vaikutukset muihin ilmansaasteisiin. Jo olemassa olevien rikki- dioksidi-, typenoksidi- ja kokonaishiukkaspäästötietojen lisäksi tässä työssä on malliin lisätty pienhiukkaspäästökertoimet (PM_{2,5} ja PM₁), koska hiukkaspäästöistä juuri pienhiukkasilla on jo kauan tiedetty olevan haitallisia terveysvaikutuksia aina lisääntyneeseen kuolleisuusriskiin saakka (Ohlström 1998).

Esimerkkinä voidaan mainita puun polton lisäämispyrkimykset nettohiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Erityisesti pienemmissä kokoluokissa (0–5 MW) puun polttoon siirtyminen voi lisätä pienhiukkaspäästöjä ja niiden aiheuttamia terveyshaittoja. Tämä johtuu siitä, että pienissä kokoluokissa ei juurikaan käytetä hiukkaserotuslaitteita, jolloin enemmän hiukkasia tuottava polttoaine aiheuttaa suoraan kasvavan pienhiukkaspäästön. Lisäksi takkakokoluokan puun pienpoltto on merkittävä pienhiukkaspäästölähde Suomessa (kohta 4.1). Matalan päästökorkeuden vuoksi nämä päästöt ovat entistäkin hankalampia paikallisen ilmanlaadun kannalta.

3. Pienhiukkaspäästöjen vähentämistekniikat ja -kustannukset

Kuten muihinkin paikallisen polton päästöihin, myös hiukkaspäästöihin voidaan vaikuttaa erilaisilla polttotekniikoilla ja -tavoilla sekä polttoaineilla eli primäärisin menetelmin. Yleensä joudutaan kuitenkin tyytymään kompromisseihin esimerkiksi tulipesän lämpötilassa, koska muutos polttotavassa voi lisätä muita päästöjä ja vaikuttaa myös laitoksen toimintaan. Esimerkiksi monimutkaisten ilmajärjestelmien rakentaminen puolestaan tulee kalliiksi sekä suorilta kustannuksiltaan että tarvittavien asennustöiden ajaksi keskeytyneen tuotannon osalta.

Sekundäärisillä savukaasujen puhdistusmenetelmillä voidaan vähentää ilmakehään joutuvia päästöjä kattilan jälkeen ennen kuin savukaasut johdetaan savupiippuun. Sekundääriset menetelmät voidaan jakaa seuraavasti (Pleym ym. 1989):

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

Yksi tapa kuvata savukaasun puhdistuslaitteiden tehokkuutta on erotusaste (η). Kokonaiserotusaste voidaan esittää yhtälöllä

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} = 1 - \frac{c}{c_0}, \quad (3.1)$$

jossa c_0 on suodattimeen tulevien hiukkasten konsentraatio ja c suodattimen läpäisseiden hiukkasten konsentraatio. Erotusasteita tarkasteltaessa on syytä huomioida, että konsentraatiot ovat yleensä massakonsentraatioita, jolloin suurilla hiukkasilla on suurempi vaikutus siihen kuin pienillä hiukkasilla. Toisin sanoen, vaikka terveydelle vaarallisia pienimpiä hiukkasia pääsisi lukumääräisesti paljonkin suodattimen läpi, voi sen erotusaste silti olla hyvä. Lisäksi hyvä erotusaste voi olla harhaanjohtava tapauksissa, joissa erottimeen tuleva hiukkaspitoisuus on erittäin suuri. Tällöin myös ilmaan joutuva päästö voi olla suuri vaikka erotusaste olisikin korkea. Siksi laitteille esitetään usein myös erilaisia tunnuslukuja, kuten päästötaso [$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$] ja ominaispäästö [mg/MJ]. Ominaispäästö esitetään tässä työssä syötettyä polttoaineen energiaa kohti.

3.1 Dynaamiset erottimet

3.1.1 Sedimentaatiokammiot ja lamellierottimet

Sedimentaatiokammio ja lamellierotin perustuvat painovoimaan ja savukaasun vähäiseen suunnanmuutokseen. Laitteet ovat edullisia ja niillä voidaan erottaa karkeat ja hehkuvat hiukkaset savukaasusta ennen muita puhdistusvaiheita, joissa kalliimmat laitteet voivat rikkoutua, tukkeutua tai palaa suurista tai hehkuvista hiukkasista. Pienhiukkasia sedimentaatiokammiossa ja lamellierottimella ei pystytä erottamaan niiden pienen massan vuoksi.

3.1.2 Sykloni ja multisykloni

Syklonit hyödyntävät keskipakoisvoimaa saattamalla savukaasun pyörivään liikkeeseen. Keskipakoisvoima ja hitausvoimat aiheuttavat sen, että hiukkaset ajautuvat virtauksen ulkoreunalle, törmäävät syklonin seinämiin ja liukuvat sitten pohjan aukosta ulos ilmatiiviiseen keräyssäiliöön. Syklonin mitoituksessa lasketaan, kuinka monta täyttä kierrosta virtauksen täytyy pyörähtää, jotta päästään tietyn kokoluokan hiukkasten haluttuun erotusasteeseen, kun tiedetään savukaasuvirtaus ja syklonin ulko- ja sisähalkaisijat. (Flagan & Seinfeld 1988).

Keskipakoisvoima

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot v^2}{6r}, \quad (3.2)$$

jossa d on hiukkasen halkaisija, ρ hiukkasen tiheys, v hiukkasen tangentialinopeus ja r syklonin säde, on 10 m/s liikkuvalla hiukkasella noin 20-kertainen painovoimaan verrattuna, kun syklonin säde on 0,5 metriä. Siksi syklonit ovat huomattavasti tehokkaampia kuin edellä esitellyt dynaamiset erottimet. Yleisimmät syklonityypit ovat vastavirtasyklonit ja läpivirtausyklonit, joista molemmat erottavat kaasusta myös pienhiukkasia. Vastavirtasyklonit voidaan jakaa vielä tangentialisiin ja aksiaalisiin savukaasun sisäänmenon perusteella. Aksiaalisissa sisäänmenoissa pyörivä liike saadaan aikaan kiinteällä siivistöllä syklonin tuloyhteessä.



Kuva 3.1. Aksiaalisella sisäänvirtauksella toimiva vastavirtasykloni.

Läpivirtaussykloneissa sisempi pyörre poistuu vastakkaisen pään poistoyhteestä eikä vaihda suuntaa kuten vastavirtasykloneissa. Läpivirtaussyklonia käytetään yleensä vaakasuunnassa, ja keskipakovoima saadaan aikaan tuloyhteen ohjaussiivillä. Tätä syklonityyppiä käytetään yleensä esierottimena lentotuhkan ja suurimpien hiukkasten poistamiseen. Läpivirtaussyklonin etuja ovat pieni painehäviö ja soveltuvuus suuriin tilavuusvirtauksiin (Flagan & Seinfeld 1988).

Syklonin tehokkuutta parantavat keskipakovoimaa ja kierrosten lukumäärää kasvattavat tekijät, mutta myös syklonin seinien sileys, joka helpottaa hiukkasten liukumista säiliöön. Jos syklonin alaosaan imeytyy ilmaa, pienenee erotuskyky huomattavasti (Pleym 1989). Myös osakuormalla ajo pienentää erotuskykyä, koska savukaasumäärät pienenevät. Valittavasti paremmat erotusasteet johtavat suurempiin painehäviöihin ja suurempiin korkeuksiin. Painehäviöt ovat sykloneissa 250–4 000 Pa (Flagan & Seinfeld 1988). Sykloneissa ei ole liikkuvia osia, joten ne ovat halpoja, kestäviä, helppokäyttöisiä ja huoltovapaita.

Sykloneita valmistetaan halkaisijaltaan noin 10 cm:stä useaan metriin. Koska syklonin erotuskyky heikkenee halkaisijan kasvaessa, voidaan samaan savukaasun tulo- ja poistoyhteeseen asentaa useita pieniä sykloneja, joilla on myös yhteinen pölynkeruusäiliö.

Näin saatua sykklonia sanotaan multisykloniksi (Pleym ym. 1989). Pienen sykklonin halkaisijan takia multisykloneiden tukkeutumisriski on suuri. Multisyklonien käyttö onkin riskialtista suurilla pöly- tai kosteuspitoisuuksilla tai matalilla lämpötiloilla omaavien savukaasujen puhdistuksessa. Myös helposti tarttuvat pölypartikkelit saattavat tukkia multisyklonin (Linna 2005). Syklonit voidaan valmistaa metalleista tai keraameista, jotka kestävät korkeita lämpötiloja, hankaavia hiukkasia ja mahdollisesti syövyttäviä olosuhteita.

Parhailla sykloneilla saavutetaan jopa 98 %:n erotusaste (massasta) aerodynaamiselta halkaisijaltaan yli 5 µm:n hiukkasille, mutta tavallinen erotusaste on noin 90 % yli 10 µm:n hiukkasille. Vanhempien lähteiden mukaan alle 5 µm:n hiukkasille erotusaste heikkenee voimakkaasti. Jos enintään 20 % hiukkasista on halkaisijaltaan alle 5 µm, voidaan multisykloneilla saavuttaa noin 80 %:n erotusaste. Esimerkiksi öljyn poltossa syntyy pääasiassa pienikokoisia hiukkasia, jolloin sykklonien erotusaste voi jäädä noin 50–60 %:n tasolle (Lammi ym. 1993). Uudemmmille multisykloneille raportoidaan kuitenkin huomattavasti parempia, jopa yli 90 %:n (TSP) erotusasteita myös öljyn poltolle. Päästötaaso voi tällöin olla alle 100 mg/m³n. Joidenkin sykloneiden jälkeen taso voi kuitenkin olla jopa muutamia grammoja normikuutiota kohti. Yksinkertaisuutensa ansiosta sykklonit ovat hyvin edullisia. Hinta riippuu muun muassa kapasiteetista ja on yleensä 1000–300 000 €.

3.2 Sähkösuodattimet

Sähkösuodatin on yleisin hiukkaserotinlaite kiinteitä polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa. Laitteella on pieni painehäviö (yleensä alle 300 Pa) ja kohtalainen erotuskyky myös pienille hiukkasille (alle 1 µm) sekä kyky käsitellä korkeita pölypitoisuuksia. Sähkösuodattimella voi puhdistaa myös märkiä pisaroita, räjähtäviä kaasuja tai hehkuvia hiukkasia sisältäviä kaasuja (ns. märkä sähkösuodatin). Voimalaitosmittakaavan sähkösuodattimen heikkouksia ovat korkeat investointikustannukset (1–5 miljoonaa euroa) ja suuri tilantarve (pohjapinta-ala jopa 100–200 m²). Kustannukset voivat vielä kasvaa edellä mainitusta, mikäli suodatin lisätään jälkeenkäin eikä sille ole tilaa laitoksen vieressä. Tällöin se voidaan kuitenkin rakentaa esim. voimalaitoksen katolle.

Suomessa sähkösuodattimella varustettujen polttolaitosten päästötaaso on yleensä 15–100 mg/m³n joka vastaa ominaispäästönä noin 5–30 mg/MJ. Uusien suodatinten päästöt sijoittuvat yleensä välille 15–50 mg/m³n eli ovat noin 5–20 mg/MJ. Tällöin erotusaste on usein yli 99,9 %. Erotusasteen minimi on kokoluokassa 0,1–1,0 µm, jossa läpäisy voi olla yli 10 %, vaikka kokonaisuusmassan läpäisy on alle 1 % (Ylätalo ym. 1993). Valitettavasti erotusasteen minimi osuu juuri terveydelle haitallisimpien hiukkasten kohdalle. Erotuskykyä heikentävät lämpötila ja palamattomien hiukkasten osuuden lisääntyminen sekä vety-, typpi- ja hiilidioksidipitoisuuksien nousu. Erotuskykyä taas nostavat vesi-

höyry ja rikin oksidit. Hiukkasten kokojakauman muutos ei käytännössä vaikuta sähkösuodattimen erotuskykyyn niin paljon kuin sykloneihin (Lammi ym. 1993).

Sähkösuodattimet jaetaan kuuma- ja kylmäpuolisuodattimiin. Kuumapuolisuodattimet sijaitsevat ennen palamisilman esilämmitintä (luvo), jolloin toimintalämpötila on 320–400 °C. Kylmäpuolisuodattimet sijaitsevat luvon jälkeen, jolloin lämpötila on 120–150 °C. Voimalaitoksissa yleisin sähkösuodatintyyppi on kylmäpuolen levysuodatin (Hulkkonen 1994).

Sähkösuodatin muodostuu erilaisista kentistä. Yleensä ensimmäiset kaksi kenttää poistavat 95–98 % savukaasun sisältämästä hiukkasmassasta ja viimeinen eli kolmas kenttä loput siten että päästään yli 99 %:n kokonaiserotusasteeseen. Savukaasu johdetaan ensimmäiseen kenttään reikälevyn läpi, jolla varmistetaan tasainen virtausjakauma suodatimeen. Siellä hiukkaset varataan sähköisesti koronavaraajalla, jonka jälkeen ne kerääntyvät vastakkaismerkkiselle keräinlevylle. Välillä levyt puhdistetaan mekaanisesti, esimerkiksi ravistinvasaroilla, jolloin pölyhiukkaset putoavat pohjasiiloihin. Siilojen täytyttyä ne tyhjenetään säiliöautoihin. Jos levyjä ei puhdistettaisi, kerääntyisi levyjen pinnoille ”pölykaku” ja sähkökenttä vaimenisi. Puhdistus voidaan suorittaa myös epäkeskoihin perustuvilla ravistimilla, jolloin rakenteiden kokema rasitus saattaa olla pienempi.

Sähkösuodattimessa on varauselektrodina (emissioelektrodina) ohut lanka ja keräinelektrodina tasopinta. Geometrian ansiosta langan lähelle muodostuu voimakas sähkökenttä. Koronapurkaus on voimakkaan sähkökentän aiheuttama purkaus eristeväliaineessa, joka sähkösuodattimen tapauksessa on savukaasu. Purkausalueella tapahtuu ionisaatioketjureaktio, jossa syntyneet elektronit ja positiiviset ionit kulkeutuvat eri suuntiin. Voimalaitossuodattimissa lanka on levyyn nähden negatiivisesti varautunut, jolloin langasta levyyn päin syntyy negatiivinen ionivirta, joka kuljettaa mukanaan negatiivisesti varautuvat savukaasun hiukkaset. Positiiviset ionit kulkeutuvat koronalankaan (Hinds 1982). Käytännössä 80–90 % varautuneista hiukkasista kulkeutuu keräinelektrodille ja 10–20 % emissioelektrodille (Hulkkonen 1994).

Hiukkasten varautuminen tapahtuu kenttävarautumisella sekä diffuusiovarautumisella. Yksinkertaistettuna nämä tarkoittavat ionin törmäämistä hiukkaseen sähkökentän aikaansaaman liikkeen sekä lämpöliikkeen seurauksena. Ionin saama varaus lasketaan näiden mekanismien summana. Mitä suurempi varaus on, sitä nopeammin ja tehokkaammin hiukkanen kiinnittyy elektrodiin (Flagan & Seinfeld 1988). Diffuusiovarautuminen on hallitsevampi mekanismi alle 1 µm:n hiukkasille ja kenttävarautuminen sitä suuremmille.

Sähkökentän muodostamiseen käytetään tasajännitettä. Negatiivisella langan varauksella päästään suurempaan jännitteeseen kuin positiivisella. Jännitetaso voi olla 20–100 kV

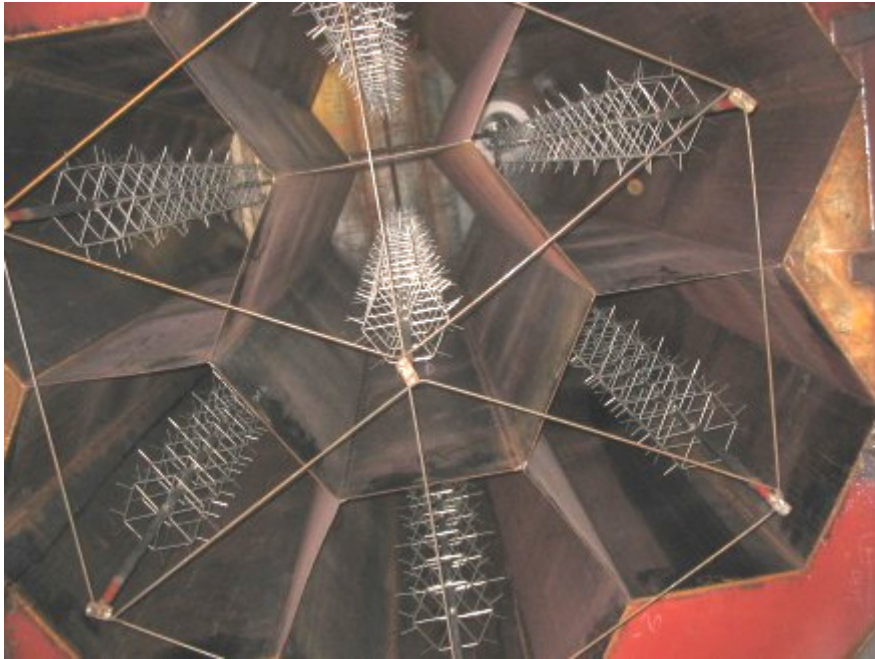
mutta on yleensä 50–80 kV. Ylärajan jännitteelle määrää sähköinen läpilyönti, johon vaikuttaa kaasun dielektrisyyslujuus eli läpilyöntikestävyys. Koska negatiivisella koronalla muodostuu kymmenen kertaa enemmän otsonia kuin positiivisella, käytetään esimerkiksi sisä- ja kierrätysilman pienissä putkimaisissa sähkösuodattimissa positiivista koronavarausta (Hinds 1982).

Sähkösuodattimen erotusastetta voidaan tarkastella myös Deutschin yhtälön avulla (Hulkkonen 1994).

$$\eta_d = 1 - \exp\left(\frac{-v_M \cdot A}{\dot{V}}\right)^m, \quad (3.3)$$

jossa v_M on hiukkasen kulkeutumisenopeus elektrodille, joka kasvaa hiukkasen varauksen ja sähkökentän voimakkuuden kasvaessa. v_M kasvaa käytetyn jännitetaso neliöön verrannollisesti. A on erotuspinta-ala, \dot{V} savukaasun tilavuusvirtaus ja m on Matts–Öhnfeldt-kerroin, jonka arvo on 0,4–0,6. Yhtälössä oletetaan, että hiukkaset ovat tasaisesti jakautuneet poikkipinnalle ja ne varautuvat heti saavuttuaan suodattimeen. Sähkösuodattimessa yhden mikrometrin hiukkaseen kohdistuva voima on yleensä noin 3 000 kertaa painovoiman suuruinen (Riionheimo 1978). Levyjen välinen etäisyys on yleensä 20–30 cm ja virtausnopeus 1–2 m/s. Virtausnopeuden pienentämisellä ei ole todettu olevan erotusastetta parantavaa vaikutusta, mutta tarvittava pinta-ala ja siten myös kustannukset kasvavat. Suuret nopeudet huonontavat erotusastetta, koska silloin osa erotetuista hiukkasista tempautuu takaisin virran mukaan (Hulkkonen 1994).

Markkinoilla on myös sovelluksia, joissa käytetään levyjen sijasta kennomaista rakennetta ja korkeampaa jännitettä (100–150 kV). Korkeammalla jännitteellä ja sopivalla elektrodien geometrialla saadaan aikaan ionipuhallusilmiö, jonka ansiosta erotusaste on hyvä, vaikka elektrodien välinen etäisyys kasvaisikin pitkäksi. Tällaisen suodattimen etuina mainitaan rakenteesta johtuva keveys ja edullinen hinta. Materiaalia tarvitaan vähemmän korkeamman jännitteen takia ja koska kennorakenne kantaa osan suodattimen painosta. Korkeampi jännite lisää sähkönkulutusta, mutta avarampi rakenne puolestaan pienentää painehäviötä ja siten myös sähkönkulutusta. Laitteella päästään samoihin päästötasoihin kuin perinteisellä sähkösuodattimella (Ion Blast 2005).



Kuva 3.2. Kennorakenteinen sähkösuodatin (Ion Blast 2005).

Tärkein sähkösuodattimen mitoitukseen vaikuttava tekijä on lentotuhkan ominaisvastus. Jos ominaisvastus on liian pieni, hiukkanen menettää sähköisen varauksensa nopeasti keräinlevyllä, jolloin se voi tempautua takaisin kaasuvirtaan. Tällöin hiukkasia voi kerätä määrällä sähkösuodattimella, jossa keräinelektrodin pintaa huuhdellaan jatkuvasti vedellä. Liian suuri ominaisvastus taas estää virran kulkeutumisen keräinlevylle pölykerroksen läpi. Pölykerroksen yli syntyy tällöin jännite, joka voi aiheuttaa koronapurkauksen kerroksen sisällä ja levittää sen takaisin savukaasuvirtaan. Lisäksi ominaisvastukseltaan suuren tuhkan poistaminen keräinlevyn pinnalta voi olla hankalaa. Edullisin ominaisvastus on 10^{10} – 10^{11} ohm/cm. Ominaisvastuksen pienentämiseksi on kokeiltu mm. veden ja rikkiyhdisteiden ruiskuttamista kaasuvirtaan. Niin sanotulla pulsing-menetelmällä ja savukaasua kostuttamalla on saatu vähennettyä ultrapienet hiukkaset (aerodynaaminen halkaisija 0,02–0,1 μm) noin kolmasosaan kuivaan staattiseen sähkökenttään verrattuna. Pulsing-menetelmässä sähkökenttä toimii jaksoittaisesti, ja yhdessä kostuttamisen kanssa sillä saadaan hiukkasille korkeampi varaus (Schleicher & Kauppinen 1998).

3.3 Kuitusuodattimet

Kuitusuodattimia käytetään yleensä, kun päästörajoitukset ovat erityisen tiukat tai sähkösuodattimesta tulisi pölyn ominaisuuksien takia kallis ratkaisu. Esimerkiksi korkearesistiivinen pöly ei varaudu riittävän hyvin sähkösuodattimessa, jolloin kuitusuodatin on parempi vaihtoehto (Alstom 2004). Myös matalilla pölypitoisuuksilla kuitusuodattimet ovat taloudellisin tapa saavuttaa korkea keräystehokkuus. Kuitusuodatin on säh-

kösuodattimeen nähden yksinkertainen ja investointikustannuksiltaan kilpailukykyinen (suuriinkin voimalaitoksiin noin 1–3 miljoonaa euroa).

Kuitusuodattimen ongelmina ovat joidenkin savukaasujen tarttuvat partikkelit, kuluminen, painehäviöt ja laitteiston huollon tarve. Suodattimien letkut joudutaan yleensä uusimaan 2–3 vuoden välein, joten korkeiden lämpötilojen kalliista kuitumateriaaleista voi kertyä merkittäviä kustannuksia. Materiaaleina on käytetty muun muassa villaa, puuvillaa, nylonia, lasikuituja ja polyestereitä (Hinds 1982). Villa ja puuvilla eivät kestä korkeita lämpötiloja, mutta lasikuitua voidaan käyttää noin 290 °C:seen asti. Kuitusuodattinyksikkö sijoitetaan luvon jälkeen juuri lämpötilan takia. Toisaalta savukaasu ei saa kuitusuodattimissa jäähtyä kastepisteeseen.

Uudemmat materiaalit, kuten teflon, kestävät paremmin myös happoja, mutta korkein sallittu jatkuva lämpötila on niilläkin noin 250 °C. Letkut ovat usein edellä mainittujen materiaalien seoksia. Myös ammoniakki on letkusuodattimille yleensä haitallinen aine, koska se tukkii suodattimet (Alstom 2004). Erityisen haitallista kuitusuodattimille on rikkipitoisten polttoaineiden poltto. Siirtyminen matalarikkisiin hiiliin vähentää kuitusuodatinten kustannuksia ja kulumista joissain laitoksissa ja parantaa niiden kilpailukykyä. Kuitusuodattimien erotuskyky ei ole kovin riippuvaista savukaasun ominaisuuksista, kuten sähkösuodattimilla ja sykloneilla. Kuitusuodattimien kanssa täytyy kuitenkin olla tarkkana esimerkiksi ylös- ja alasajotilanteissa, joissa muun muassa savukaasun lämpötilat muuttuvat. Tällöin voidaan joutua käyttämään esim. ohituskanavia ja suodattimien lämmitystä. Ohitustilanteissa päästötaso kasvaa huomattavasti ja ohitusten yleisyydestä riippuen se voi vaikuttaa myös keskimääräiseen ominaispäästöön.

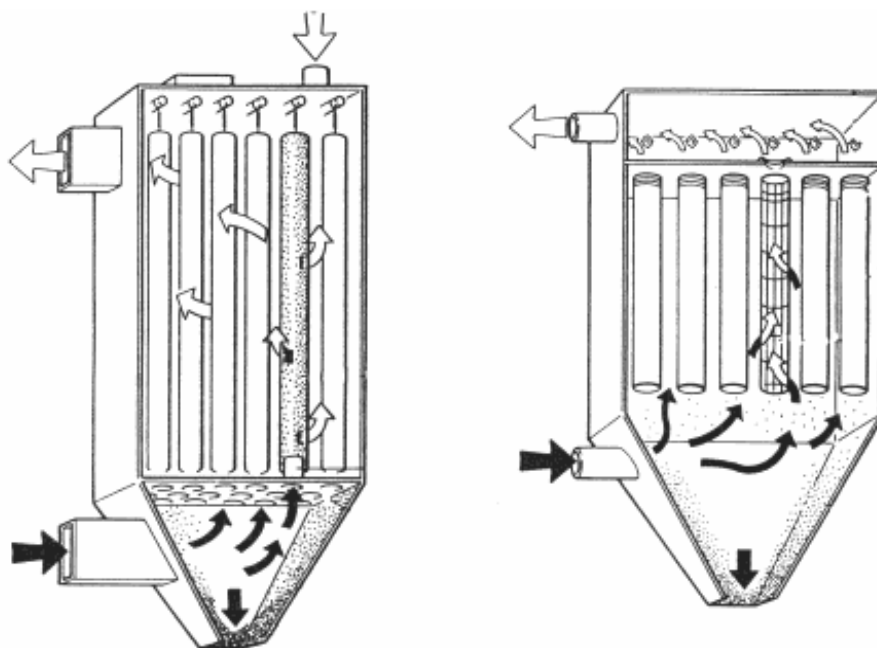
Korkeiden lämpötilojen kuitusuodattimet on tehty metalli- tai keraamikuiduista, jotka kestävät yli 1000 °C:n lämpötiloja. Luonnonkuitujen halkaisija on noin 50–150 µm, mutta metalli- tai keraamikuiduilla se voi olla jopa 3 µm (Ohlström 1998). Kuitusuodattimet jaetaan materiaaleista ja rakenteesta riippuen kuitupatjoihin, tiiviisiin patjoihin ja kudottuihin kankaisiin (Flagan & Seinfeld 1988). Näistä kangassuodattimet ovat yleisin kuitusuodatintyyppi voimalaitoksissa. Usein puhutaan myös letku-, putki- ja pussisuodattimista.

Kangassuodatin on kudottu erilaisista materiaaleista, ja siitä on suurin osa ilmaa. Kuitujen osuus suodattimen tilavuudesta on 5–30 %. Savukaasu virtaa kankaan läpi, ja hiukkaset jäävät kuituihin hitausvoiman, pidätyksen ja diffuusion vaikutuksesta. Lisäksi sähköiset voimat vaikuttavat erottumiseen. Pidätyksessä hiukkasen oletetaan jäävän keräilypintaan, kun virtaviivan etäisyys pinnasta on pienempi kuin hiukkasen halkaisija. Yli 1 µm:n hiukkasilla tärkeimmät erotustekijät ovat hitausvoima ja pidätys, ja alle 0,5 µm:n hiukkasilla tärkein on diffuusio. Sähköisten voimien vaikutus on suurinta 0,01–5 µm:n hiukkasille (Flagan & Seinfeld 1988).

Kuitusuodattimien erotusaste on yleensä lähes 100 % kaikenkokoisille hiukkasille. Laite suodattaa jopa 0,01 μm :n hiukkasia. Erotusasteen minimi on teoriassa 0,1–1,0 μm :n välissä, jolloin diffuusion vaikutus heikkenee, mutta hitausvoiman ja pidätyksen vaikutus on vielä melko heikko (Flagan & Seinfeld 1988). Kuitusuodattimilla voidaan suodattaa myös kaasumaisia sekä muuten vaikeita päästöjä esimerkiksi syöttämällä siihen aktiivihiihtä tai sorbenttia. Kuitusuodattimien keskimääräinen päästötaso on normaalisti 5–25 mg/m^3 eli noin 2–8 mg/MJ , jolloin erotusaste on yli 99,9 %.

Uusimpien mittausten mukaan hiukkaspäästössä on pienhiukkasia (<2,5 μm) vain 1–10 % kokonaishiukkasmassasta ja hiukkaspäästö muodostuisi lähes kokonaan suurista hiukkasista, jotka eivät välttämättä ole polttoperäisiä vaan esim. suodattimesta tai savukaasukanavistosta irtoavaa materiaalia (Jokiniemi 2005). Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin syytä muistaa, että mittaukset ovat hetkellisiä. Laitosten vuosipäästöjen arviointi on tämän perusteella hankalaa ja epävarmaa. Lisäksi suodattimet voivat olla likaisia ja niitä käytetään silloinkin, kun ne eivät ole täysin kunnossa, sillä riittää kun päästöjen raja-arvot alittuvat (jatkuva toiminen mittaus). Vaikka erotusaste on suurillekin hiukkasille hyvä, kertyneestä pölykerroksesta irtoaa niitä savukaasun mukaan suodattimen puhdistuksen aikana. Puhdistus toteutetaan ravistamalla tai vastakkaissuuntaisella virtauksella tai painepulssilla (Hinds 1982). Suodattimen keskimääräistä päästötasoa huonontaa aluksi puhtaan suodattimen pienempi erotusaste, kunnes siihen on kertynyt riittävästi hiukkasia. Painehäviön takia osa pölystä on kuitenkin poistettava tietyn väliajoin. Normaali letkusuodattimien painehäviö on noin 1 000–2 000 Pa. Myös mahdollisesta puhdistusilman paineistamisesta syntyy kuluja.

Voimalaitosten kangassuodattimet ovat ns. letkusuodattimia. Suodatin on tavallisesti pitkä ja ontto sylinterimäinen putkilo, jonka sisään savukaasu virtaa, koska tällöin saadaan suuri suodatinpinta-ala tilavuusvirtausta kohti. Savukaasun nopeus suodatinmateriaalin läpi (pintanopeus) on yleensä 3–10 cm/s . Pintanopeus määrää laitteen kapasiteetin eli suodattimen koon. Suodatinkokonaisuudessa (bag house) voi olla jopa tuhansia yleensä halkaisijaltaan 12–40 cm :n ja korkeudeltaan 3–10 metrin letkuja, joten voimalaitosmittakaavassa myös kuitusuodattimet vaativat paljon tilaa. Nykyisin letkusuodattimien letkut ovat usein 7–8 metriä pitkiä, ja siten tarvittava pohjapinta-ala pienenee. Usein suodattimet on jaettu blokkeihin (kuva 3.3) ja laitteisto mitoitetetaan siten, että yksi yksikkö voidaan erottaa siitä käynninaikaiseen puhdistukseen (El-Wakil 1984).



Kuva 3.3. Erilaisia voimalaitoksen letkusuodatinblokkeja (Lammi ym. 1993).

3.4 Märkäerottimet

Märkäerottimet eli pesurit voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Näitä ovat rikinpoistoon tarkoitettut pesurit, teollisuuden lämmön talteenottopesurit ja hiukkasten poistoon tarkoitettut pesurit. Rikinpoiston pesurit ovat savukaasujen kulkusuunnassa usein jonkin hiukkasten erotuslaitteen jälkeen, joten niihin tuleva hiukkasmäärä on yleensä pieni. Muut mainitut pesurit ovat Suomen energiantuotannossa vielä suhteellisen harvinaisia. Tosin pesureiden käyttö savukaasun lämmön talteenottoon on yleistynyt voimalaitoksen kokonaishyötysuhteen nostamiseksi.

Märkäpesureissa savukaasujen hiukkaset tarttuvat nestepisaroihin ja jäävät pesurissa kiertävään nesteeseen. Neste hajotetaan pieniksi 0,1–1,0 mm:n pisaroiksi, jotta saataisiin tehokas kosketus pölyhiukkasten ja pisaroiden välille. Erotusaste paranee pienemmillä pisaroilla ja suuremmilla nopeuseroilla kaasun ja pisaroiden välillä. Hiukkasten sidonta perustuu törmäykseen, suoraan pidätykseen ja pienillä hiukkasilla myös diffuusion (Flagan & Seinfeld 1988). Jos vesihöyry saadaan tiivistymään hiukkasen pinnalle kuten venturipesurissa, erotusaste paranee edelleen (Pleym ym. 1989).

Märkäpesurit voidaan jakaa myös sen mukaan, kuinka pisarat muodostetaan ja ruiskutetaan savukaasuun. Pesutorneissa pisarat ruiskutetaan suuttimilla savukaasuun. Savukaasu voi kulkea pesutorneissa vaaka- tai pystysuoraan, ja pisarat voidaan ruiskuttaa tai pudottaa savukaasuun myötä- tai vastavirtaan. Venturipesureissa venturiputkessa kiih-

dytetty suurinopeuksinen savukaasuvirta sumuttaa nesteen (Flagan & Seinfeld 1988). Koska erilaisia pesureita on niin paljon, investointi voi vaihdella sadasta tuhannesta aina kymmeneen miljooniin euroihin. Suuret, rikinpoistoon tarkoitettut pesutornit vaativat oman rakennuksen, mikä on huomioitu mainitussa investoinnin ylärajassa. Lisäksi kustannuksia syntyy vedenkäsittelystä sekä pesunesteen kulutuksesta ja pumppaamisesta.

Peseminen mahdollistaa myös liukenevien kaasujen samanaikaisen puhdistamisen, ja erilaisia märkäpesureita onkin laaja kirjo erilaisiin päästöongelmiin. Pesureilla päästään noin 80–99 %:n erotusasteeseen, ja pienin hyvin erottuva hiukkaskoko on alle 1 µm (Lammi ym. 1993). Pesureista saadaan myös talteen lämpöenergiaa ja kemikaaleja. Haittoina ovat suuret painehäviöt (1 000–1 500 Pa) ja kiintoainepitoinen jätevesi, joka vaatii tehokkaan puhdistuslaitoksen. Pesuri vaatii myös paljon tilaa. Lisäksi näyttää siltä, että pesureissa syntyisi jopa lisää pienempiä hiukkasia (Moisio 1997). Asentamalla kuitusuodatin pesurin jälkeen päästään myös pienhiukkasten osalta mataliin päästöihin. Ilman kuitusuodatinta tehokkaiden pesurien päästötaso on usein 50–150 mg/m³n, mutta pääasiassa muuhun käyttöön kuin hiukkasten erottamiseen tarkoitetuilla pesureilla päästöt ovat suuremmat.

Voimalaitoksien savukaasupesureissa käytetään tavallisesti kalkkipohjaisia pesunesteitä kun taas metsäteollisuuden savukaasupesureissa käytetään usein muutenkin prosesseissa kiertäviä kemikaaleja, kuten natriumhydroksidia. Käytettävät kemikaalit vaikuttavat paljonkin laitteiston toimintaan ja käyttökustannuksiin, esimerkiksi tarvittaviin nestemääriin ja pumpun tehoihin. Metsäteollisuudessa pesureilla saadaan savukaasujen kemikaalit takaisin kemikaalikiertoon eikä jätevesiä aina edes synny.

3.5 Yhteenveto hiukkaspäästöjen puhdistuslaitteista

3.5.1 Erotusasteet ja ominaisuudet

Taulukkoon 3.1 on koottu eri savukaasun hiukkaserotuslaitteiden kokonaiserotusasteita lähteestä Flagan & Seinfeld (1988) sekä Suomen osalta tuoreista VTT:n mittauksista (Hokkinen ym. 2004). Suomessa julkisia mittaustuloksia löytyy lähinnä kuiville sähkösuodattimille ja letkusuodattimille.

Taulukon 3.1 erotusasteet ovat suuntaa antavia. Esimerkiksi vanhoissa sähkösuodattimissa ei päästä yhtä korkeisiin kokonaiserotusasteisiin kuin uusissa. Lisäksi erotustehokkuus voi vaihdella käytetyn polttoaineen mukaan. Myös käyttöolosuhteet ja huolto-toimenpiteet vaikuttavat sähkösuodattimen toimintaan. Kuitusuodattimien erotusasteet ovat varsin korkeita, koska esimerkiksi puolikuivan rikinpoistolaitoksen jälkeen savukaasujen hiukkastiheys on suuri mutta voimalaitoksien ominaispäästöt kuitusuodattimen jälkeen ovat yleensä alle 5 mg/MJ. Mikäli kuitusuodattimia joudutaan laitoksen ajota-

van tai muun syyn takia ohittamaan usein, kasvaa laitoksen keskimääräinen ominaispäästö merkittävästi.

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.

Taulukko 3.1. Pienhiukkaspäästöjen rajoittamismenetelmät ja niiden ominaisuuksia.

Laite	Minimi hiukkas-koko [µm]	Erotusaste [%*] (Flagan & Seinfeld 1988)	Suomessa mitattuja erotusasteita [%*]	Etuja	Haittoja
Painovoimaerotinkammio	>50	<50	ei toistaiseksi saatavilla	pieni painehäviö, suunnittelun ja huollon yksinkertaisuus	tilaa vievä, huono keräystehokkuus, ei erota pienhiukkasia
Syklonit	5–25	50–90	60–85	yksinkertaisuus, vähän lattia-alaa vievä, kohtuullinen painehäviö, toimii suurilla pölypitoisuuksilla, jatkuva kuiva kerättyjen hiukkasten poisto, poistaa suuret hiukkaset, lämpötilariippumaton	korkeussuunnassa tilaa vievä, pieni keräystehokkuus pienille hiukkasille, herkkä vaihteleville pölykuormille ja virtausnopeuksille
Multisyklonit	5		75–98	yksinkertainen, jatkuva hiukkasten poisto, kohtuullinen painehäviö, poistaa suuret hiukkaset	pieni keräystehokkuus pienille hiukkasille. Tukkeutumisaara suurilla savukaasujen pöly- ja kosteuspitoisuuksilla, matalilla lämpötiloilla ja tarttuvalla pölyllä.
Pesurit:			ei toistaiseksi saatavilla	yhtäaikainen kaasu- ja hiukkasmaisten päästöjen poisto, kyky jäädyttää ja puhdistaa kuumat ja kosteat savukaasut sekä neutralisoida korrodoivat kaasut/sumut, vähentynyt pölyräjähdysriski, tehokkuuden säätö	korroosio- ja eroosio, lisääntyneet jäteveden käsittelykustannukset, huono keräystehokkuus alle 1 µm:n hiukkasille, mahdollisesti jopa lisää pienimpiä hiukkasia, jäätymisongelmat kylmässä, savukaasun nostovoiman vähennys piipussa
Pesutornit	>10	<80			
Syklonipesurit	>2,5	<80			
Törmäyspesurit	>2,5	<80			
Venturipesurit	>0,5	<99			

Sähkösuodatin	<1	95–99+	99,2–99,9 (<2,5 µm:n hiukkasille 96,9–99,1 ja <1 µm:n hiukkasille 95,8–99,8)	>99 %:n tehokkuus, erottaa myös pieniä hiukkasia, märkä tai kuiva erotus, painehäviöt ja energiantarve pieniä verrattuna muihin tehokkaisiin menetelmiin, vähän liikkuvia osia, vähäinen huollon tarve, toimii myös korkeissa lämpötiloissa (450 °C)	herkkä vaihteleville pölykuormituksille ja virtausnopeuksille, resistiivisyys aiheuttaa eräiden aineiden kannattamattoman erottamisen, korkeajännite aiheuttaa varotoimenpiteitä, keräystekhokkuus voi huonontua vähitellen ja huomaamattomasti
Kangas-suodatin (letkusuodatin)	<1 (0:sta lähtien)	>99	98,2 (<2,5 µm: 99,9 ja <1 µm: 99,7)	kuiva keräys ja pienhiukkasten tehokas erotus mahdollista, korkeat hyötysuhteet, suorituskyvyn lasku on havaittavissa, mahdollisuus myös tiettyjen kaasujen poistoon aktiivihieillä	herkkyys suodatusnopeudelle, kuumat kaasut jäädytettävä, hehkuvat, tarttuvat tai suuret hiukkaset vaativat esierottimen, suhteellisen kosteuden vaikutus (tiivistyminen), kemikaalien vaikutus, ohitukset häiriötilanteissa, letkujen vaihdot ja huollon tarve

* hiukkasmassasta

Sekä sähkösuodattimella että letkusuodattimella saavutetaan Suomessa tehtyjen mittausten mukaan hiukkasten kokonaismassalle erotustehokkuus 98–99,9 %. Mittausten mukaan parhaiten aivan pienimpiä hiukkasia savukaasuvirrasta poistavat letkusuodattimet (myös <1 µm). Letkusuodattimien pienhiukkaserotustehokkuus on yli 99 %. Haluaisijaltaan 0,1–1 µm:n sähkösuodattimilla pienhiukkasten erotustehokkuus on pienempi, 90 ja 99 %:n välillä.

3.5.2 Kustannukset ja päästötasot

Taulukkoon 3.2 on koottu kustannuksia ja tyypillisiä päästötasoja sekä painehäviöitä edellä esitellyille puhdistusmenetelmille teollisuuden ja energiantuotannon osalta. Taulukon luvut ovat suuntaa antavia ja keskiarvoisia eivätkä sisällä vaihteluvälin ääripäitä. Investointikustannuksissa ei ole huomioitu esim. rakennusten perustuksia, mutta esim. suurelle pesurille tarvittava rakennus sisältyy ko. investoinnin ylärajaan. Käyttökustannuksiin on huomioitu esimerkiksi painehäviö, sähkönkulutus ja suodattimien vaihdoista tulevat kustannukset. Tuhkan loppusijoituksen kuluja ei ole kustannuksissa huomioitu,

mutta ne tuskin muuttaisivat eri menetelmien välisiä suhteita, vaikka ovatkin suuruudeltaan merkittäviä. Päästötasoissa on luonnollisesti oletettu, että suodattimeen tuleva pitoisuus on suurempi kuin esitetty raja. Esim. pelkän maakaasun poltossa näin ei tapahdu, koska primäärisiä hiukkasia ei juuri muodostu.

Osa taulukon 3.2 käyttökustannuksista on suoraan eri lähteistä. Kaikissa lähteissä kustannukset eivät kuitenkaan olleet samassa yksikössä, joten joissain yksikkömuunnoksissa on jouduttu tekemään tiettyjä oletuksia. Esimerkiksi huipunkäyttöajaksi on näissä tapauksissa oletettu 5 000 tuntia vuodessa, mutta esitetyllä tarkkuudella luvut eivät muutu, vaikka huipunkäyttöaika vaihtelisi välillä 4 000–5 500 h/a. Tehoksi on tarvittaessa oletettu taulukossa esitetyn teholuokan puoliväli.

Käytetyissä lähteissä ei esitetty kaikkia niissä tehtyjä oletuksia tai todellisten laitosten tapauksissa kaikkia käytön tunnuslukuja. Lisäksi esimerkiksi kuitusuodattimien käyttökustannukset vaihtelevat todella paljon eri suodatinmateriaaleilla letkujen vaihtojen takia. Tässä luvussa esitettävissä kustannuksissa ei ole diskontattu käyttökustannuksia. Tulevien kulujen diskonttaus parantaisi hieman letkusuodatinten asemaa vertailussa sähkösuodattimiin, mutta joidenkin erikoismateriaalien käyttö toisaalta kasvattaisi letkusuodatinten kustannuksia. Edellä esitetyt asiat aiheuttavat paljon epävarmuutta taulukon 3.2 lukuihin.

Taulukossa 3.2 pesuri tarkoittaa suurta märkäpesuria. Esimerkiksi venturipesureille on mahdotonta sanoa yleistä hintaa. Erilaisia ja erikokoisia ratkaisuja on paljon, sillä yleisempi sovellus venturipesureille on esimerkiksi hajukaasujen käsittely. Pienet venturipesurit ovat investoinniltaan kuitenkin huomattavasti taulukon märkäpesureita halvempia. Taulukon määrittelyt menevät hieman päällekkäin, koska luvut ovat lukuisista eri lähteistä.

Taulukko 3.2. Hiukkaspuhdistuslaitteiden kustannusarvioita, päästöasoja ja painehäviöitä (SYKE 2003, EU2000, LCP-asetuksen perustelumuistio, Ympäristökeskus Morenia, lisäksi tietoja suoraan laitevalmistajilta ja voimalaitoksilta).

Puhdistuslaite	Polttoaine	Teho MW _{pa}	Investointi €/MW _{pa}	Käyttökust. €/MWh _{pa}	Päästöaso mg/m ³ n	Painehäviö mbar
Sähkösuodatin	kaikki	alle 5	40 000	ei tietoa	15–50	2–3
	kaikki	5–50	20 000	0,1		
	kaikki	50–150	15 000	ei tietoa		
	kiinteä ja lipeä	> 150	10 000	ei tietoa		
	neste	> 150	7 000	ei tietoa		
Kuitusuodatin	kaikki	5–50	18 000	0,3	5–25	10–20
	kiinteä	> 150	13 000	0,2		
	neste	> 150	10 000	ei tietoa		
Pesuri + LTO	kaikki	5–50	35 000	0,3	50–500	10–15
Pesuri	kaikki	5–300	60 000	0,5	50–500	10–15
	kaikki	300–1 000	80 000	0,3		
	kaikki	yli 1 000	40 000	ei tietoa		
Sykloni / multi-sykloni	kaikki	alle 5	6 000	ei tietoa	20–1500	10–20
	kaikki	5–50	1 600	0,1		

Euroopanlaajuisessa RAINS-mallissa (IIASA) käytetyt hiukkaserotuslaitteiden investointikustannukset ovat sykloneita lukuun ottamatta tässä työssä kerättyjä taulukossa 3.2 esitettyjä kustannuksia edullisempia. Täsmällisiä kustannustietoja on vaikea saada mistään, joten taulukon lukuihin on suhtauduttava varauksella.

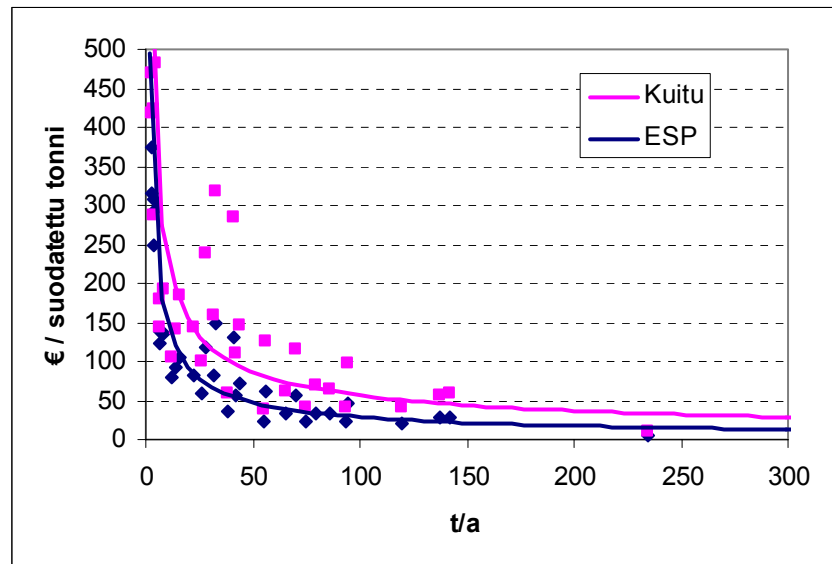
Taulukon 3.2. lisäksi jätteenpolton kaasujen puhdistukselle esitettiin kokonaiskustannukset 10–20 dollaria / tonni poltettua jätettä sähkösuodattimelle ja 15–30 dollaria / tonni kuitusuodattimille. Aktiivihiihen syöttäminen kuitusuodattimeen lisäsi kustannuksia näihin lukuihin verrattuna vähän (EU 2000). Lisäksi eräiden teollisuusprosessien hiukkasten suodatukselle saatiin taulukon 3.3 mukaisia kustannustietoja.

Taulukko 3.3. Eräiden teollisuusprosessien savukaasunpuhdistuksen kustannuksia.

Suodatin	Prosessi	Kokonaiskustannukset	Lähde
ESP	Masuuni	0,24–1 €/tonni raakarautaa	EU 2000
ESP	Teräksen valmistus	2,25 €/tonni terästä	EU 2000
ESP	Kalkkiuuni	3 100 000 € *	Nordkalk 2004
Kuitusuodatin	Teräksen valmistus	0,26 €/tonni terästä	EU 2000
Kuitusuodatin	Valokaariuuni	24 €/tonni terästä tai rautaa	EU 2000
Kuitusuodatin	Kupoliuuni	8–45 €/tonni rautaa	EU 2000
Pesuri	Kupoliuuni	23 €/tonni rautaa	EU 2000

* Investointikustannukset. Käyttökustannuksia voi arvioida taulukon 3.2 perusteella.

Seuraavassa kuvaajassa (kuva 3.4) esitetään taulukon 3.2 tiedoilla laskettuja hintoja suodatetulle hiukkastonille kokonaispäästötason funktiona. Laskuissa on käytetty todellisten voimalaitosten päästötietoja. Kaikissa tapauksissa on kuitenkin käytetty arvioituja laitteiden hintoja ja samaa erotusastetta (99 %), mikä aiheuttaa virhettä todellisiin korrelaatioihin nähden. Kuvasta näkyy, että kuitusuodatin on hieman sähkösuodatinta kalliimpi ratkaisu tällä tavoin mitattuna. Kuitusuodattimella saa kuitenkin erotettua terveydelle haitallisimpia hiukkasia, mikä ei käytännössä näy mitenkään kuvaajassa. On tärkeä muistaa myös se, että esimerkiksi puhtaampaa polttoainetta käyttävän laitoksen suodattimiin jää huomattavasti vähemmän pölyä ja siten tällä tavoin mitattuna investointi on kallis, vaikka todelliset kustannukset tuhkan käsittelykulut huomioiden ovat huomattavasti pienemmät kuin kuvaajan mukaan halvemmilla laitoksilla.



Kuva 3.4. Esimerkinomainen kuvaaja suodatetun hiukkastonin kustannuksista sähkö- ja letkusuodattimille kokonaispäästötason funktiona (ks. oletukset yllä olevasta tekstistä).

Taulukon 3.2 mukaan investointikustannukset ovat tyypilliselle voimalaitokselle yleensä 1–3 miljoonaa euroa sekä sähkösuodattimelle että kuitusuodattimelle. Pesureilla hinta voi nousta jopa kymmeneen miljooniin euroihin, mutta niiden hinnat vaihtelevat paljon tarkoituksesta riippuen. Sykloneja ja muita dynaamisia erottimia saa huomattavasti halvemmalla. Käyttökustannukset riippuvat monesta asiasta ja vaihtelevat 30 000–500 000 € vuodessa sähkösuodattimelle ja 30 000–1 500 000 € kuitusuodattimelle. Kuitusuodattimien kustannukset vaihtelevat paljon, sillä tarjolla on paljon erihintaisia letkumateriaaleja, joiden vaihtaminen muutaman vuoden välein lisää kustannuksia. Pesureiden käyttökustannukset ovat 80 000–1 000 000 € vuodessa. Syklonin käytöstä arvioidaan koituvan vuosittain alle 50 000 euron kustannukset.

Vartenotettava vaihtoehto tietyissä tapauksissa on siis myös käytettävän polttoaineen vaihtaminen vähemmän hiukkaspäästöjä aiheuttavaan polttoaineeseen. Tällöin voidaan päästä alle hiukkaspäästöjen raja-arvojen ilman kalliita erotuslaitekustannuksia. Polttoaineen vaihdosta tietenkin aiheutuvat omat kustannuksensa, joiden suuruus riippuu monesta asiasta, kuten tarvittavien kattila-, poltin-, kuljetin- yms. laiteinvestointien tarpeesta.

Suurissa rikinpoistolaitoksen sisältävissä voimalaitoksissa käytetään usein sekä sähkösuodatinta että letkusuodatinta hiukkaspölyn erottamiseen. Tämä on erittäin tehokas puhdistuslaitteyhdistelmä, jolla saavutetaan hyvin alhaiset hiukkaspäästöt myös pienhiukkasille. Sähkösuodatin poistaa suurimman osan hiukkasista ennen pesuria, mutta ennen piippua käytetään vielä letkusuodatinta, koska pesurin kalkista muodostuu uusia pieniä hiukkasia. Letkusuodattimen jälkeen savukaasussa ei näyttäisi olevan juurikaan pienhiukkasia, sillä mittauksen mukaan ainoastaan alle 10 % kokonaishiukkasmassasta on pienhiukkasia.

Käyttämällä useita puhdistuslaitteita peräkkäin voidaan optimoida savukaasun puhdistusta ja vähentää suodattimien ja erottimien huolto- ja puhdistustarvetta. Esimerkiksi syklonin käyttö kuitusuodattimen esierottimena vähentää kuitusuodattimen puhdistustarvetta sekä suojaa sitä suurilta tai hehkuvilta hiukkasilta. Sykloni myös vähentää päästöjä silloin, kun kuitusuodatin joudutaan ohittamaan esimerkiksi käynnistyksen aikana. Sähkösuodatin taas toimii tehokkaammin, kun se voidaan optimoida tietyille hiukkaskoalueelle. Tällöin esimerkiksi multisykloni voidaan suunnitella poistamaan tätä aluetta suuremmat hiukkaset ja kuitusuodatin pienemmät. On myös olemassa jo esiteltyjen puhdistusmenetelmien sekoituksia, kuten syklonipesureita, joissa yhdistyvät näiden laitteiden ominaisuudet.

Taulukossa 3.4 vertaillaan vielä tiettyjä sähkösuodattimien ja kuitusuodattimien ominaisuuksia toisiinsa.

Taulukko 3.4. Sähkösuodattimen ja kuitusuodattimen ominaisuuksien vertailu (soveltuvuus kohteeseen, (+) = paremmin soveltuva/hyvä ominaisuus, (-) = huonommin soveltuva/heikko ominaisuus).

	ESP	FF
Investointi	-	+
Käyttö- ja huoltokustannukset	+	-
Painehäviö	+	-
Erotusaste		
- TSP	+	+
- Pienhiukkaset	-	+
- Korkearesistiivinen pöly	-	+
Kosteus	+	-
Korroosio	-	+
Korkea lämpötila	+	-
Hekuvat partikkelit	+	-
Hapot ja ammoniakki	+	-
Räjähävät kaasut	märkä ESP	-
SO _x , HCl, HF, yms. poisto	-	+

Tässä luvussa jo mainittujen hiukkaserotuslaitteiden ominaisuuksien lisäksi myös käytövarmuus ja huollon nopeus ja ”helppous” ovat yhä tärkeämpiä ominaisuuksia suodattimelle. Häiriöt tai luvattua korkeammat päästötasot voivat tulla kalliiksi, ja valmistajat mainostavat laitteita muiden muassa lauseilla ”saa avattua yläpuolelta” ja ”letkut voi asentaa suodattimen puhtaalta puolelta”, joten käyttö- ja huollettavuusasiat on huomioitu yhä paremmin jo suunnittelupöydällä.

4. Polttoperäiset pienhiukkasten ominaispäästöt Suomessa

Pienhiukkaspäästöillä tässä työssä tarkoitetaan aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 2,5 µm:n hiukkasia (PM_{2,5}). Lisäksi tarkasteltiin vielä erikseen tätäkin pienempää jaetta (PM₁) luvussa 1 mainituista syistä johtuen. Kattiloissa pienimmät nanokokoluokan hiukkaset muodostuvat aina kaasumaisista yhdisteistä, kun taas kokoluokassa 1–10 µm suurin osa hiukkasista muodostuu palamisen yhteydessä fragmentoituneista suuremmista hiukkasista (polttoaine, petimateriaali, sorbentti).

Palamisen yhteydessä polttoaineesta vapautuu paljon erilaisia kaasumaisia yhdisteitä. Pienhiukkasia muodostavat yhdisteet, jotka jäätyessään muodostavat nestemäisiä tai kiinteitä aineita tai joiden reaktiotuotteena on nestemäinen tai kiinteä aine. Pölypoltto-kattiloissa (kohta 4.2.1) lämpötila on niin korkea, että useita polttoaineen sisältämiä vaikeasti höyrystyviä metalleja, kuten piitä, rautaa, magnesiumia jne., vapautuu kaasun. Nämä metallit muodostavat ensimmäiset ns. siemenhiukkaset, joiden pinnalle muut aineet voivat kondensoitua tai reagoida (Sarofim ym. 1977, Kauppinen ym. 1996). Leijukerroskattiloissa taas lämpötilat ovat alhaisempia ja em. metallien vapautuminen vähäistä. Poltettaessa biomassaa ja/tai jätettä polttoaine sisältää paljon helpommin vapautuvia alkalimetalleja, klooria, rikkiä ja erilaisia raskasmetalleja, jotka muodostavatkin pääosan pienhiukkasista näissä prosesseissa (Lind ym. 1995).

Tässä työssä on keskitytty pelkästään suoriin eli primäärisiin pienhiukkaspäästöihin (ns. piippupäästöihin). Tämän lisäksi myös kaasuhiukkasmuuntumalla on huomattava merkitys ilmakehän hiukkaspitoisuuteen. Mm. kaasumaisten rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjen (SO₂, NO_x) muuntuminen ilmakehän kemiallisissa reaktioissa pienhiukkasiksi tuottaa sekundäärisiä hiukkaspäästöjä. Jopa puolet näistä kaasumaisista päästöistä voi muuttua hiukkasiksi ja kulkeutua ilmakehässä jopa tuhansia kilometrejä päästölähteestä.

4.1 Puun pienpoltto

4.1.1 Päästön muodostuminen ja hallinta puun poltossa

Päästön muodostumiseen, määrään ja koostumukseen sekä ajalliseen riippuvuuteen vaikuttavat puun poltossa lukuisat ominaisuudet. Puulla polttoaineena on myös rakenteellisia ominaisuuksia, jotka vaikeuttavat polttotapahtuman ja päästön tarkkaa tuntemista. Seuraavassa on kuusi palamisprosessiin ja lopputulokseen vaikuttavaa keskeistä tekijää:

- Polttoaine
 - puulaji ja palakoko
 - kosteus
 - syöttötapa

- Polttotapa
 - panos- tai jatkuva poltto
 - polttoainemäärä
 - palamisnopeus
 - ilman syöttö

- Polttolaite
 - tulipesän koko ja muoto
 - palamisilman tuonti
 - tulipinnat
 - varastointikyky

- Palamisolosuhteet
 - palamislämpötila
 - ilma-polttoainesuhde
 - palamisaika
 - veto

- Päästön hallinta laitteessa
 - jälkipoltto
 - savukanaviston rakenne
 - jälkipuhdistusmenetelmä

- Päästön hallinta ympäristössä
 - laitteen sijainti
 - polttolaitoksen sijainti.

Pyrittäessä selvittämään puun polton päästöjen ja ympäristökuormituksen yhteyttä voidaan välineenä yrittää käyttää polttoaineriippuvia merkkiyhdisteitä. Tähän tarvitaan kuitenkin syvällisiä tietoja sekä päästön muodostumisesta, koostumuksesta että polttoon liittyvästä tekniikasta. Pienpolton laitteiden suuren määrän ja heikosti hallittavissa olevan palamisprosessin takia vaikein kohde ovat pienpolttolaitteet ja vain jossain määrin suurlaitokset, joiden ominaispäästöt ovat paremman päästöjen hallinnan takia selkeämmin määritettävissä. Päästön merkittävin komponentti ovat pienhiukkaset, jotka muodostavat eniten terveyttä uhkaavan ryhmän. WHO on arvioinut, että ilmansaasteet ja erityisesti pienhiukkaset aiheuttavat Euroopassa 100 000–400 000 ihmisen ennen-

sen kuoleman vuodessa lyhentäen väestön keskimääräistä elinaikaa vuodella. Suomen ympäristöterveystoimikunta on arvioinut mietinnössään, että ilmansaasteet aiheuttavat Suomessa 200–400 ylimääräistä kuolemantapausta vuodessa. Puunpolton pienhiukkasrisikin arviointi edellyttää sitä, että puunpolttoikäytön hyötyjä voidaan verrata sen käytön haittoihin ja että tiedämme, mitkä ovat oikeat luvut käytettäväksi jo yksin haitan arviointia varten. Puun pienkäyttö on heikosti tunnettu päästöjen suhteen, ja vielä huonommin on tiedossa sen pienhiukkaspäästön luonne. Yksin mittauksissa on tyydyttävä hiukkasten kokonaispäästön selvittämiseen, eikä altistuksen kannalta ole lainkaan selvää, onko oikein jättää samalla selvittämättä samanaikaisten muiden päästökomponenttien todelliset määrät. Puu on mielletty polttoaineena ympäristösyistä lähes saasteettomaksi, mikä väite on myös voitava asettaa kriittisen tarkastelun kohteeksi.

Edellä mainitun tavoitteen saavuttamiseksi tarvittaisiin tietoa useista sekä yleisistä että yksittäisistä tekijöistä. Näistä ainakin puupolttoaineen laatu, polton säätö, päästön koostumus ja päästön leviäminen ovat keskeisiä.

Olisi tärkeätä tietää, mikä merkitys puupolttoaineen tiheydellä sekä kuoren ja runkopuun osuudella puupolttoaineessa on hiukkaspäästöön ja myös se, vaikuttaako puupolttoaineen epäorgaaninen aines suoraan hiukkasmuodostuksen määrään. Tällöin esimerkiksi puun tyypillisten yhdisteiden (K, Cl, Na, Si) mittaaminen auttaisi hiukkasmuodostuksen ymmärtämisessä.

Olisi myös selvitettävä, miten polton ohjaus ja säätö toteutetaan, kun polttolaitteita joudutaan lämmityskäytössä käyttämään jatkuvasti osateholla ja hiillostavalla poltolla, jolloin palaminen ei ole lähellekään optimaalista eivätkä tehokkaan palamisen säädöt päde. On osoitettavissa, että tällöin päästön haitallisuus lisääntyy.

Epätäydellisessä poltossa päästön muodostumisessa on ongelmallista merkittävä orgaanisen hiukkasmassan muodostuminen ja siitä johtuva päästön haitallisuus. Kun orgaanisen hiukkasmassan osuus kuvaa hiukkasten kykyä adsorboida yhdisteitä ja kykyä lisätä hiukkaskokoa, jo hiukkasten orgaanisen hiilen (OC) ja alkuainehiilen (EC) hiilisuhteen OC/EC-määritys päästön aikaisessa vaiheessa voi auttaa ymmärtämään hiukkasten kulkeutumista sekä ilmassa että hengityselimissä (Ålander 2000, Tissari ym. 1998). On tärkeätä tietää, miten paljon puupolttoaineen laatu ja tulipesän lämpötilan hallinta vaikuttavat asiaan ja mikä merkitys savukaasuvirran jäähtymisnopeudella on orgaanisen hiukkasmassan muodostumiselle.

Päästöjen leviämisen selvittäminen on erittäin tärkeätä sekä aiheuttajan tunnistamisessa että haitan osoittamisessa myös puunpoltossa. Ongelmana ei kuitenkaan ole yksin se, onko yleensä mahdollista löytää riittävän selkeitä merkkiyhdisteitä puunpoltolle, vaan myös se, miten käyttökelpoisia merkkiyhdisteet ovat, kun jo polton laitteet ja tekniikka

vaihtelevat suuresti. Olisi myös osoitettava, että yhdisteet säilyvät alkuperäisessä muodossa leviämisen aikana ilmakehässä, jotta ne soveltuisivat luotettavaan ympäristön ilman laadun ja puuperäisten yhdisteiden terveystarkkailuun. Kun savukaasu lisäksi laimenee ulkoilmassa noin tuhannesosaan ennen väestön merkittävää altistumista savukaasulle, olisi tiedettävä myös se, miten vähäiset hetkelliset pitoisuudet vaikuttavat hengityksessä.

Puun energiakäytössä polton savukaasu sisältää hiukkasten lisäksi huomattavan määrän sekä häkää että orgaanisia yhdisteitä. Erityisesti hiukkasaerosolin määrä ja hiukkaskoko tunnetaan huonosti. Nykyisissä tulisijoissa ja pienkattiloissa näihin päästöihin vaikuttavat eniten käyttötapa ja polttoaineen laatu, mutta myös tulipesien rakenteen, virtausolojen ja pintojen lämpötilojen pitäisi olla tunnettuja. Typenoksidien päästöihin ei laitetekniikalla ole kovin suurta merkitystä, sitä säätelee lähinnä polttoaineen typpipitoisuus.

Kiinteiden polttoaineiden testauksessa tuli vuonna 1999 voimaan SFS-EN 303-5-standardi. Samaa standardia käytetään testaukseen ainakin Itävallassa, Tanskassa ja Ruotsissa. Laitteiden käyttöönottoa rajoitetaan useasti myös ilmansuojelumääräyksin, samoin rakentamismääräyksin. Varaavien tulisijojen testaukseen standardia ei ole, tosin sitä on valmisteltu vuodesta 1993 lähtien. Puute korvataan standardin EN 13240 käytöllä, joka soveltuu lähinnä kamiinoille. Standardin kehittäminen on yksi tärkeimmistä puun hallitun pienkäytön edistämiseksi, laitteiden kehittämisessä ja vertailtavissa olevien päästöarvojen tuottamiseksi. Erityisen keskeisiä ovat päästökertoimet laitekokoluokittain ja polttoainelajeittain.

Pienhiukkasia mitattaessa näytteenotto muodostaa tärkeimmän osan hiukkasten olosuhderiippuvuuden takia. Mittalaitteiden olisi pystyttävä havaitsemaan luotettavasti sekä ultrapieniä, halkaisijaltaan alle 100 nm:n, että karkeita hiukkasia, >2,5 µm. Ympäristölainsäädännön takia olisi massapitoisuutta havaittava hiukkaskokoon 10 µm saakka, pitoisuudella PM10 tehtävää laajempaa altistumisarviointia varten. Sekä lukumäärä- että massapitoisuus olisi tunnettava, mutta jo tekniikat pelkän hiukkasmassankin osalta vaihtelevat laimennustunnelin avulla tehtävistä mittauksista suoraan savukaasusta tehtäviin määrityksiin.

Päästömittauksissa varsinaisen ongelman mittausten kannalta muodostaa panospolttolaitteiden jatkuva polttolaitteena. Pienpolttolaitteiden ensimmäisen panoksen päästöjen poikkeaminen myöhemmistä panoksista ja laitteiden käyttö minimiteholla merkitsevät paljon suurempaa osuutta lähialueen ilmanlaadulle kuin suurlaitteiden jatkuva päästö.

Pienkäyttölaitteita on käytössä useita tyyppejä, joiden nimellistehot vaihtelevat. Useimmat voidaan luokitella kokoluokkiin alle 20 kW, 50 kW tai 500 kW, ja suurlaitteina on käytössä kokoluokan 10 MW yksiköitä. Suomessa on Puun pienpolton tutki-

mushankkeessa PIPO (2002–2005) tuotettu päästötietoa varaavista takoista, uuneista, kiukaista, kamiinoista ja takkasydämistä, ylä- ja alapalokattiloista, kiinteistö- ja alue- lämpökokoluokan kattiloista sekä pienkattilavertailuna kevytöljykattiloista. Polttoaineina käytetään pilkettä, haketta, pellettiä ja lämmitysöljyä. Mittauksin on määritetty hiukkaspitoisuuksien lisäksi häkäkaasun, hiilivetyjen ja typenoksidien keskimääräiset päästökertoimet sekä polton perusarvot. Lähes kaikki määritykset on tehty tutkimuslaboratorioiden tiloissa toisiinsa vertailtavilla mittalaitteilla polttolaitteiden valmistajien toimittamilla laitteilla. Taulukossa 4.1 esitetään ennakkotietona eräitä keskiarvotietoja suomalaisten laitteiden päästöistä. Taulukon muut kuin häkä- ja hiukkastiedot on tarkoitettu vain tukemaan aineistoa eivätkä käytettäväksi sellaisinaan. Taulukon hiukkaspäästötiedot (TSP, PM1) ovat raportin viimeistelyvaiheessa täydentyneet ja muuttuneet hieman, mutta muutoksilla ei ole merkittäviä vaikutuksia luvussa 6 esitettyihin skenaariotuloksiin.

Taulukko 4.1. Keskimääräiset puunpolttolaitteiden päästökertoimet (PIPO 2002–2005, päivitetty ennakkotieto, hiukaspäästökertoimet täydentyneet ja muutuneet hieman luvun 6 skenaariotulosten laskennan jälkeen).

Polttolaitte	Teho kW	Polttin	Polttoaine	Päästö Kaasut		Päästö Hiukkaset		Keskipakko nm	Savukaasu Ominaisuudet			
				CO mg/MJ	OGC mg/MJ	NO _x mg/MJ	TSP mg/MJ			PM1 mg/MJ	N (lkm) #/MJ	T °C
Kiukaat	<15	arina	klapi	3 100	600	120	200	190	6,5E+13	110	350	13
Takat, takkasydämet, uunit	<30	arina	klapi	1 200	120	60	100	90	3,8E+13	130	210	14
Pellettitakat	10	pellettipoltin	pelletti	170	10	40	70	70	3,2E+13	155	135	16
Pienkattilat	<30	pellettipoltin	pelletti	200	1		35	25	1,2E+13	145	120	14
Pienkattilat	30–50	stokeripoltin	hake/pelletti	400		80	20	15	1,1E+13	100	180	8
			hake	500		110	20	10	1,0E+13	100	180	8
			pelletti	250		60	15	10	1,2E+13	100	190	7
Keskitehokattilat*	50–500	stokeripoltin	hake/pelletti	420	3	110	40	20		95	180	7
			hake	600	5	150	50	30		105	190	8
			pelletti	90	1	60	20	10		80	180	6
Suurtehokattilat**	10 000	pyöröarina	hake	20		70	10	3	6,8E+10	230	140	6
Öljykattila	20	öljypoltin	öljy	35		40	2	2	1,1E+11	50***	160	4

* Suurimmassa sykloni

** Multisykloni ja sähkösuodatin

*** Bimodaali 50+200 nm

Puun polttolaitteistot on jaoteltavissa paikallislaitteisiin ja keskuslämmityslaitteisiin. Jako luokittelee samalla myös polttoaineen syöttötavan ja käytön sekä lämmönjakotavan huoneistoihin. Pienpolttolaitteiden luokitus on taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2: Pienpolttolaitteiden luokittelu, <100 kW:n teho (mukailten Launhardt 1998).

Polttotapa	Syöttömuoto	Polttoainelaatu	Lämmitysmuoto, laitetyyppi, tuli-
Panospoltto	Käsinsyöttö	Pilke, halko	Paikallislämmitys, varaava, säteily-
			Kamiinat, uunit, takat, liedet
			Ylä- tai alapalo, luonnonveto
		Pilke, halko, hake	Keskuslämmitys
			Hakekattila
			Ylä- tai alapalo, luonnonveto tai pu-
Jatkuva poltto	Painovoima	Hake, halko	Keskuslämmitys
			Mekaaninen täyttö
			Alapalo, puhallinveto
Jatkuva poltto	Ruuvisyöttö	Pelletti	Paikallislämmitys
			Pellettitakka
			Yläpalo, puhallinveto
		Hake, pelletti	Keskuslämmitys
		Karkea hake	Etupesä, suora syöttö
			Alapalo, tuliputki, puhallinveto

Useimmat panospolttolaitteet ovat lisälämmityslähteitä asunnoissa ja rakennuksissa. Niiden käyttö jatkuvana lämmönlähteenä on mahdollista, mutta panospolton luonteesta johtuen lämmöntuoton säätely on vain osittain toteutettavissa. Keskuslämmityskattiloita voidaan käyttää myös panospolton tapaan, lähinnä haloilla, mutta jatkuvaan käyttöön sopii paremmin hake tai pelletti. Kattiloiden käyttöön liittyvät myös käyttövesiboileri sekä termostaattiohjattu vesilämmitysjärjestelmä. Mikäli palamisen savukaasupitoisuutta valvotaan mitta-antureilla, myös päästöjen tarkkailu on mahdollista keskuslämmityksessä.

Ruuvisyöttöisissä hakekattiloissa on käytössä joko erillinen etupesä ja hakekattila, jolloin myös halkojen ja klapien käyttö on vaihtoehtona mahdollista, tai kaksoiruuvisyöttöinen yhdistetty polttoainevarasto-hakekattila. Hakekattiloissa on periaatteessa mahdol-

lista käyttää alhaistakin osatehoa, koska syöttöä voidaan säätää. Tämä luonnollisesti saattaa vaikuttaa myös päästöihin merkittävästi, koska tulipesän olosuhteet joudutaan sovittamaan laajalle ilman ja polttoaineen käyttöalueelle eikä täsmällistä käyttösuhdetta voida antaa.

Pellettien käyttö on mahdollista useimmissa hakekattiloissa joko suoraan tai syöttölaitetta vaihtamalla. Useimmat polttolaitteistot on kuitenkin tarkoitettu suoraan pelletti-käyttöön. Poltto tehdään polttokaukalossa, johon syötetään ilmaa sekä polttoaineen mukana että toisioilmana. Polton hankaluutena on kaukaloön jäävän tuhkan poisto, mikä tehdään ohjaamalla tilaan puhaltimella ilmaa puhdistamista varten. Päästöihin tällä on huomattava vaikutus tuhkan pyrkiessä kulkeutumaan savukaasukanavaan.

Saksassa tehdyissä vertailutesteissä 20–50 kW:n käsisyöttöisille ja 15–100 kW:n automaattilaitteille (Hartmann ym. 1997a ja b) havaittiin automaattiohjattujen laitteiden CO₂-päästöjen olevan noin 50 % alhaisemmat kuin käsisyöttöisten. Myös savukaasuantureiden käytöllä oli selvästi päästöä vähentävä vaikutus. Varsin päinvastainen ilmiö todettiin hiukkaspäästölle, joka oli jopa kaksinkertainen automaattilaitteilla. Samaa tekniikkaa käyttävien eri laitteiden päästöarvot vaihtelivat kuitenkin keskenään erittäin suuresti, käsisyöttöisillä aina 100 % keskiarvon suhteen, joten yksittäistulos ei yleensä anna luotettavaa kuvaa todellisesta päästöstä. Myös laitetestausarvon ja käyttömääritysarvon välillä vallitsee usein selvä ero, käytössä päästöt saattavat olla yli kaksinkertaisia hyväksymistestiarvoihin nähden (Launhardt 1998).

Keskimääräisiä päästökertoimia eri käyttökohteissa on selvitetty mm. Stuttgartin yliopistossa. Yleispiirteinä on sekä CO₂- että hiukkaspäästön väheneminen automaation lisääntyessä ja laitokseen suuretessa. Kun esimerkiksi asuntojen lämmitykseen käytettyjen pienlaitteiden (panoskäyttöisten) keskimääräinen hiukkaspäästökerroin on noin 200 mg/MJ, on samaa kokonaistehoa edustavien automaattiohjattujen kattiloiden päästökerroin lähes puolet pienempi (Baumbach ym. 1998).

Euroopassa tehtyjä kaakeliuunien, kamiinoiden ja kamiinasydänten (esilämmitettyjen laitteiden) hyväksymistestiarvoja on yhteenvetona esittänyt vuosilta 1987–1996 mm. Struschka (1998). Häkäkaasulle keskiarvot ovat 1 660–3 490 mg/MJ ja hiukkasille 15–64 mg/MJ. Kun osalle laitteista tehtiin uusi päästötutkimus ottaen myös kylmä alkukäyttö mukaan, olivat kamiinoiden yläarvot häkäkaasulle 2 900–6 100 mg/MJ.

4.1.2 Puun pienpolttolaitteiden tekninen kehitystyö ja tulevaisuus

Kehitystyön tarve voidaan luokitella usean lähes samanaikaisesti toteutettavan toimenpiteen yhdistelmänä.

1. Epätäydellisen palamisen estäminen mahdollisimman hyvin vaatii palamisilman vaiheistamisen ja palokaasujen ja palamisilman sekoittumisen parantamisen. Eräissä kokeissa tämän on osoitettu olevan toteutettavissa saattamalla kaasut kiertoliikkeeseen palotilassa. Kiertoliike pidentää palamisaikaa ja tehostaa sekoittumista. Teknisesti tämä edellyttää palotilan uudenlaista suunnittelua lähelle sylinterimuotoa.
2. Riittävän yli-ilman saannin järjestäminen vaatii jatkuvan säädön, mikä voi tapahtua kun palotilassa oleva polttoainemäärä ja ilmansyöttömäärä ovat samalla hetkellä valvottavissa. Tämä edellyttää jatkuvapolttoista laitteistoa, homogeenista polttoainetta ja ilmansyötön syöttöä palotilan yläosaan. Toteuttaminen edellyttää anturitekniikan kehittämistä ja mikroprosessiohjauksen käyttöä.
3. Savukaasun haitallisten yhdisteiden vähentäminen katalyysaattoritekniikan avulla merkitsee sekä lisääntyvän painehäviön sietämistä, katalyysaattorin laajaa lämpökestoa että hyvää hiukkaskestoa. Hapetus-katalyysaattorin on kyettävä pitämään hiukkaspäästö alhaisena myös osateholla, jolloin hiukkaspäästö usein lisääntyy, ja panospoltossa, jolloin CO- ja hiukkaspäästötasot vaihtelevat eri tavalla.
4. Hiukkaspäästön vähentäminen suodatintekniikan avulla on yksinkertaista, mikäli poltossa on runsaasti suurhiukkaspölyä, lähinnä tuhkaa ja palamisjäänteitä, kooltaan yli 10 μm . Käytössä on erotukseen soveltuvia multisyklonipuhdistimia. Nokihiuksien ja palotilassa höyrystyneiden ja savukaasussa tiivistyneiden mineraalien K-, Na-, S- ja Cl-suolojen ja metallioksidiyhdisteiden pienhiukkaspölyn, alle 1 μm , erottamiseen voidaan käyttää sähkösuodatinta tai kuitusuodatinta. Hienojakoisen polttoaineen käyttö, kuten puru tai jauhautunut pelletti, merkitsee aina suurta pienhiukkaspitoisuutta, joten moniasteinen suodatus (sykloni ja sähkösuodatus) on tarpeellista. Tällainen puhdistuslaitosten käyttö on kuitenkin taloudellista vain suurlaitoksissa, joiden teho on yli 1 MW.
5. Päästön koostumukseen vaikuttavat luonnonvetoisissa tulisijoissa savukanaviston ja hormiston pituus ja korkeus. Päästön leviämiseen vaikuttavat tällöin myös sijaintipaikka, tuuliolot ja ilman tila.

Puun pienpolttolaitteiden kehittämiseksi on edessä valtava työmäärä, ennen kaikkea perinteisen laiterakentamisen ja uuden säätötekniikan yhdistämiseksi. Useimmat laitteet ovat kehittyneet vuosikymmenten aikana, eikä tavoitteena ole ollut koko lämmitystarpeen tyydyttäminen. Kehitys on kuitenkin viemässä yhä selkeämmin varaavan lämmitysjärjestelmän lisäämiseen.

Säätötekniikan myötä laitteiden tilavaatimus pienenee, samoin niiden paloturvallisuus. Tämä aiheuttaa käytön laajentumisen sellaisiin valtioihin ja rakennuksiin, joissa määräykset nyt estävät puuperäisen polttoaineen laitekäytön. Päästöjen kannalta pienpolttolaitteet eivät pysty tällä hetkellä kilpailemaan öljykäyttöisten laitteiden kanssa, mutta niiden potentiaalisena etuna on hiilidioksidipäästön sovittu nettonollataso. Laitteiden val-

mistus ja polttoaineen tuotto, jakelu ja muokkaus eivät kuitenkaan ole saasteettomia, joten kokonaisketjun avulla tehtävä tarkastelu saattaa toisaalta muuttaa myös tätä ilmastotekijää vähemmän edulliseksi puun poltolle.

Polton vaikein ongelma on pienhiukkaspäästön vähentäminen kymmenenteen osaan nykyisestä ilman mittavaa laitekoon suurentamista. Lähes vastaavan hiukkaslähteen, dieselmoottorin, hiukkas päästön vähentämiseksi saadut myönteiset tulokset osoittavat, että myös pienpolttolaitteiden tekniikassa on potentiaalista kehittämistä.

4.1.3 Yhteenveto suomalaisten pienpolttolaitteiden päästöistä ennakkotulosten perusteella

Suurimmat CO-ominaispäästöt ilmenevät suoravetoisissa laitteissa, kuten kiukaissa ja eräissä tulisijoissa. Pienimmät ominaishäkäpäästöt ovat aluelämpökokoluokan laitteissa ja vertailulaitteessa, kevytöljypoltossa. Suuret häkäpäästöt liittyvät korkeaan savukaasulämpötilaan mutta eivät näytä merkitsevän poikkeavan suurta hiukkas päästöä.

Suurkattiloilla ja öljypoltossa ovat pienhiukkaspäästömäärät parhaimmillaan alle sadassa 10–50 kW:n puukattiloiden ja tulisijojen päästömääristä. Kooltaan suurimmat hiukkaset tuotetaan suurkattiloissa ja pienimmät, ultrapienet, öljypoltossa.

Kaikissa panospolttolaitteissa ja niihin soveltuviissa laitteissa päästön vaihteleva vaihtelu on erittäin suurta. Erikoisesti tämä koskee kylmänä käynnistettävää polttoa ja ensimmäistä panosta. Syttymisvaiheen päästöt muodostavat hiukkas päästön tärkeimmän osan. Eräillä laitteilla saavutetaan hiukkasmassapäästöstä lähes 90 % jo viiden minuutin kuluttua polton alusta. Myöhemmillä panoksilla nopeimmasta päästökertymästä vastaavat hiilivedyt, eivät hiukkaset. Mikäli hiilivetyjä ei ehditä polttaa loppuun, on seurauksena nokipäästön kasvu.

Panoskoko ja tulisijan täyttöaste ovat ratkaisevia polton hyvälle etenemiselle ja päästön määrälle. Polttoaineen koostumus vaikuttaa hiukkas päästöön puun kuoriosan ollessa tärkeä osatekijä.

Keskiarvoiset hiukkasominaispäästöt ovat yleisesti alle 200 mg/MJ ja maksimiarvot noin 600 mg/MJ. Myös lähes kaikki ominaispäästöt vaihtelevat laajoissa rajoissa. Esimerkkinä keskimääräisten päästöarvojen luotettavuudesta ovat tyypilliset mittausarvot vaihteluvälineen häkäpäästölle, orgaanisille yhdisteille ja hiukkasille tavanomaiselle käsikäyttöiselle polttolaitteelle:

- kaikkiaan 10 kg:n kokonaispanoksella ja 80 %:n hyötysuhteella koko polton keskiarvot ovat seuraavat (mg/MJ): CO 2 500 (0–16 000), CH 1 000 (0–18 000) ja PM10-hiukkasmassa 20 (5–100).

Häkäpäästö kasvaa ensimmäisen panoksen aikana nelinkertaiseksi hiillosvaiheessa ja saavuttaa kymmenkertaisen huippuarvon seuraavien panosten syttyessä. Hiukkaslukumäärä taas on korkeimmillaan sekä palamisen että syttymisen aikana. Suuret vaihtelut merkitsevät sitä, että jopa keskimääräiset tulokset ovat polttokohtaisia ja kaikkiin arvoihin on liitettävä epävarmuuskerroin kaksi. Kun suomalaisilla laitteilla saatuja arvoja verrataan eurooppalaisiin pienpolttolaitteilla todettuihin arvoihin, on yhteensopivuus kohtuullisen hyvä.

4.2 Energiantuotanto

Suomen energiantuotannon (voimalaitokset ja lämpökattilat, ei teollisuusprosessit) tilastoidut kokonaishiukkaspäästöt olivat n. 28 000 tonnia vuonna 2002 (Tilastokeskus 2003). Pienhiukkasia (PM_{2,5}) tästä on yleensä arvioitu olevan noin 60–70 %, mutta pienhiukkasosuus vaihtelee polttotekniikoittain ja käytettyjen hiukkaserotuslaitteiden mukaan alle 10 %:sta (tehokas letkusuodatin) yli 90 %:iin (liikenne, öljykattilat, pienpoltto) kokonaishiukkaspäästön massasta. Seuraavissa kohdissa arvioidaan eri polttotekniikoiden ja polttoaineiden ominaispienhiukkaspäästöjä polttoainetehoa kohti (mg/MJ_{pa}). Tätä työtä varten suoritettiin myös hiukkaskysely energiantuotannon ja metsäteollisuuden voimalaitoksille. Muutamaa yksittäistä poikkeusta lukuun ottamatta vastauksissa ei ollut pienhiukkaspäästöjä vaan ainoastaan kokonaishiukkasmassa (PM). Kyselyssä kysyttiin myös hiukkaspäästöjen suodatinlaitetiedot. Kyselyn vastausprosentti oli noin 40 %, mikä aiheuttaa osaltaan hieman epävarmuutta tässä luvussa esitettyihin pienhiukkaspäästökertoimiin. Päästökertoimet on laskettu kyselyn kokonaishiukkaspäästötiedoista kullekin polttotekniikka-kokoluokka-polttoaine-erotuslaitteyhdistelmälle käytävissä olevien vastaaville ryhmittelyille soveltuvien mittaustulosten mukaisilla pienhiukkasosuuksilla. Kyselyn tietoja käytettiin pienhiukkaspäästöjen arvioimisen lisäksi myös lukujen 5 ja 6 skenaariolaskennan lähtötietoina. Kyselyssä käytetty tiedonkeruulomake on liitteessä 1.

4.2.1 Pölypoltto

Kivihiiilen ja turpeen pölypolton hiukkaspäästöjä on selvitetty kattavasti jo 1990-luvulla. Turpeen pölypoltto on väistyvää tekniikkaa, joka on pääosin korvattu leijupetitekniikalla. Suomen pölypolttokattiloiden hiukkaspäästöt on raportoitu laajasti lähteessä Ohlström (1998), eikä uusia pienhiukkasmittauksia Suomessa juurikaan ole, joten tässä työssä ei

erityisesti keskitytty pölypolttolaitoksiin. Pölypolttolaitokset ovat suuria laitoksia, polttoaineteholtaan usein satoja megawatteja. Tyypillisesti kivihiiltä polttavissa laitoksissa käytetään savukaasun puhdistamiseen hiukkasista ja rikistä sähkösuodattimen lisäksi joko pesuria, letkusuodatinta tai molempia. Mitä suuremmasta kokoluokasta on kysymys, sitä massiivisempia puhdistuslaitteet ovat ja sitä pienempiä ovat myös hiukkasten ominaispäästöt, koska samalla usein myös palamisen tehokkuus ja energiantuotannon hyötysuhde ovat parempia. Puhdistuslaitteiden investointi- ja käyttökustannukset ovat kuitenkin suuria (ks. luku 3).

Pölypolton ominaispienihiukkaspäästöt ovat edellä mainituista syistä johtuen yleensä alle 10 mg/MJ, usein vain muutama milligramma megajoulea kohti. Kivihiilen ja turpeen osuus voimalaitosten ja lämpökattiloiden kokonaishiukkaspäästöistä (TSP) on noin 5 % ja kaikista energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöistä vain pari prosenttia (Tilastokeskus 2003). Pienihiukkasten (PM_{2,5}) päästöistä osuus on jopa hieman pienempi, koska suurissa kokoluokissa hiukkasten erottamiseen käytetään tehokkaita puhdistusmenetelmiä, kuten kolmikenttäisiä sähkösuodattimia ja usein myös kuitusuodattimia. Kuitusuodattimista ei uusimpien mittaustietojen valossa pääse läpi lähes ollenkaan pienihiukkasia vaan ainoastaan suuria hiukkasia, jotka voivat olla peräisin suodatin- tai putkistomateriaaleista (Jokiniemi 2005). Monissa muissa energiantuotantoprosesseissa, erityisesti pienissä kokoluokissa ilman kuitusuodattimia, savukaasun hiukkasista suurempi osuus on pienihiukkasia (PM_{2,5}). Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin syytä muistaa, että mittaukset ovat hetkellisiä. Laitosten todellisten vuosipäästöjen arviointi on tämän vuoksi hankalaa. Lisäksi suodattimet voivat olla likaisia ja niitä käytetään silloinkin, kun ne eivät ole täysin kunnossa, kunhan päästöjen raja-arvot alittuvat.

Taulukossa 4.3 on kivihiilen ja turpeen pölypolttolle arvioidut keskimääräiset ominaispienihiukkaspäästökertoimet (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) ilman häiriötilanteita. Päästökertoimet vaihtelevat paljon voimalaitoksesta toiseen ja myös saman voimalaitoksen eri ajotilanteiden aikana, joten taulukossa esitettyjä päästökertoimia huomattavasti suurempiakin esiintyy ajoittain ja/tai yksittäisissä laitoksissa.

Taulukko 4.3. Kivihiilen ja turpeen pölypoltton tyypillisiä ominaispienhiukkaspäästöker-toimia (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) eri kokoluokissa ilman häiriötilanteita.

Kokoluokka ja erotuslaitteet	kivihiili (mg/MJ)	turve (mg/MJ)
50–300 MW		
- sähkösuodin	20–30	5–15
- sähkösuodin, kuitusuodin, puolikuiva rikinpoisto	n. 5	-
300–500 MW		
- sähkösuodin	10–20	-
- sähkösuodin, märkämenetelmä	5–10	-
- sähkösuodin, kuitusuodin, puolikuiva rikinpoisto	2–5	-
>500 MW		
- sähkösuodin, märkämenetelmä	n. 5	-
- sähkösuodin, kuitusuodin, puolikuiva rikinpoisto	1–3	-

4.2.2 Leijupetikattilat

Normaalipaineisissa leijukerosprosesseissa, 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 (hie-kassa, kalkissa), mikä rajoittaa merkittävästi palamisprosessin säteilylämmönsiirtoa. Näistä tekijöistä johtuen muodostuvien pölyhiukkasten koostumus ja koko ovat aivan erilaisia kuin esimerkiksi pölypoltossa.

Hiilen kiertoleijukerosprosessissa 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 kaa-suuntua. Ne eivät kuitenkaan muodosta homogeenisen nukleaation kautta massallisesti merkittäviä määriä uusia pienhiukkasia. 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 syklonin läpäisseeistä petimateriaalista ja polttoainehiilessä olevasta kaasuuntumatta jääneestä mineraaliaineksesta. Hiukkasten koko on suurempi kuin pölypoltossa, sillä keskikoko on n. 30 μm (Lind ym. 1995).

Puuperäisiä polttoaineita (biopolttoaineet) poltettaessa alle 1 μm :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 kaasuuntua leijupoltossa. Tällöin ne poistuvat kaasumaisina kattilasta ja muodostavat myöhemmin savukanavassa pienhiukkasia tiivistymällä lämpötilan alenemisen myötä. (Kurkela ym. 1998).

Lajitellun kotitalousjätteen (REF) lisääminen polttoainevalikoimaan muuttaa tilannetta. REF:n osuus on yleensä alle 20 % syötetystä polttoainemäärästä, mutta sen vaikutus pienhiukkasten muodostumiseen ja koostumukseen on silti suuri johtuen erityisesti REF:n sisältämästä kloorista. Tekesin PIHI-RAME-hankkeessa tehdyistä impaktorimitauksista havaittiin yhteys pienhiukkasten kokonaismassapitoisuudelle, prosessin lämpötilalle sekä polttoaineen ja pienhiukkasten kloori-, lyijy-, kadmium- ja kupari- sekä joissain tapauksissa arseenipitoisuuksille. Suurempi kloorin pitoisuus polttoaineessa ja korkeampi prosessin lämpötila lisäsivät alle 1 μm :n pienhiukkasten määrää sekä em. raskasmetallien suhteellista osuutta niissä (Hokkinen ym. 2004). Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että esiintyessään yhdisteinä nämä raskasmetallit alentavat muiden aineiden sulamispistettä ja nostavat höyrynpainetta luoden otolliset olosuhteet pienhiukkasten muodostumiselle. Meneillään olevassa Tekesin FINE-ohjelman JÄPPI-hankkeessa (Jätteenpolton pienhiukkaset – jätteen laadun ja savukaasun puhdistustekniikan kehittäminen) saadaan lisää mitattua tietoa jätteenpolton pienhiukkaspäästöistä.

Taulukossa 4.4 esitetään leijupolton pienhiukkasten tyypillisiä ominaispäästöjä pääpolttoaineittain. Todellisuudessa leijupetikattiloissa poltetaan useimmiten monen polttoaineen seosta, mutta tässä työssä kattilat on luokiteltu pääpolttoaineen mukaisiin ryhmiin, ja lisäksi tarkasteltiin em. yhdyskuntajätteen (REF) vaikutusta leijupolton pienhiukkaspäästökertoimiin.

Taulukko 4.4. Leijupolton tyypillisiä ominaispienhiukkaspäästökertoimia (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) pääpolttoaineittain eri kokoluokissa ilman häiriötilanteita.

Kokoluokka ja erotuslaitteet	puu (ilman REF) (mg/MJ)	turve (ilman REF) (mg/MJ)	puu (+REF) (mg/MJ)	turve (+REF) (mg/MJ)	hiili (mg/MJ)
5–20 MW					
- (multisykloni+) sähkösuodin		5–25			
20–100 MW					
- (multisykloni+) sähkösuodin	2–20	4–23	5–25	10–30	5–15
100–300 MW					
- (multisykloni+) sähkösuodin	1–15	2–20	2–20	5–25	3–15
300–500 MW					
- sähkösuodin		2–15		9	
>500 MW					
- sähkösuodin		2			

Taulukon 4.4 mukaisesti yhdyskuntajätteen seospoltossa PM_{2,5}-pienhiukkaspäästökerroimet nousevat noin 1–10 mg:aan/MJ verrattuna saman pääpolttoaineen päästökerroimiin ilman REF-polttoainetta. Prosentuaalisesti tämä kasvu voi olla suurikin, mutta luotettavaa vertailua vaikeuttavat mm. eri kattiloiden yksilölliset polttoaineseossuhteet.

Kuitusuodattimien käyttö leijupetikattiloiden hiukkaserotukseen on yleistymässä sähkösuodattimen korvaajana erityisesti silloin, kun ollaan ottamassa jätepolttoaine käyttöön. Kyselyyn ei tällaisia laitoksia vastannut, mutta mittaukselliset jäteliemikattilalta (Hokkinen ym. 2004) antavat viitettä siitä, että pienhiukkaspäästöt ovat erittäin pienet kuitusuodattimen jälkeen. Päästötaso PM_{2,5}-hiukkasille on siten suurimmillaankin vain muutama milligramma megajoulea (pa.) kohti.

4.2.3 Arinakattilat

Pienten ja keskisuurten yksiköiden yleisin polttomenetelmä kiinteille polttoaineille on perinteisesti ollut arinapoltto. Uudet polttotekniikat, kuten leijupoltto, ovat 1980-luvulta lähtien voimakkaasti syrjäyttäneet arinapolttotekniikkaa Suomessa yli 5 MW:n yksiköissä. 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. jätteenpolttarina). Usein arinatyyppit ovat näiden yhdistelmiä (Maskuniitty 1995). Arinat

eroavat lisäksi toisistaan arinamateriaalin jäädytystavan mukaan. Pienet arinat ovat yleensä ilmajäädytteisiä eli jäädytys tapahtuu primääri-ilmalla. Suuret arinat ovat pääasiassa vesijäädytteisiä ja jäädytys 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 tarkoitettun, usein mekaanisen tuhka-arinan loppuosasta sammutuskaukaloon. 5–40 % polttoaineen tuhkasta poistuu lentotuhkana. Arinapoltoissa 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 $\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ hiukkaspitoisuuksia. Pienimmät pitoisuudet (0,5–3 $\text{g}/\text{m}^3\text{n}$) esiintyvät hakkeen poltossa, suurimmat (2–10 $\text{g}/\text{m}^3\text{n}$) turpeen ja puujätteen poltossa (Lammi ym. 1993). Edellä mainituista vaihtelevista palamisolosuhteista johtuen arinakattiloissa voikin muodostua runsaasti nokihiukkasia, jotka ovat pääosin pienhiukkasia (< 1 μm). 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 – ainakaan yksinään ilman esierotinta – sovellu tämäntyyppisten kattiloiden hiukkaserottimeksi, koska savukaasujen mukana tulevat hehkuvat hiukkaset saattavat rikkoa suodatinkankaan hyvinkin nopeasti. Mikäli kuitusuodatinta voidaan käyttää, laskee se pienhiukkaspäästöjä merkittävästi, kuten muillakin polttotekniikoilla. Ainakin kuitusuodattimen tapauksessa PM_{2,5}- tai PM₁-pienhiukkaspäästökerroin onkin selvästi enemmän riippuvainen erotuslaitteesta kuin polttotekniikasta, polttoaineesta tai muusta prosessiparametrasta.

Taulukossa 4.5 esitetään arinapolton pienhiukkasten ominaispäästöjä pääpolttoaineittain. Kuten leijupoltossa, myös arinapoltoissa yhdyskuntajätteen lisääminen polttoainepalettiin lisää pienhiukkaspäästöjä. Vähäisen mittausaineiston vuoksi taulukon 4.5 PM_{2,5}-pienhiukkaspäästökertoimet on kuitenkin tulkittava suuntaa-antaviksi.

Taulukko 4.5. Arinapolton suuntaa-antavia ominaispienhiukkaspäästökertoimia (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) pääpolttoaineittain eri kokoluokissa ilman häiriötilanteita.

Kokoluokka ja erotuslaitteet	puu (ilman REF) (mg/MJ)	turve (ilman REF) (mg/MJ)	puu (+REF) (mg/MJ)	turve (+REF) (mg/MJ)	hiili (mg/MJ)
1–5 MW					
- multisykloni		20–40			
5–20 MW					
- multisykloni	20–55				15–35
- multisykloni + kuitusuodin					1–4
20–100 MW					
- (multisykloni+) sähkösuodin	3–10	5–20	8–20	12–25	2–10

4.2.4 Öljykattilat

Kevytöljyn poltossa syntyvä hiukkaspitoisuus savukaasussa on huomattavasti pienempi, noin kymmenesosa, raskasöljypolttoon verrattuna. Tämän vuoksi seuraavassa käsitellään nimenomaan raskasöljypolttua. Kevytöljykattiloiden hiukkaspäästöjen rajoittamiseen riittävät säännölliset poltinhuollot. Hiukkaspäästötaso omakotikokoluokan (n. 20 kW) kevytöljykattiloilla on taulukon 4.1 mukaisesti vain noin 2 mg/MJ, josta lähes kaikki (n. 90 %) on pienhiukkaskokoalueella. Myös kyselyyn vastanneella 1 MW:n kevytöljykäyttöisellä lämpökeskuskattilalla hiukkaspäästö on noin 2–3 mg/MJ kuormasta riippuen (osakuormalla hiukkaspäästö on hieman suurempi).

Teholtaan noin 1–15 MW:n öljykattilat ovat tyypillisesti lämmitys- tai teollisuuskäytössä olevia tulitorvi-tuliputkikattiloita, joiden polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä (POR) (Lammi ym. 1993). 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 (pumpulla tai sekoituslaitteella). Saatavaa polttoöljyn vesiemulsiota poltetaan öljypolttimella. Tämän kokoluokan öljykattiloissa ei pääsääntöisesti ole pölynerottimia, joten vesiemulsiopoltto on ainoa kokonaishiukkaspäästöjen rajoittamiskeino. Menetelmällä voidaan vähentää poltossa syntyviä hiukkasia n. 50 % (Kaukanen ym. 1987). Kuitenkin emulsiopoltossa hiukkaskokojakauma painottuu pienempiin hiukkasiin kuin tavanomaisessa öljynpoltossa, jolloin pienhiukkasten osuus kokonaispäästöstä kasvaa emulsiopoltossa. Yli 15 MW:n öljykattilat ovat yleensä raskasöljykäyttöisiä kuumavesi- tai höyrykattiloita, joista osa on varustettu syklonierottimilla.

1–3 MW:n öljykattiloissa yleisin käytössä oleva poltin on paineöljyhajotteinen öljypoltin, jolla raskasöljykäytössä päästään alimmillaan noin 200 mg:n/m³n hiukkaspitoisuuksiin. Tätä suuremmissa kattiloissa yleisin poltintyyppi on pyörivähajotteinen (pyöriväkuppinen) raskasöljypoltin, jolla saavutetaan 80–150 mg:n/m³n 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).

Uusillakin öljykattiloilla käynnistys- ja kuormanmuutosjaksojen aikaiset hiukkaspäästöt ovat moninkertaisia jatkuvan käynnin arvoihin verrattuna, koska öljynpolton tuhkasta jopa 30 % saattaa varastoitua kattilan lämpöpinnoille nuohousten välillä. Varsinkin pieniä öljykattiloita ajetaan alas ja käynnistetään usein, koska niitä käytetään paljon mm. huippulämpökeskuksissa. Tästä syystä näiden kattiloiden todelliset vuotuiset päästöt ovat luultavasti huomattavasti suuremmat kuin tasaisen kuorman kertoimilla arvioidut päästöt.

Öljykattilan kiintoainepäästöt muodostuvat öljyn tuhkasta sekä palamattomasta noesta ja öljykoksista. Palamattomien osuus (ns. hehkutushäviö) on yleensä 70–90 %. Öljynpolton hiukkaset ovat hyvin hienojakoisia. Kuten edellä on kerrottu, vesiemulsiolla voidaan tehostaa palamista ja siten pienentää kokonaishiukkaspäästöä. Pyöriväkuppisilla ja ilmahajotteisilla polttimilla on vesiemulsiopoltolla saavutettu 50–70 % pienempiä kokonaishiukkaspitoisuuksia. Syntyvien hiukkasten koko pienenee edelleen emulsion vesipitoisuuden lisääntyessä, jolloin pienhiukkasten suhteellinen osuus kasvaa.

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 3).

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.

Raskasöljypolton julkisia ja luotettavia pienhiukkasmittaustuloksia ei edelleenkään juuri ole saatavilla, mutta tähän on tulossa parannus juuri hiljattain Tekesin FINE-ohjelmassa alkaneella VTT:n mittaushankkeella (v. 2005–2006). Taulukossa 4.6 esitetään kuitenkin raskasöljypolton ominaispienhiukkaspäästökertoimia (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) eri kokoluokissa laskettuna karkeasti arvioidulla pienhiukkassosuuskertoimella (PM_{2,5}/PM=0,75) kyselyyn vastanneiden laitosten öljykattiloiden kokonaishiukkaspäästöistä. Kyselytulosten kattavuus öljykattiloiden osalta on puutteellinen, joten huomattavasti suurempiakin päästökertoimia esiintyyneen valtakunnan tasolla. Syklonin tai multisyklonin avulla hiukkaspäästö voidaan likimain puolittaa.

Taulukko 4.6. Raskasöljypolton (POR) ominaispienhiukkaspäästökertoimia (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) eri kokoluokissa laskettuna kyselyyn vastanneiden kattilalaitosten kokonaishiukkaspäästöistä. Kyselytulosten kattavuus öljykattiloiden osalta on puutteellinen, joten huomattavasti suurempiakin päästökertoimia esiintyne.

Kokoluokka ja erotuslaitteet	öljy (POR) (mg/MJ)
5–20 MW	
- ei puhdistusta	4–38
20–100 MW	
- ei puhdistusta	8–53
- sykloni/multisykloni	5–24
100–300 MW	
- ei puhdistusta	8–22
- sykloni/multisykloni	4–13

4.2.5 Dieselmoottorit ja muut energiantuotantoprosessit

Suomessa on vain muutama dieselvoimalaitos, ja ne ovat luonteeltaan varavoimalaitoksia. Pienempiä dieselgeneraattoreita on enemmän myös jatkuvammassa käytössä (esimerkiksi kauppapuutarhojen ns. kokonaisenergialaitokset, joilla tuotetaan sähköä ja lämmitysvettä kasvihuoneiden kasvuvalaistukseen 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.

Raskasöljykäyttöisillä dieselmoottoreilla (5–30 MW) hiukkaspäästöt ovat muutamalla kyselyyn vastanneella laitoksella 18–73 mg/MJ_{pa}. Yksittäisinä esimerkkeinä tuloksia ei voi yleistää.

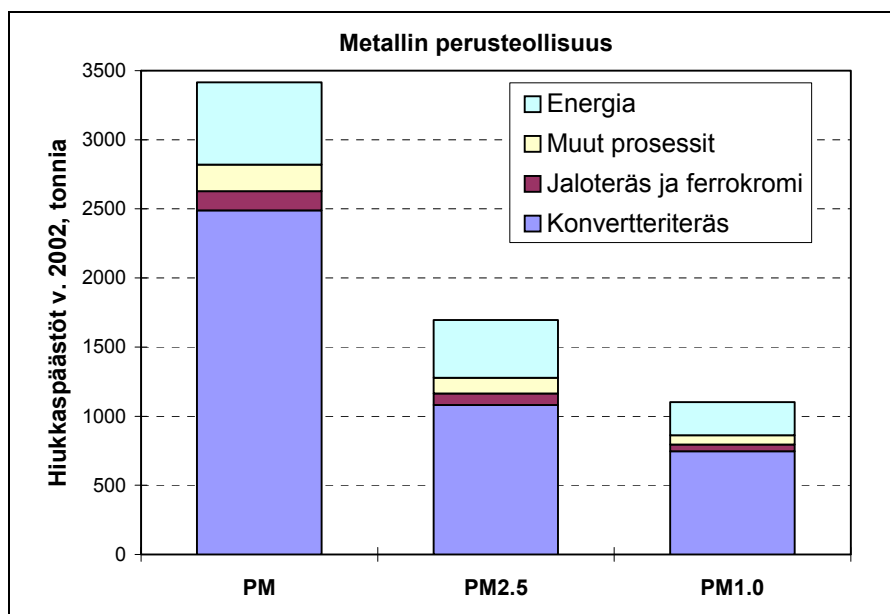
Lyyränen ym. (1998) tutkivat nelitahtisten turboahdettujen keskinopeuksisten (750–1 000 1/min) laiva- ja maakäyttöisten dieselmoottoreiden muodostuneita pakokaasuhiukkasia. Polttoaineena moottoreissa käytettiin matala-arvoisia jäännösjaeöljyjä (residuaaliöljyjä). Mittauskohta oli turboahtimen jälkeen 330–390 °C:n lämpötilassa. Massakokojakauma oli bimodaalinen, jonka huiput olivat 60–90 nm (0,06–0,09 μm) ja 7–10 μm . Pienhiukkasmoodissa ($\leq 0,4 \mu\text{m}$) oli lähes 60 % kokonaishiukkasmassasta, mikä kertoo polttoöljyn suuresta höyrystymisestä. Suuremmat hiukkaset olivat rypälemäisiä tai ketjumaisia agglomeraatteja, jotka sisälsivät pääasiassa hiiltä (42 p-%) ja happea (35 p-%), mikä viittaisi epätäydelliseen palamiseen.

Muista yleisemmistä polttoon perustuvista energiantuotantomuodoista maakaasua polttavia kaasuturbiineja sekä kaasutusmoottoreita ei tässä työssä erikseen käsitellä, koska niistä ei juurikaan aiheudu primäärisiä hiukkaspäästöjä. Kaasu-hiukkasmuutunnan kautta aiheutuvia sekundäärisiä hiukkaspäästöjä (ks. luvun alku) ei tässä työssä käsitellä.

4.3 Teollisuusprosessit

4.3.1 Metalliteollisuus

Metalliteollisuuden hiukkaspäästöt aiheutuvat kymmenistä eri lähteistä piipuista erilaisiin kattoaukkoihin. Kattavaa pienhiukkasselvitystä ei ole tehty, mutta kokonaishiukkaspäästöjä arvioidaan tehtailla vuosittain.



Kuva 4.1. Arviot metallin perusteollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin.

PIHI-RAME-hankkeessa (Hokkinen ym. 2004) metalliteollisuuden tehtaan sintraamon piipusta syklonin jälkeen mitattu pienhiukkaspitoisuus (PM_{2,5}) oli 50–90 mg/m³n. Uudella sähkösuodattimella tästä on pystytty sittemmin vähentämään yli puolet.

Kuvassa 4.1 esitetään arviot metalliteollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin. Pienhiukkasosuudet ovat hyvin karkeita arvioita. Konvertteriteräksen valmistus tuottaa eniten hiukkaspäästöjä.

Tässä työssä käytettiin karkeina arvioina seuraavia ominaispäästölujuja terästeollisuuden hiukkaspäästöistä:

- prosessipäästöt PM: n. 0,8 kg (PM)/t konvertteriterästä, noin 0,11 kg (PM)/t jaloterästä; lisäksi päästöjä energiankäytöstä ja koksaaamosta
- prosessipäästöt PM_{2,5}: karkea arvio: 0,35 kg (PM_{2,5})/t konvertteriterästä
- kokonaishiukkaspäästöt tilastosta (CLRTAP, SYKE 2005).

4.3.2 Metsäteollisuus

Metsäteollisuuden pienhiukkaspäästöjä on tarkasteltu soodakattiloilla ja meesauuneissa. Kuori- ym. prosessienergian tuotantoon tarkoitettut leijupeti- ja arinakattilat on esitetty edellä energiantuotannon yhteydessä (pääpolttoaineeseen puu sisältyvinä) kohdissa 4.2.2 ja 4.2.3. Skenaarioissa nämä kattilat on kuitenkin luettu osaksi teollisuuden omaa energiantuotantoa.

Soodakattiloilla pienhiukkasten massapitoisuus on vielä suurempi kuin leijukerroskattiloilla johtuen korkeammasta palamislämpötilasta ja suuremmasta polttoaineen natriumpitoisuudesta. Tällöin myös pienhiukkasmoodi on suuremmissa hiukkasissa, noin 1–3 µm. Siten sähkösuodattimen erotustehokkuus on hyvä myös pienhiukkasille (Hokkinen ym. 2004).

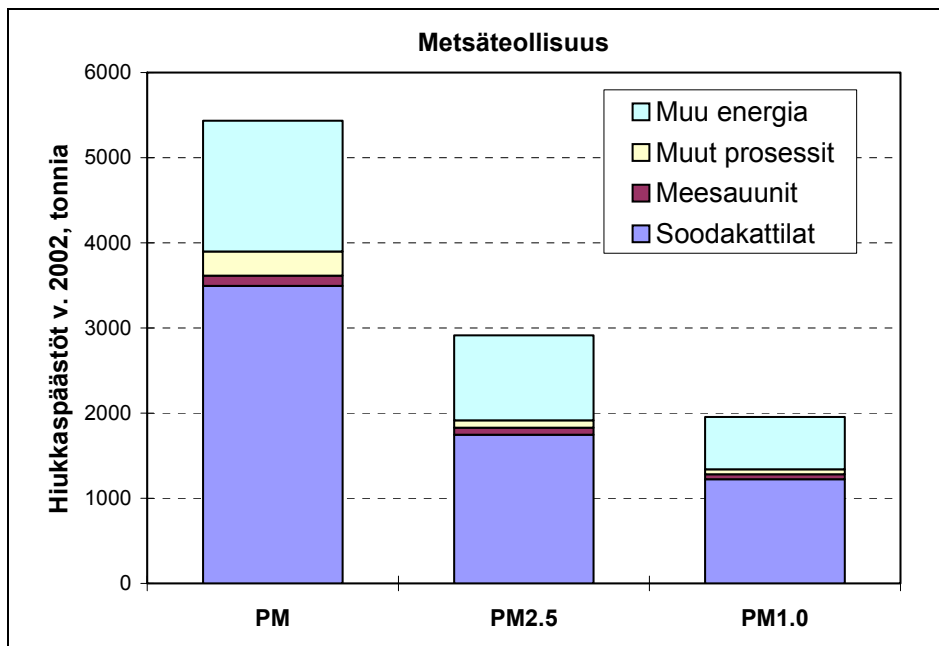
Taulukossa 4.7 esitetään soodakattiloiden pienhiukkasten tyypillisiä ominaispäästöjä.

Taulukko 4.7. Soodakattiloiden tyypilliset ominaispienhiukkaspäästökertoimet (mg/MJ, $D_p < 2,5 \mu\text{m}$) eri kokoluokissa ilman häiriötilanteita.

Kokoluokka ja erotuslaitteet	Mustalipeä (mg/MJ)
< 50 MW	
- sähkösuodin + pesuri	20–55
> 50 MW	
- sähkösuodin + pesuri	3–20

Kyselyyn saatujen vastausten perusteella metsäteollisuuden meesauunien hiukkaspäästöt sähkösuodattimen jälkeen olivat vain luokkaa 5–10 mg/MJ_{pa}. Pienhiukkaspäästökerrotimeksi on niistä tässä karkeasti arvioitu 3–8 mg/MJ. Tässä tulee huomioida kuitenkin, että kyselyvastausten kattavuus oli meesauunien osalta puutteellinen eikä pienhiukkasten mittaustietoa ollut käytettävissä.

Kuvassa 4.2 esitetään arviot metsäteollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin.

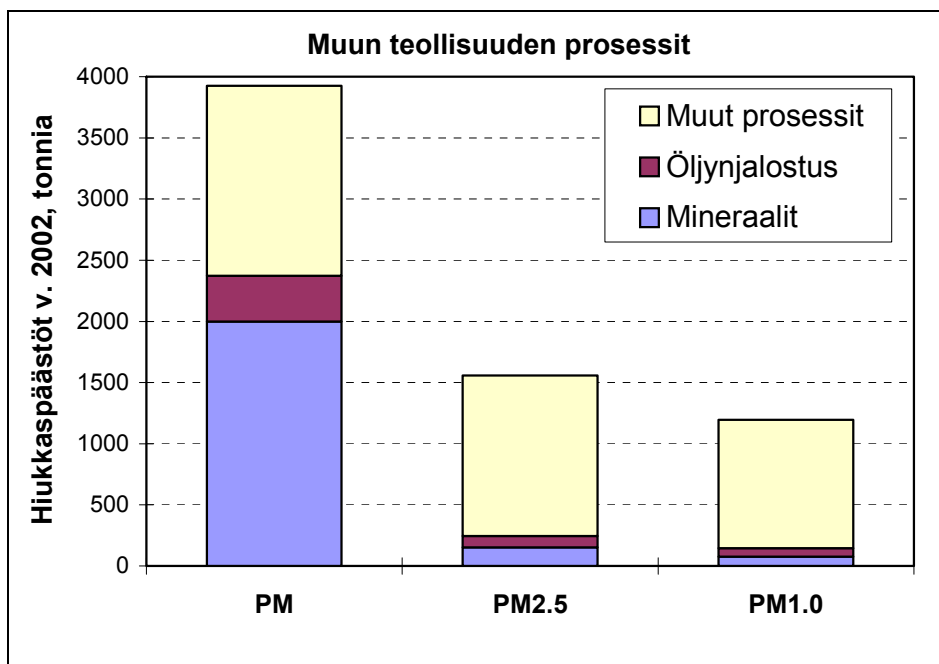


Kuva 4.2. Arviot metsäteollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin.

4.3.3 Muu teollisuus

Muista Suomen teollisuusprosesseista ei ollut saatavilla julkisia pienhiukkaspäästöjen mittaustuloksia. Toisaalta tämän ryhmän osuus koko Suomen polttoperäisistä pienhiukkaspäästöistä voidaan arvioida melko vähäiseksi. Luvun 6 skenaariotarkasteluissa teollisuuden hiukkaspäästöt pohjautuvat tilastoituihin kokonaishiukkaspäästölukuihin (CLRTAP, SYKE 2005), joista PM2,5-osuus on arvioitu hyvin karkeasti, koska hiukkaspäästöjen kokojakaumamittauksia ei ollut käytettävissä.

Kuvassa 4.3 esitetään arviot muun teollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin.



Kuva 4.3. Arviot muun teollisuuden hiukkaspäästöjen jakaumasta päälähteittäin.

4.4 Liikenne

Liikenne rajattiin suunnitteluvaiheessa pois tämän tutkimuksen aihepiiristä. Luvussa 6 esitettävien skenaariotulosten taustaksi käytiin kuitenkin läpi joitakin viimeaikaisia tutkimuksia liikenteen pienhiukkaspäästöistä (Lappi 2005). Ajoneuvojen hiukkaspäästöistä suurin osa (80–95 %) on pienhiukkaskokoalueella ja massajakauman huippu on noin 100 nm:n kokoluokassa.

Liikenteen pienhiukkaspäästöt sisältävät mm. polttoaine- ja voiteluaineperäistä hiiltä, orgaanisia hiiliyhdisteitä ja rikin yhdisteitä. Dieselin poltosta peräisin olevien pienhiukkasten on todettu olevan karsinogeenisia. Toisaalta bensiinikäyttöisten autojen pakokaasut sisältävät joidenkin tutkimusten mukaan korkeampia pienhiukkasten (nanometrikokoluokassa) lukumääriä, vaikka kokonaismassapitoisuus onkin huomattavasti dieselikäyttöisten autojen pakokaasuja pienempi. Terveysvaikutusten kannalta ei vielä tiedetä, onko korkeampi lukumääräpitoisuus jopa haitallisempi kuin suurempi kokonaismassapitoisuus.

Skenaariomallinnuksessa (luvut 5–6) on oletettu, että todellinen pienhiukkaspäästökerroin autolle on kaksi kertaa tyyppihyväksyntätaso – kuitenkin siten, että muutos tapahtuu asteittain, muutaman vuoden kuluessa uuden lainsäädännön voimaantulosta.

Dieselbussilla (ja kuorma-autoilla) nykyinen kokonaishiukkaspäästötaso on noin 100–150 mg/km ja kaasubussilla 2–10 mg/km. EURO 5 tulee voimaan vuonna 2008, jolloin

kokonaishiukkaspäästötasot laskevat viidesosaan eli uusien dieselhenkilöautojen päästö-taso putoaa tasolle 5 mg/km, kun nykyinen EURO 4 vaatii päästötason 25 mg/km. Näin alhaisella päästötasolla tarvitaan jo ns. hiukkasloukkujen ja muiden vastaavien puhdistustekniikoiden käyttöä myös henkilöautopuolella.

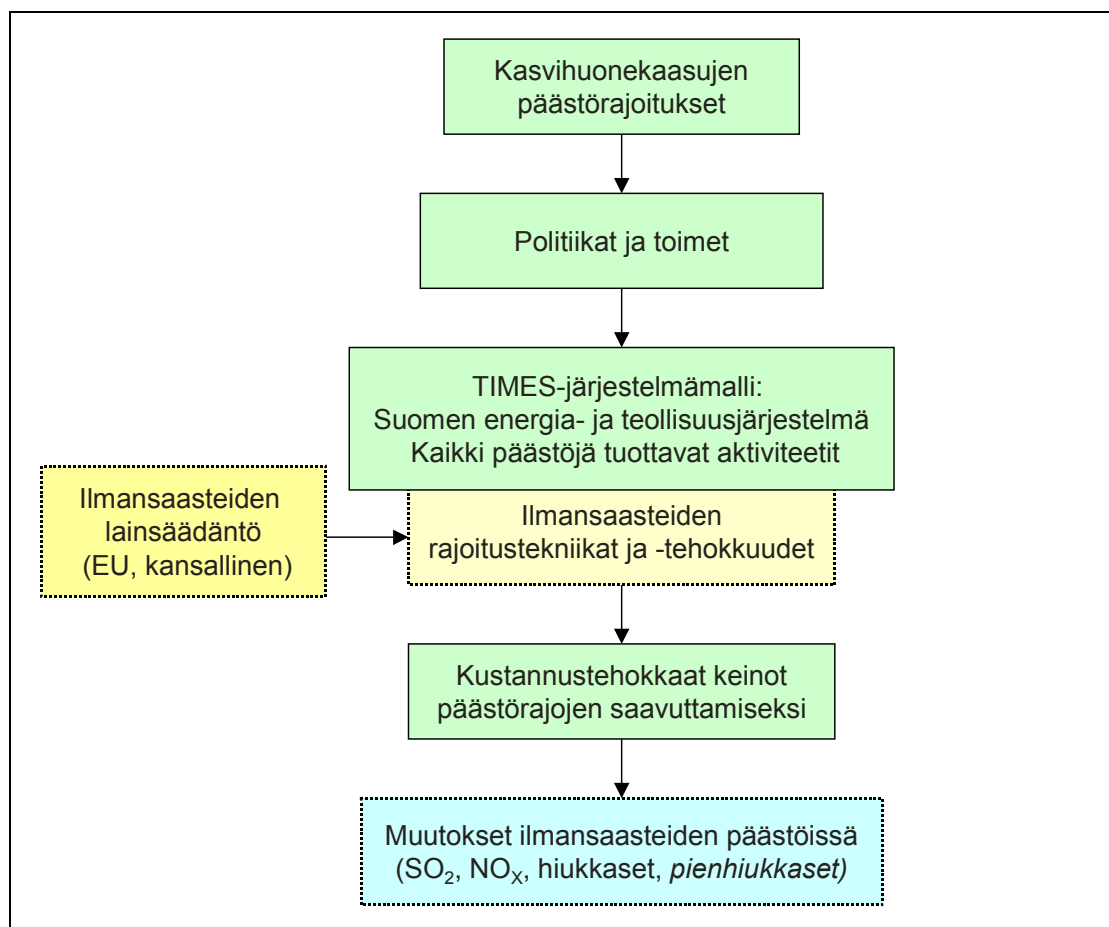
Koska uusien dieselhenkilöautojen pienhiukkaspäästöt tulevat olemaan erittäin alhaisia, ei dieselhenkilöautojen mahdollinen osuuden kasvu koko Suomen autokannassa vaikuta juurikaan tulevaisuuden pienhiukkaspäästöihin. Hiilidioksidipäästöjen rajoittaminen voi lisätä tällaista siirtymistä vähemmän kuluttavaan dieseltekniikkaan.

5. Skenaariotarkastelu Suomen polttoperäisten pienhiukkaspäästöjen kehittymisestä

5.1 Eri teknologioiden ilmansaasteiden päästöjen esittäminen TIMES-mallissa

5.1.1 Päästölähteiden kuvaus

Suomen hiukkaspäästöjen kehityksen skenaariotarkastelussa käytettiin TIMES-energiajärjestelmämallia, joka pohjautuu IEA:n Energy Technology Systems Analysis Programme -ohjelmassa viime vuosien aikana kehitettyyn uuden sukupolven mallin-
nusingympäristöön (ETSAP 2000). Malli on luonteeltaan optimointiin perustuva ns. osit-
taistasapainomalli, jossa voidaan kuvata yksityiskohtaisesti suuri määrä erilaisia ener-
giatekniikoita sekä energian tuotannon että kulutuksen sektoreilla. Kuvassa 5.1 esitetään
järjestelmämallilla tehtävien skenaarioanalyysien periaatekaavio.



Kuva 5.1. TIMES-skenaarioanalyysin periaate. Tämän tutkimuksen pienhiukkaslajennukset on tehty katkoviivoituksella näkyviin osiin.

Suomen TIMES-malli käsittää koko energiajärjestelmän kuvauksen energian hankinnasta hyötyenergian loppukäyttöön. Lisäksi mallissa on kuvattu energian ohella lähes kaikki muut merkittävät kasvihuonekaasujen lähteet. Kuvaus perustuu suureen määrään yksittäisiä energia- ja prosessiteknologioiden luokkia. Esimerkiksi maakaasualueella sijaitsevien suurimpien kaupunkien yli 100 MW:n maakaasukombiteknikkaan perustuvat yhteistuotantolaitokset kuuluvat yhteen teknologialuokkaan, joka voi tuottaa kaukolämpöä vain näiden kaupunkien kaukolämpöverkkoon. Kunkin teknologian kapasiteetti joko voidaan jakaa käyttöönottovuoden mukaisiin vuosikertoihin tai kapasiteettia tarkastellaan operatiivisten parametrien kannalta yhtenä kokonaisuutena. Tarkastelluissa skenaarioissa kaikki tärkeimmät hiukkaspäästöjä aiheuttavat energian tuotanto- ja käytötekniikat mallinnettiin vuosikertaperiaatteella. Teollisuuden prosessipäästöjen kuvauksessa tyydyttiin päästölähteiden keskimääräiseen ominaispäästöjen kuvaukseen ilman vuosikertoja.

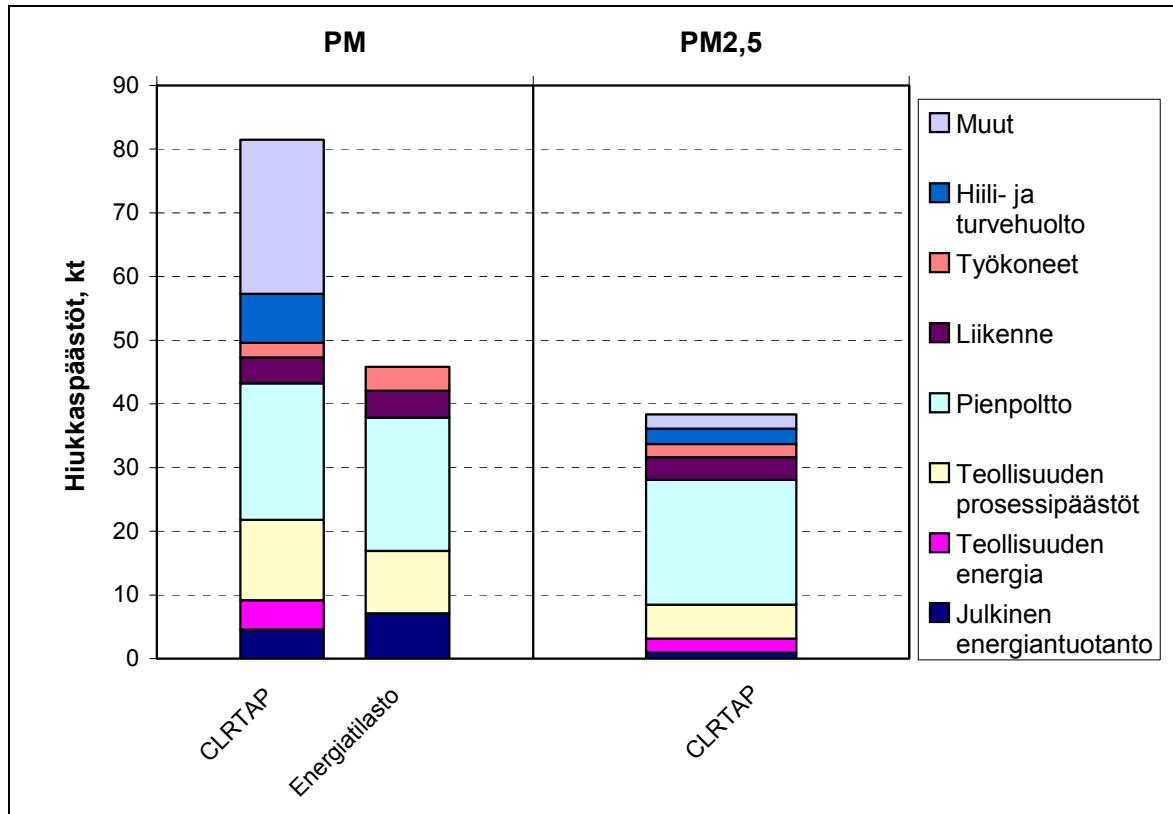
Vuosikertamallinnuksen haittapuolena ovat tarvittavien lähtötietojen suuri määrä sekä mallin koon kasvaminen. Pelkästään yhtä polttoainetta käyttävän teknologian kuvaamiseen tarvitaan päästökertoimia lopullisessa laskentamallissa yhteensä 5 000 kappaletta, mikäli vuosikertoja on 5 kpl, eri päästölajeja 10 kpl, vuoden sisäisiä kuormitusjaksoja 10 kpl ja mallin aikajaksoja 10 kpl. Kun teknologia- ja polttoainevaihtoehtoja on mallissa monia satoja tai suuressa mallissa jopa tuhansia, päästökertoimien kokonaismäärä kasvaa helposti hyvin suureksi.

5.1.2 Hiukkaspäästöjen päästökertoimet

Energian tuotannon ja käytön sekä prosessiteollisuuden hiukkaspäästöistä ja niiden päästökertoimista on saatavilla kokonaismäärien osalta huomattavasti enemmän tietoa kuin pienhiukkasten (PM_{2,5} ja PM₁) osuuksista. Päästöjä tilastoidaan Tilastokeskuksen julkaisemissa Energiatilastoissa, joissa on esitetty arviot energian tuotannon ja käytön sekä teollisuusprosessien kokonaishiukkaspäästöille päälähteittäin (Tilastokeskus 2004). Lisäksi Suomen CLRTAP-raporteissa esitetään vuosittain arviot PM-, PM₁₀- ja PM_{2,5}-hiukkasten päästöistä jopa verrattain tarkalla sektorijaottelulla (SYKE 2005). Kattavia arvioita PM₁-hiukkasten päästöistä ei ole Suomessa toistaiseksi laadittu. Kokonaiskuvan saamiseksi mallinnuksessa pyrittiin kokonaispäästöjen ja PM_{2,5}-päästöjen lisäksi arvioimaan myös kaikkien päästölähteiden hiukkasten PM₁-osuudet.

Kuvassa 5.2 on vertailu Energiatilastojen ja CLRTAP-raportoinnin mukaisista hiukkaspäästöistä vuonna 2003. Energiatilastojen inventaarissa ei ole suoraan eritelty pienpolttoa, mutta sen osuus voidaan karkeasti arvioida polttoainekohtaisten päästöjen perusteella. Kun otetaan huomioon hiukkaspäästöjen arviointiin liittyvät epävarmuudet, päästöinventaarit ovat melko hyvin sopusoinnussa keskenään. Kummankin inventaarin mu-

kaan pienpoltto on energian tuotannon ja käytön merkittävin hiukkaspäästöjen päästölähte. Pienhiukkasten päästöissä pienpolton merkitys tulee vieläkin suuremmaksi.



Kuva 5.2. Suomen hiukkaspäästöjen inventaari Energiatilastojen (energian tuotannon ja käytön ja teollisuusprosessien päästöt) ja CLRTAP-raportoinin mukaan (kaikki lähteet).

Mallitarkastelussa energian tuotannon ja käytön hiukkaspäästökertoimien arvioissa pyrittiin käyttämään mahdollisimman laajasti hyödyksi projektissa kerättyä uutta tietoa. Päästökertoimet vastaavat siten pääosin luvussa 4 esitettyjä arvioita. Erityisesti energiasektorilla sähkön ja lämmön tuotannon päästökertoimet perustuvat jokseenkin suoraan näihin arvioihin. Olemassa olevan laitospäästöjen keskimääräisten päästökertoimien kehitys on arvioitu tekniikoittain ja polttoaineittain vuoteen 2020. Uusien laitosten keskimääräiset päästökertoimet on arvioitu lisäksi vuosikerroittain vuosina 2010, 2015 ja vuonna 2020 tai sen jälkeen valmistuville laitoksille.

Energiasektorilla myös turpeen ja kivihiilen varastointi ja käsittely aiheuttavat merkittäviä hiukkaspäästöjä, joten ne otettiin mukaan skenaarioihin, vaikka ne eivät kuulukaan suoranaisesti työssä käsiteltäviin polttoperäisiin hiukkaspäästöihin. Näiden päästökertoimien arvioinnissa käytettiin lähtökohtana Suomen CLRTAP-raportoinnin mukaisia PM- ja PM2,5-päästöjä. Valitettavasti CLRTAP-raportoinnissa kyseiset päästöt on tilas-

toitu kohdassa "Coal mining and handling" ilman tarkempaa päästölähteiden jakoa. Päästöjen jakaantumisesta tarkemmin kivihiili- ja turvehuollon kesken ei siten ollut käytettävissä luotettavia arvioita, mutta suurin osa näistä päästöistä syntyy turpeen tuotannosta. Mallinnuksessa käytettiin sen vuoksi karkeaa arviota, jonka mukaan turpeen tuotannon, varastoinnin ja käsittelyn yhteenlasketut päästökertoimet ovat noin kolminkertaisia kivihiilen varastoinnin ja käsittelyn päästökertoimiin verrattuna. Päästöjen PM1-osuudeksi oletettiin karkeasti 60 % PM2,5-päästöistä, ja ne muodostuvat suurimmaksi osaksi turpeen tuotannosta.

Teollisuuden oman sähkön ja lämmön tuotannon päästökertoimet perustuvat pääosin luvussa 4 esitettyihin arvioihin. Selvimpänä poikkeuksena ovat metsäteollisuuden soodakattiloiden hiukkaspäästöt, jotka pyrittiin arvioimaan siten, että metsäteollisuuden kokonaispäästöt vastaavat mahdollisimman hyvin Suomen CLRTAP-raportoinnissa esitettyjä lukuja. Soodakattiloiden kokonaispäästökertoimet asettuivat tällöin luvussa 4 esitettyjen vaihteluvälien yläpäähän, mutta vastaavasti PM2,5- ja PM1-osuudet voitiin arvioida kohtuullisen pieniksi. Todettakoon, että käytettävissä oli myös Syken VAHTI-tietokannan laitoskohtaisia PM10-päästöarvioita vuodelta 2000. Tietokannan raportoiduista päästöistä laskettu keskimääräinen soodakattiloiden PM10-päästökerroin on noin 20 mg/MJ. Tämä sopii varsin hyvin yhteen mallilaskennassa käytettyjen kertoimien kanssa.

Teollisuuden prosessiperäisten hiukkaspäästöjen nykyiset päästökertoimet arvioitiin suoraan tilastoista, pääosin Suomen CLRTAP-raportoinnin pohjalta. Lisäksi käytettiin hyväksi yritysten ympäristöraporttien hiukkaspäästötietoja muun muassa metallien valmistuksen eri prosessien päästökertoimien arvioinnissa. Koska teollisuusprosessien hiukkaspäästöistä ei ollut tarpeeksi mittaustuloksia käytettävissä, prosessipäästöjen tuleva kehitys arvioitiin kaikilla sektoreilla samanlaiseksi siten, että kokonaismäärän ominaispäästöt vähenevät noin 25 % vuoteen 2020 mennessä.

Pienpolton osalta laskentamallissa oletettiin, että kiinteistöjen lämmityskattilat uusitaan keskimäärin 20 vuoden välein. Kiinteät uunit ja takat on puolestaan uusittava noin 40 vuoden välein. Puun polttoon tarkoitettujen lämmityskattiloiden markkinoilla käsinsyöttöön perustuvien klapikattiloiden osuuden oletettiin vähenevän selvästi tulevaisuudessa, sillä uuden kattilakannan voidaan arvioida koostuvan suurelta osin automaattisyöttöistä stoker- ja pellettikattiloista. Hake- ja pellettikäyttöiset automaattisyöttöä hyödyntävät kattilat tuottavat merkittävästi vähemmän hiukkaspäästöjä pilkekattiloihin verrattuna. Toisaalta myös pilkekattiloiden markkinoilla vähäpäästöisten käänteispalokattiloiden voidaan olettaa saavan sijaa, mikäli kiinteistökattiloilta aletaan vaatia tyyppihyväksyntä. Uusien kattiloiden keskimääräinen hiukkaspäästökerroin jäisi tällöin oletusten mukaan selvästi alle 100 mg:aan/MJ, kun vanhojen pilkekattiloiden nykyinen keskimääräinen päästökerroin on arviolta noin 200 mg/MJ.

Liikenteen hiukkaspäästöistä on esitetty melko yhteensopivia arvioita sekä CLRTAP-raportoinnissa että VTT:n LIPASTO-mallin tuloksissa (Mäkelä ym. 2004). Tilastokeskuksen Energiatilastoissa julkaistut liikenteen päästötilastot perustuvat juuri LIPASTO-mallin tuottamiin varsin yksityiskohtaisiin arvioihin. Pienhiukkasosuuksista on kuitenkin esitetty kattavia arvioita vain CLRTAP-raportoinnissa PM_{2,5}-päästöjen osalta. Skenaariotarkastelussa kokonaispäästöjen kertoimet perustuvat edellä mainittuihin lähteisiin, ja PM₁-osuuksista käytettiin VTT:n asiantuntija-arvioita. Työkoneiden päästökerroimet arvioitiin Energiatilastojen päästöinventaarin pohjalta.

5.2 Tarkastellut kokonaisskenaariot

Järjestelmämallilla voidaan laskea skenaarioita siten, että yksityiskohtaisia tuloksia saadaan valituista tarkasteluvuosista, joiden välillä kehitys oletetaan lineaariseksi. Tässä työssä mallilaskelmissa laskentavuosiksi valittiin vuodet 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 ja 2030. Tuloksia käsitellään jäljempänä kuitenkin vain vuoteen 2025 saakka.

Tarkastellut skenaariot koostuvat perusskenaariosta (Base), Kioto-skenaariosta, päästökauppaskenaarioista (10 ja 20 €/n hinnoin), puun pienpolton Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman mukaisesta UEO-skenaariosta sekä jätedirektiiviskenaariosta. Perusskenaariota lukuun ottamatta kaikissa skenaarioissa oletetaan Kioton pöytäkirjan ja EU:n taakanjaon mukainen kasvihuonekaasujen päästötavoite. Päästökauppaskenaarioissa oletetaan sen lisäksi, että vuoteen 2020 mennessä päästöjä on rajoitettava 20 %. Perusskenaario vastaa Suomen ilmasto- ja energiastrategian ns. "With measures"-skenaariota (WM), kun taas kukin kasvihuonekaasujen rajoitusskenaario edustaa erästä "With additional measures"-skenaariota. Perusskenaariota voidaan siten pitää muiden skenaarioiden vertailukohtana arvioitaessa päästöjen vähentämisen vaikutuksia.

Pienpolton UEO-skenaariossa tarkastellaan kehitysvaihtoehtoa, jossa uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman tavoitteet puubiomassan pienkäytön lisäämisestä toteutetaan (KTM 2003). Koska pienpolto on merkittävä hiukkaspäästöjen lähde, skenaariolla pyritään havainnollistamaan pienpolton muutosten vaikutuksia hiukkaspäästöihin. Jätedirektiiviskenaariolla puolestaan tarkastellaan jätteen rinnakkaispolton rajoittamisen mahdollisia vaikutuksia hiukkaspäästöihin. Tätä skenaariovarianttia ei kuitenkaan ole otettu mukaan tuloksia esitteleviin kuviin. Taulukko 5.1 esittää yhteenvedon eri laskentatapauksista.

Taulukko 5.1. Yhteenveto tarkasteltujen skenaarioiden perusoletuksista.

	Päästöoikeuksien hinta, €/tonni	Päästö- tavoite	Muut erityiset oletukset
Perusskenaario (Base)	0	Ei	Ei
Kioto	–	Kioto	Ei
T10-20%	10	Kioto, –20 % v. 2020	Ei
T20-20%	20	Kioto, –20 % v. 2020	Ei
UEO	–	Kioto	Puun pienpoltto UEO:n mukaisesti
Jätedirektiivi	–	Kioto	Jätteen seospolton rajoitukset

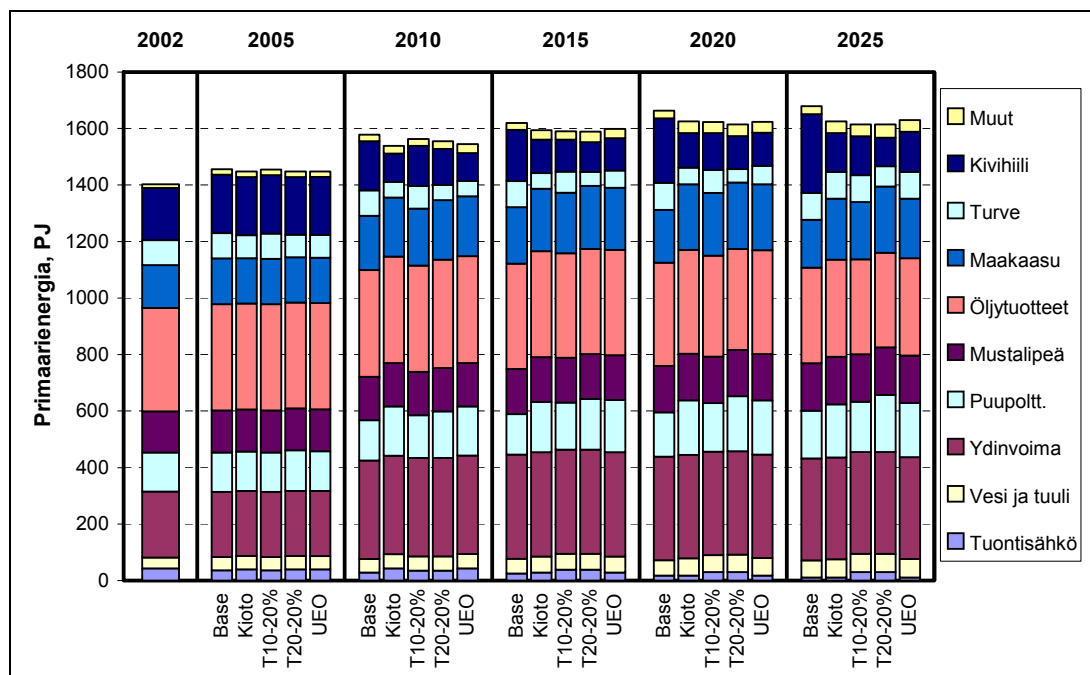
Skenaariotarkastelun tulokset esitetään seuraavassa luvussa.

6. Tulokset

6.1 Energian kokonaiskulutus ja kasvihuonekaasut

Suomen primäärienergian kokonaiskulutus nousee perusskenaariossa noin 1 580 PJ:n määrään vuonna 2010. Määrä on varsin hyvin sopusoinnussa Kauppa- ja teollisuusministeriön vuoden 2005 alussa laatiman WM-skenaarion kanssa, jossa kokonaiskulutuksen arvioitiin olevan varsin tarkkaan samalla tasolla. Vuonna 2020 kulutus on perusskenaariossa noin 1 670 PJ, joka on hieman pienempi kuin KTM:n WM-skenaariossa.

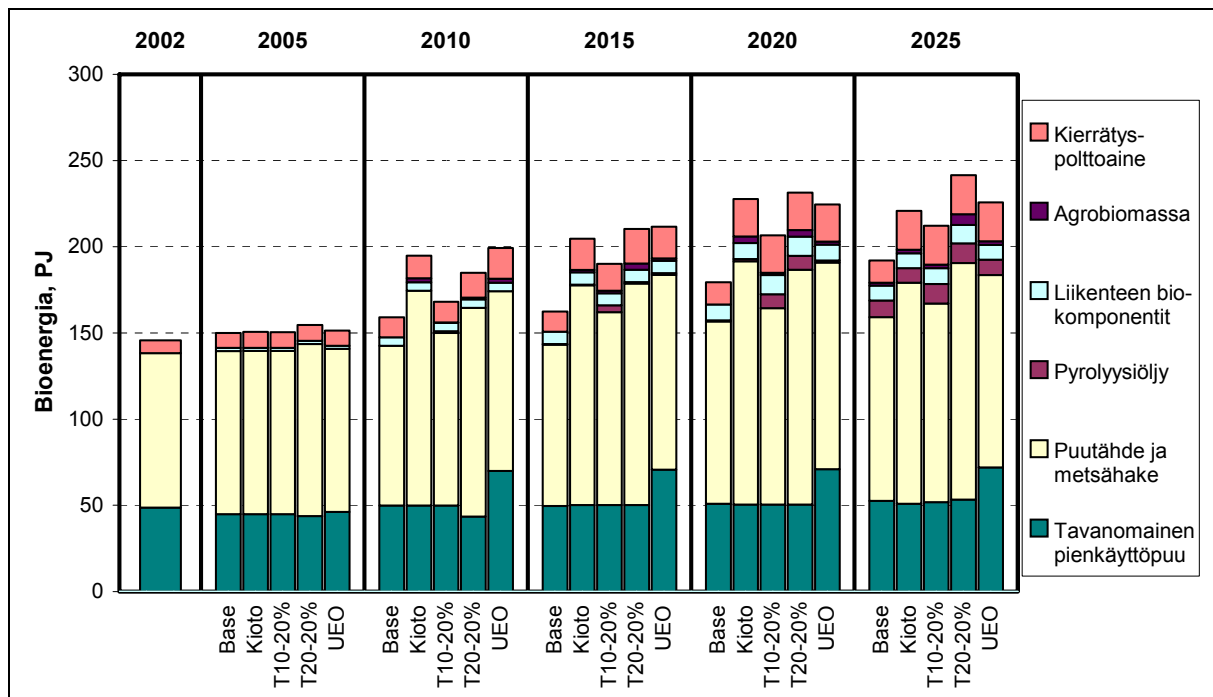
Koska tarkastelun kohteena on verraten lyhyt aikaväli, primäärienergian kokonaiskulutuksen jakaumassa energialähteittäin on skenaarioiden välillä aluksi vain pieniä eroja, kuten voidaan nähdä kuvasta 6.1. Maakaasun kokonaiskäyttö kasvaa eri skenaarioissa 200–215 PJ:n määrään vuonna 2010. Kasvu on voimakkainta 20 euron päästökauppaskenaariossa. Kivihiilen kokonaiskäyttö puolestaan vähenee päästöjen rajoitusskenaarioissa vuoteen 2010 mennessä 100–140 PJ:n määrään, mutta alkaa sen jälkeen joissakin skenaarioissa jälleen hitaasti kasvaa. Hiilen kulutuksen vähennys on luonnollisesti voimakkainta pelkästään kotimaisiin toimiin perustuvissa rajoitusskenaariossa. Myös turpeen käyttö vähenee tuntuvasti verrattuna perusskenaarioon. Vuonna 2010 turpeen kokonaiskulutus laskee lähes asetetulle alarajalleen (54 PJ) kaikissa muissa päästöjen rajoitusskenaarioissa paitsi 10 €:n päästökauppaskenaariossa.



Kuva 6.1. Primäärienergian kokonaiskulutus energialähteittäin tarkastelluissa skenaarioissa.

Uusiutuvan energian edistämishojelman (KTM 2003) tavoitteet toteutuvat päästöjen rajoitusskenaarioissa varsin hyvin. Bioenergian osalta tavoite on 349 PJ vuonna 2010, jonka alle jäädyään päästökauppaskenaarioissa 12–30 PJ:n verran. Pelkästään kotimais- ten toimien skenaarioissa bioenergian kokonaistavoite saavutetaan, ja myös korkeam- man päästöoikeuksien hinnan skenaariossa päästään sitä lähelle. Toteutumatta tavoit- teista jää erityisesti puun pienkäytön lisäys, sillä ohjelman tavoitteena on nostaa pien- käyttö peräti 72 PJ:n määrään vuonna 2010. UEO-skenaariota lukuun ottamatta pien- käyttö jää tulosten mukaan noin 50 PJ:n tasolle. Voima- ja lämpölaitoskäytössä lisäys on kotimais- ten toimien skenaarioissa siten jopa tavoitteita suurempi. Kuvassa 6.2 on havainnollistettu bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden käytön kehitystä. Kokonaisu- tena bioenergian lisäkäytön tavoitteista toteutuu rajoitusskenaarioissa suurin osa.

Tuulivoiman tuotantotavoite on uusiutuvan energian edistämishojelmassa 1,1 TWh vuonna 2010 ja 5,1 TWh vuonna 2025. Nykynäkymin vuoden 2010 tavoitetta ei kuiten- kaan ehditä saavuttaa, minkä vuoksi skenaarioissa tuulivoimakapasiteetin ylärajaksi asetettiin noin 300 MW vuonna 2010. Tämä kapasiteetti myös rakennetaan kaikissa päästöjen rajoitusskenaarioissa, ja vuoden 2010 jälkeen tuulivoiman lisäys jatkuu suun- nilleen edistämishojelman mukaisena. Vesivoiman tuotantotavoitteena on ohjelman mukaan 14,5 TWh vuonna 2010 ja peräti 16 TWh vuonna 2025. Lisäyksestä suurin osa koskee pienvesivoimaa. Tarkastelluissa skenaarioissa vesivoiman määrä rajoitettiin vi- rallisen WM-skenaarion mukaisesti runsaaseen 13 TWh:n määrään, joten tavoitteita ei tältä osin ollut mahdollista saavuttaa. Vuoteen 2025 mennessä vesivoiman tuotanto kas- vaa kaikissa skenaarioissa noin 14,5 TWh:n määrään.

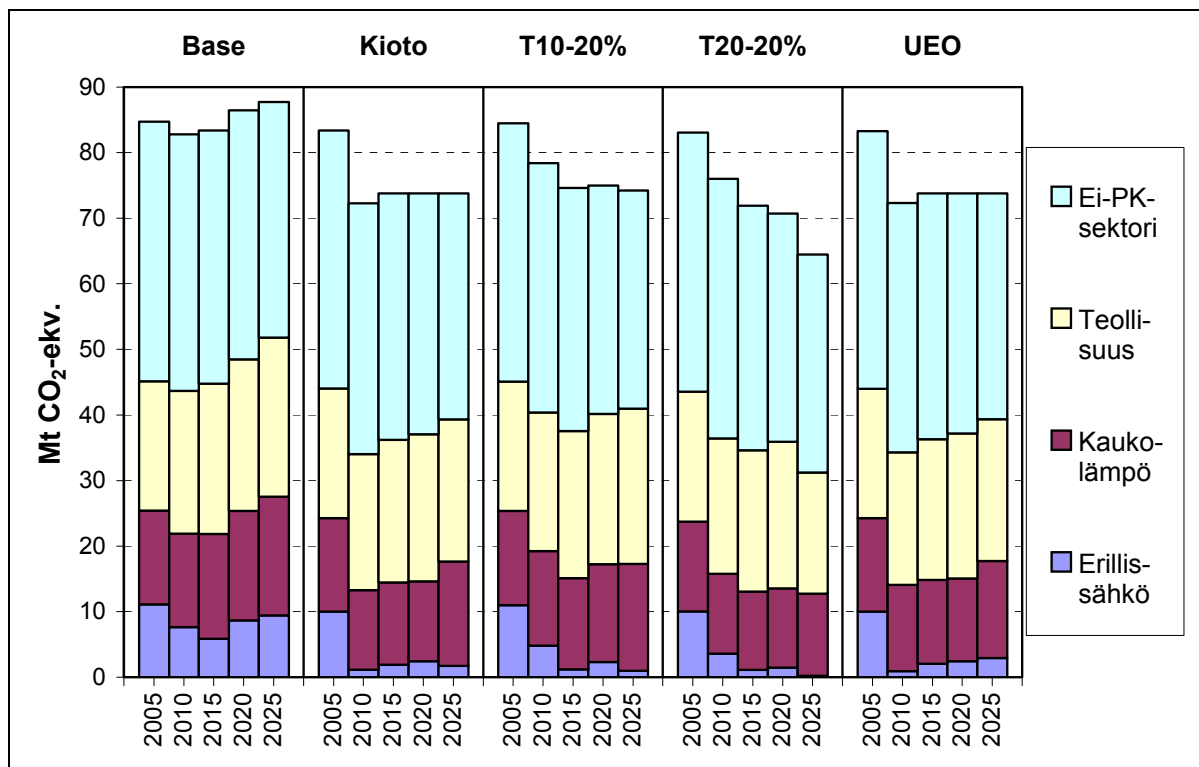


Kuva 6.2. Bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden kokonaiskäyttö (ilman puunjalostuksen jäteliemiä) tarkastelluissa skenaarioissa.

Sähköenergian kokonaiskulutus kasvaa perusskenaariossa vuonna 2010 noin 96 TWh:n määrään, kun KTM:n päivitetystä WM-skenaariossa kulutus on 95,6 TWh. Kokonaiskulutus on siten tarkastelluissa skenaarioissa hieman WM-skenaariota suurempi. Ero johtuu lähinnä perusskenaariossa korkeana pysyvistä suoran sähkölämmityksen suosista uusien pientalojen lämmitystapavalinnoissa.

Kuuden tärkeimmän kasvihuonekaasun (CO₂, CH₄, N₂O, HFC:t, PFC:t ja SF₆) kokonaispäästöt olivat inventaarien mukaan Suomessa vuonna 1990 noin 73,8 milj. tonnia CO₂-ekvivalentteina. EU:n sopiman Kioton pöytäkirjan mukaisen taakanjaon mukaan Suomen tulee rajoittaa näiden kaasujen päästöt vuosina 2008–2012 vuoden 1990 tasolle. Kuvassa 6.3 esitetään päästöjen kokonaismäärän kehitys tarkastelluissa TIMES-mallilla lasketuissa skenaariossa. Kuva esittää myös päästöjen jakautumisen päästökaupan piiriin ja sen ulkopuolelle jääviin päästölähteisiin. Päästökauppasektorilla vähennystarve voidaan luonnollisesti kattaa omien päästönvähennysten ohella päästöoikeuksien ostolla.

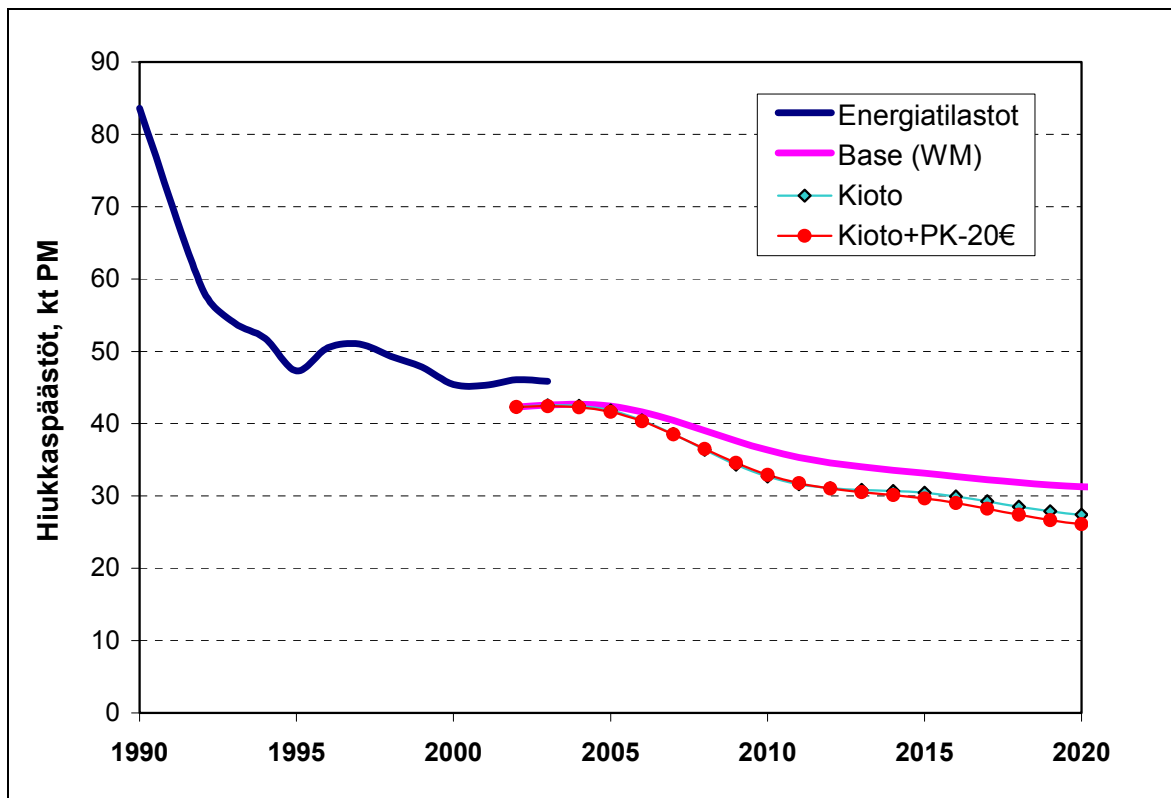
Kotimaisten toimien Kioto-skenaarion tulosten mukaan päästökauppasektorin optimaalinen yhteenlaskettu päästokiintiö olisi Kioto-periodilla noin 36 Mt ja ei-päästökauppasektorin noin 38 Mt. Päästöjen rajoittamisen marginaalikustannukset ovat kuitenkin Kioto-periodilla yli 20 €/t(CO₂), joten suomalaisten yritysten kannattaa ostaa huomattavasti päästöoikeuksia etenkin 10 €:n hinnan skenaariossa. Tätä kalliimmalla päästöjen vähentäminen Suomessa kannattaa oikeuksien oston sijasta.



Kuva 6.3. Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt päästökaupan piiriin kuuluvilla ja sen ulkopuolisilla sektoreilla tarkastelluissa skenaarioissa (vain CO₂-päästöt kaupan piirissä).

6.2 Hiukkasten kokonaispäästöt

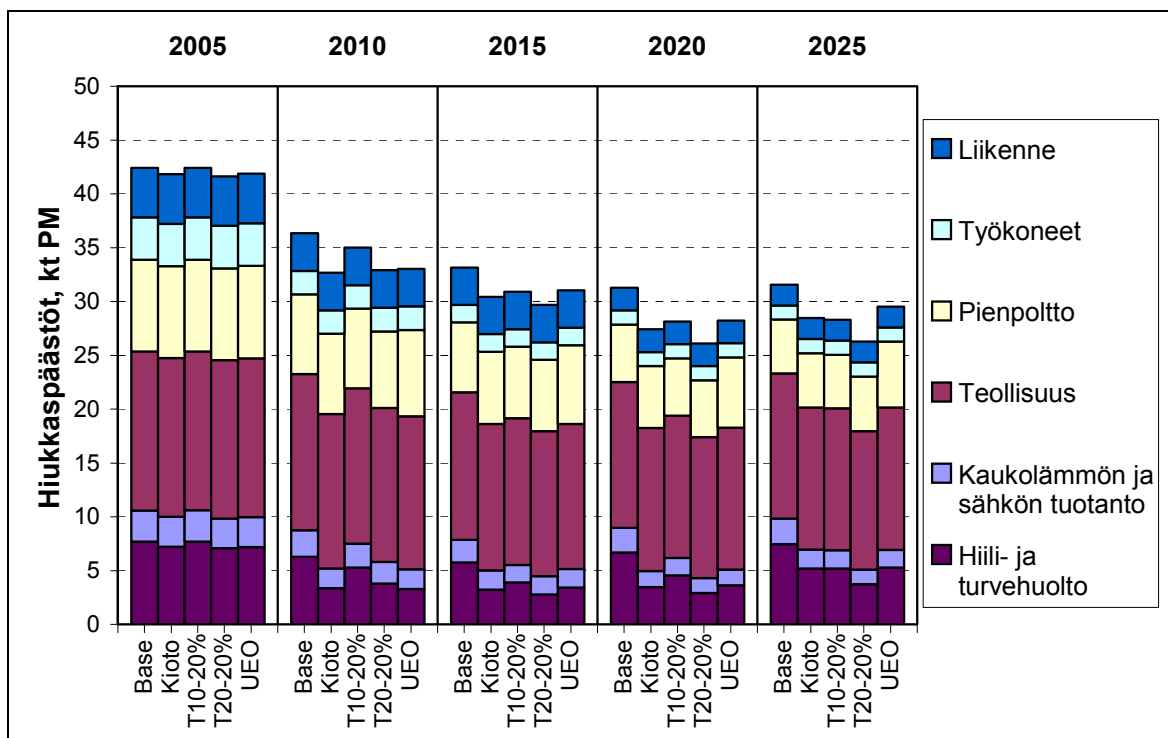
Energiatilastoissa julkaistujen päästöinventaarien mukaan hiukkaspäästöjen kokonaismäärä vähentyi Suomessa 1990-luvun aikana lähes puoleen. Mallitarkastelun tulosten mukaan päästöt vähenevät kaikissa skenaarioissa vuoteen 2020 mennessä edelleen merkittävästi. Tilastojen mukainen toteutunutta kehitystä sekä mallilaskelmien perusskenaarion mukaista kehitystä havainnollistaa kuva 6.4. Laskentamallin tuottamaa päästökehitystä ei kuitenkaan voi suoraan verrata tilastoihin, sillä mallin tuloksissa ovat Energiatilastoista poiketen mukana myös hiili- ja turvehuollon päästöt. Lisäksi päästöjen jakoumassa päästölähteittäin on varsin suuria eroja, koska mallilaskelmissa käytettiin energian tuotannolle projektissa arvioituja päästökertoimia, joita ei pyritty kalibroimaan tilastojen kanssa yhteensopiviksi.



Kuva 6.4. Energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöjen kokonaismäärän kehitys tilastojen mukaan sekä tarkastellussa perusskenaariossa, Kioto-skenaariossa sekä 20 €:n päästökauppaskenaariossa. Laskentamallin skenaariotuloksissa on Energiatilastoista poiketen mukana myös hiili- ja turvehuollon päästöt, joten mallin tuottamaa päästökehitystä ei voi suoraan verrata tilastoihin.

Hiukkasten kokonaispäästöt vähenevät eri skenaarioissa vuoden 2002 tasosta 15–22 % vuoteen 2010 mennessä ja 26–38 % vuoteen 2020 mennessä. PM2,5-pienhiukkasten vastaavat vähennykset ovat 15–21 % vuoteen 2010 mennessä ja 30–38 % vuoteen 2020 mennessä. Kasvihuonekaasujen rajoittaminen nopeuttaa jonkin verran hiukkaspäästöjen vähenemistä. Bioenergian käytön lisäys kohdistuu pääasiassa lämpö- ja voimalaitoksiin, joissa puun polton hiukkaspäästöt eivät oletusten mukaan poikkea merkittävästi fossiilisten polttoaineiden tai turpeen päästöistä, kun käytössä on tehokkaat hiukkaserotuslaitteet, kuten sähkösuodatin ja kuitusuodatin.

Päästökauppa ei sinänsä juuri vaikuta hiukkaspäästöihin, vaan ratkaisevaa on päästöoikeuksien hinta. Jos hinta jää alhaiseksi, päästöoikeuksia kannattaa ostaa Suomeen runsaasti, jolloin päästöjen kehitys on vuoteen 2015 saakka lähellä perusskenaarion kehitystä. Korkeammilla päästöoikeuksien hinnoilla hiukkaspäästöjen kehitys on lähempänä kotimaisiin toimiin perustuvaa rajoitusskenaariota (Kioto) ja jää Kioton periodin jälkeen jo sen alapuolelle. UEO-skenaariossa puun pienpolton runsas lisääminen johtaa hiukkaspäästöjen vähenemisen hidastumiseen, mutta vaikutus päästöjen kokonaistaseeseen on sittenkin melko pieni.



Kuva 6.5. Energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöjen kokonaismäärä tarkastelluissa skenaarioissa.

Kuten kuva 6.5 osoittaa, hiili- ja turvehuollon päästöt muodostavat yhden merkittävän osan energiasektorin hiukkaspäästöistä. Toisaalta niiden pienhiukkassosuudet ovat varsin pieniä, joten päästöjen tulevan vähennystarpeen kannalta ne eivät ole kovin keskeisellä sijalla. Nämä päästöt otettiin kuitenkin mukaan tarkasteluun, sillä ne ovat luonteeltaan elimellinen osa energian tuotannon hiukkasten kokonaispäästöjä.

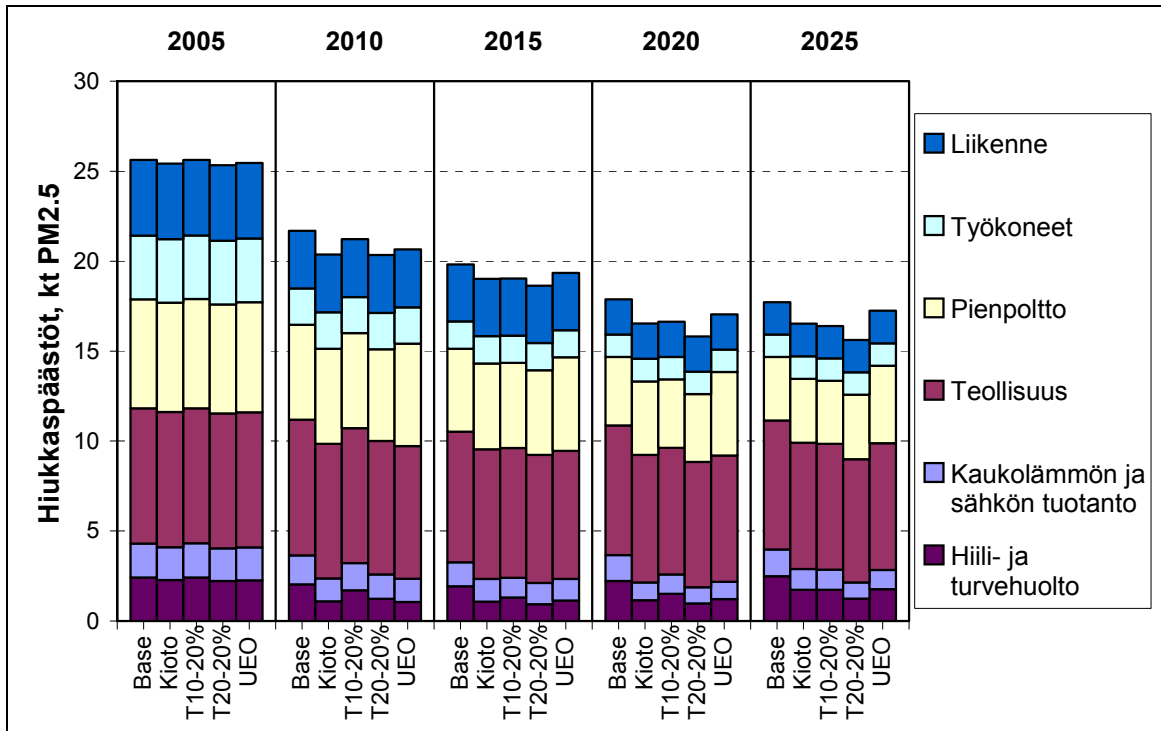
Muun energiasektorin (julkinen sähkön ja lämmön tuotanto) hiukkaspäästöt ovat tulosten mukaan yllättävänkin pienet. Laskelmien mukaan päästöt ovat nykyisin noin 3 kt eli vain 7 % kaikista energian tuotannon ja käytön sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöistä. Vuoteen 2020 mennessä päästöt vähenevät perusskenaariossakin 20 % ja rajoitusskenaarioissa 40–50 %. Sekä hiili- että turvelauhdevoiman tuotanto supistuu rajoitusskenaarioissa hyvin vähäiseksi vuodesta 2010 lähtien. Kaukolämpösektorilla bioenergian ja kierrätyspoltoaineiden käyttö lisääntyy tuntuvasti yhteistuotannossa, mutta laitospäästöjen uusiutumisen ansiosta päästöjen määrä vähenee.

Laskelmien oletusten mukaan esimerkiksi vuonna 2010 valmistuvissa uusissa leijukerroskattiloissa puun, turpeen ja kivihiilen polton hiukkaspäästökertoimet ovat suunnilleen samansuuruisia ja ne kaikki ovat alle 10 mg/MJ. Kaasutustekniikat tuovat vuoden 2010 jälkeen merkittävän lisävähennyksen päästöihin. Jätedirektiiviskenaarion tulosten mukaan jätteen rinnakkaispolton loppuminen tavanomaisissa leijukerroskattiloissa vuodesta 2008 alkaen vähentäisi kokonaispäästöjä vain noin 0,5 kt vuosina 2010–2015, mutta pienhiukkasten suhteellinen osuus pieneni hieman voimakkaammin. Rinnakkaispolto loppuu muissakin skenaarioissa joka tapauksessa lähes kokonaan vuoden 2015 jälkeen, jolloin jätteen polton päästöt vähenevät. Tämän jälkeen kierrätyspoltoaineet hyödynnettäisiin pääosin moderneissa kaasutuslaitoksissa.

Teollisuus kattaa tulosten mukaan hiukkaspäästöjen kokonaismäärästä nykyisin noin 35 %. Kasvihuonekaasujen rajoitusskenaarioissa teollisuuden osuus hiukkaspäästöistä nousee vuoteen 2020 mennessä noin 50 %:iin, ja perusskenaariossakin 44 %:iin. Osuuden nousu johtuu kuitenkin pitkälti siitä, että teollisuusprosessien ominaispäästöjen kehitys arvioitiin melko varovaisesti. Teollisuuden oman energiantuotannon päästöt vähenevät tuntuvasti, vaikka eivät yhtä nopeasti kuin energiasektorin päästöt. Painetta päästöjen lisäykseen aiheuttaa teollisuuden sähkön ja lämmön yhteistuotannon laajentaminen, jonka kannattavuus paranee huomattavasti kasvihuonekaasujen päästöjä rajoitettaessa. Teollisuuden päästöjä käsitellään vielä hieman tarkemmin kohdassa 0.

Pienpolto on nykyisten virallisten inventaarien mukaan merkittävin energiaperäisten hiukkaspäästöjen lähde. Mallitarkastelun tulosten mukaan pienpolton päästöt ovat nykyisin kuitenkin vain alle puolet inventaarien mukaisista arvioista. Kun sekä Tilastokeskuksen julkaiseman inventaarin että CLRTAP-raportoinnin mukaan pienpolton kokonaispäästöt ovat olleet viime vuosina yli 20 kt, mallilaskelmissa käytettyjen päästökertoimien mu-

kaan päästöt ovat nykyisin selvästi alle 10 kt. Työssä koottu tuore päästöjen mittaustieto antanee siten aihetta pienpolton hiukkaspäästöjen uudelleenarviointiin. Tosin laboratoriomittauksiin perustuvat päästökertoimet voivat todellisissa käyttöolosuhteissa ja erilaisilla käyttötavoilla helpostikin kaksinkertaistua. Tähän ongelmaan saataneen lisätietoa juuri alkaneessa Tekesin PUPO-hankkeessa, jossa mitataan todellisia päästötilanteita kentällä. Pienpolton hiukkaspäästöjä analysoidaan lähemmin kohdassa 4.1.

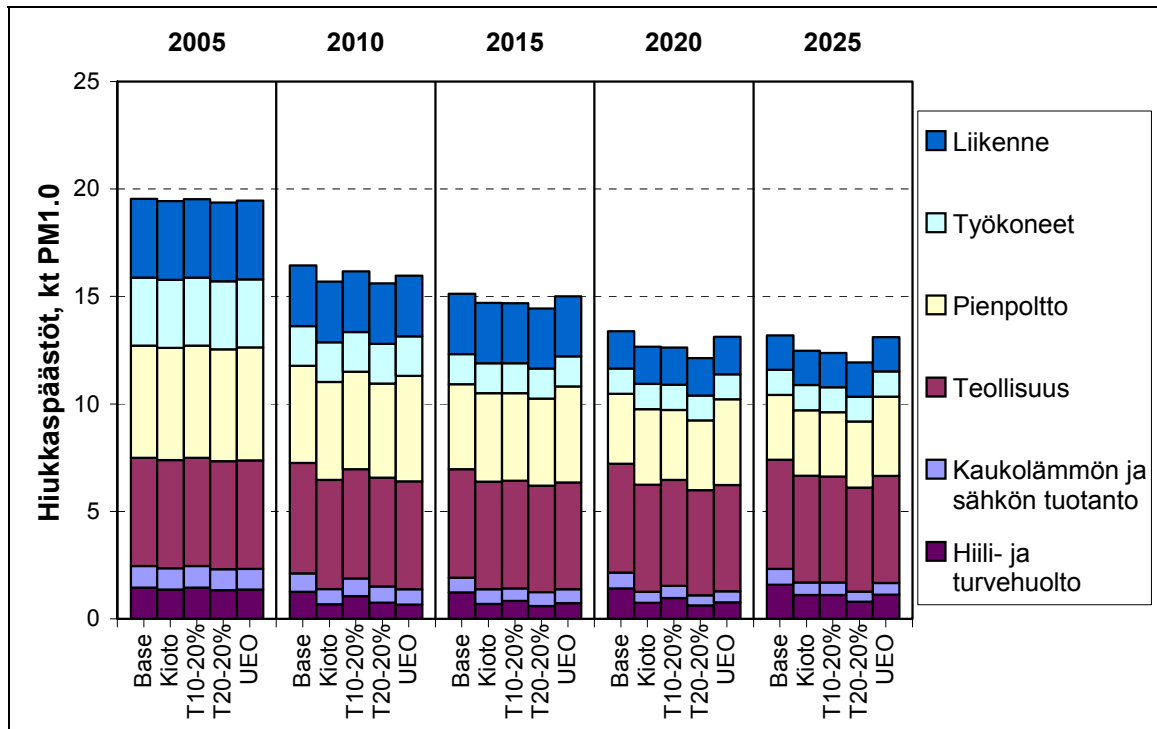


Kuva 6.6. Energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien PM_{2,5}-hiukkaspäästöjen määrä tarkastelluissa skenaarioissa.

Pienpolton ohella merkittäviä päästöjen vähennyksiä tullaan seuraavien kymmenen vuoden aikana ilmeisesti saavuttamaan ainakin liikenteessä ja työkoneiden käytössä. Dieselajoneuvoille tulossa olevat tiukentuvat EU-tason päästönormit johtaisivat täysimääräisesti toteutuessaan varsin nopeaan päästöjen pudotukseen. Laskelmissa oletettiin ominaispäästöjen pienenevän kuitenkin käytännössä hitaammin. Tieliikenteen ohella vastaavat päästönormit tulevat oletusten mukaan johtamaan myös työkoneiden hiukkaspäästöjen merkittävään vähenemiseen, tosin jonkin verran viivästetysti.

Pienhiukkaspäästöjen kehitys on varsin samansuuntainen kuin hiukkasten kokonaispäästöjen (kuvat 6.6 ja 6.7). Eri päästölähteiden pienhiukkasosuuksien erilaisuus johtaa kuitenkin tulosten mukaan siihen, että teollisuusprosessien merkitys korostuu kaikkein voimakkaimmin juuri pienhiukkaspäästöissä. Skenaariotarkastelussa korostuminen johdetaan kuitenkin osin oletetuista varovaisista ominaispäästöjen kehitysarvioista. Tu-

lostien mukaan pienpolton PM1-pienhiukkaspäästöt voivat vähentyä jopa alle 3 kt:n määrään vuonna 2020. Vaikka nykyisen laitekannan ominaispäästöt olisikin arvioitu liian alhaisiksi, tulokset osoittavat joka tapauksessa uusien pienpolttotekniikoiden merkittävän potentiaalin pienhiukkaspäästöjen kannalta.



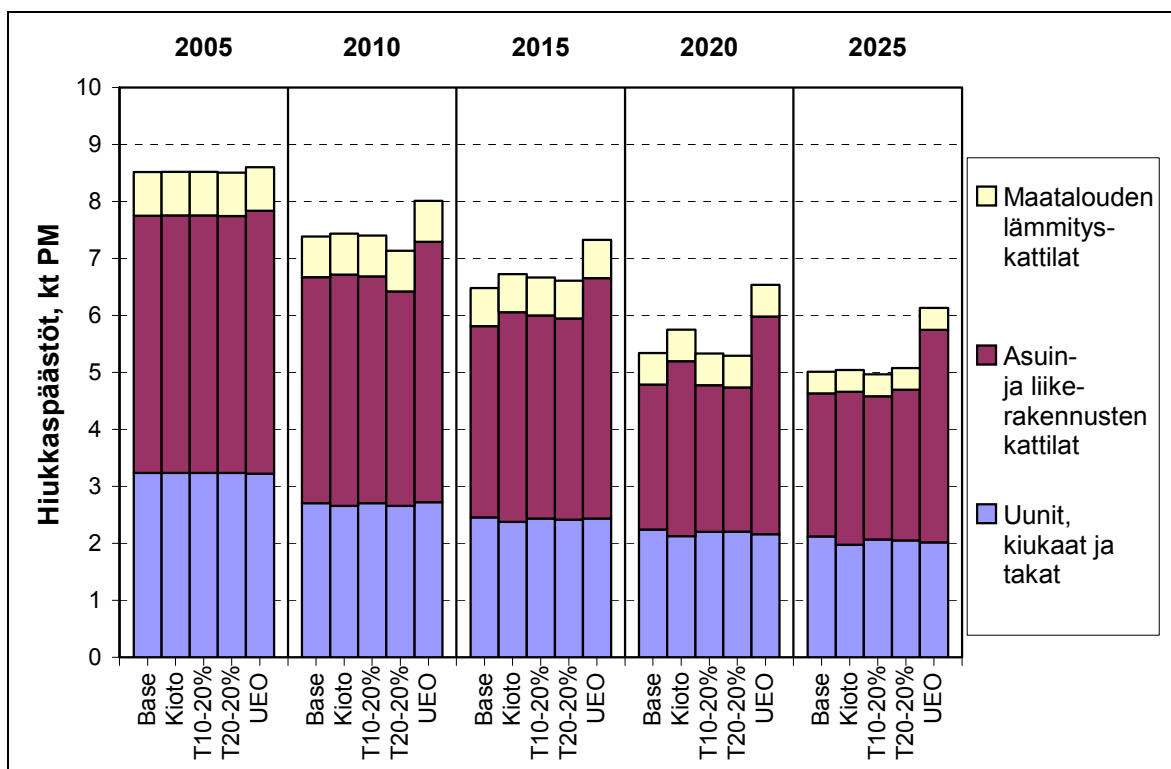
Kuva 6.7. Energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien PM1-hiukkaspäästöt tarkastelluissa skenaarioissa.

6.3 Pienpolton hiukkaspäästöt

Pienpoltolla tarkoitetaan tässä julkaisussa asuin- ja liikerakennusten sekä maatalousrakennusten lämmitystä sekä kotitalouksien ja palveluiden muita kiinteitä polttolaitteita. Rakennusten lämmityskattilat, tulisijat ja takat muodostavat siten valtaosan pienpoltosta. Lisäksi hiukkaspäästöjen kannalta merkittävä osa pienpolttoa on puukäyttöisten kiukaisten lämmitys. Päästöjen kokonaismäärän kehitys esitetään kuvassa 6.8.

Tulosten mukaan pienpolton hiukkasten kokonaispäästöt olisivat nykyisin vain noin 9 kt, vaikka julkaistuissa inventaareissa päästöjen määräksi on arvioitu yli 20 kt. Hiukkaspäästöistä aiheutuu tulosten mukaan nykyisin runsaat 40 % uuneista, kiukaista ja takoista, noin 50 % asuin- ja liikerakennusten kattiloista ja loput maatalousrakennusten kattiloista sekä muista kiinteistä polttolaitteista.

Koska skenaarioissa arvioitiin kattilakannan uusiutuvan uuneja ja takkoja paljon nopeammin eikä kiukaiden polttotekniikassa oletettu merkittävää paranemista, kattiloiden osuus päästöistä vähenee UEO-skenaariota lukuun ottamatta kaikissa skenaarioissa. Tulosten mukaan vuonna 2020 kattiloiden ja tulisijojen päästöosuudet olisivat suunnilleen yhtä suuret. Puulämmitystä merkittävästi lisäävässä UEO-skenaariossa lämmityskattiloiden kokonaispäästöt vähenevät vain 20 %, kun muissa skenaarioissa vähennys on jopa 50 %. Kaikkiaan pienpolton hiukkasten kokonaispäästöt vähenevät eri skenaarioissa 25–40 % vuoteen 2020 mennessä.

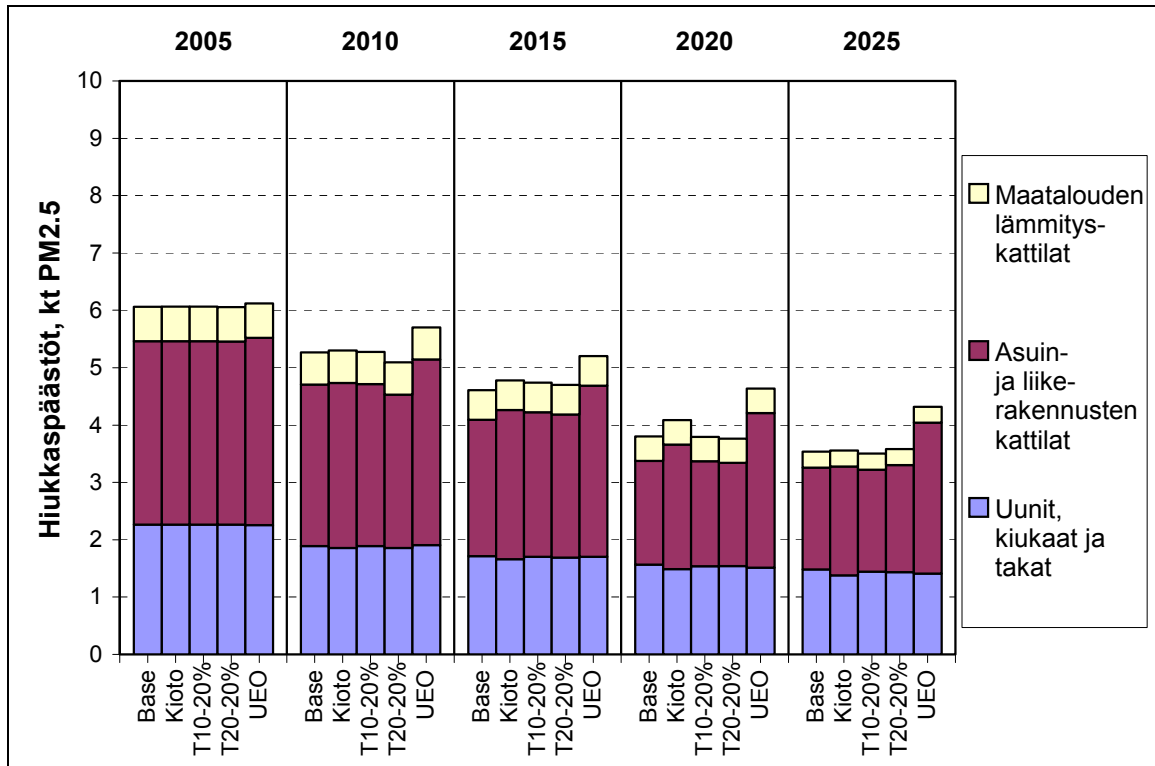


Kuva 6.8. Pienpolton hiukkaspäästöjen kokonaismäärä tarkastelluissa skenaarioissa.

Todellisuudessa kiinteistöjen lämmityskattiloista vain osa uusitaan laskentamallissa oletetussa tahdissa noin 20 vuoden välein, vaikka se olisi kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Päästöjen väheneminen saattaa siten tältä osin olla laskelmien tuloksia hitaampaa, ellei laitekannan uusiutumista tehosteta uusien säädöksiin. Lämmityksen pääenergiälähteiden markkinaosuuksissa ei skenaarioissa tapahdu järjestyttäviä muutoksia vuoteen 2020 mennessä. Selvimpiä muutoksia edustaa öljyn osuuden pieneneminen.

Puulämmitteisten saunojen käytön oletettiin skenaariossa kasvavan tasaisesti vajaan prosentin vuodessa. Takkojen käyttö omakotitalojen tukilämmitysmuotona puolestaan kasvaa eri skenaarioissa varsin runsaasti, 50–70 %. Toisaalta vanhoja uunilämmitysjärjestelmiä poistuu vuoteen 2020 mennessä skenaarioissa huomattava määrä, mikä kompensoi takkojen hyödyntämisen kasvua. Lisäksi uusien takkojen hiukkasten ominais-

päästöjen arvioitiin jäävän lähes pellettilämmityksen tasolle. Lämmityskattiloiden markkinoilla perinteisten pilkekattiloiden osuus vähenee tasaisesti, ja uusista kattiloista suuri osa on varustettu automaattisyyttöisillä stoker- tai pellettipolttimilla. Maatalouden puupohjaisia lämmityskattilavaihtoehtoja laskentamallissa oli vain yksi, jonka ominaispäästöjen kehitys arvioitiin lähinnä hakekattiloiden perusteella.



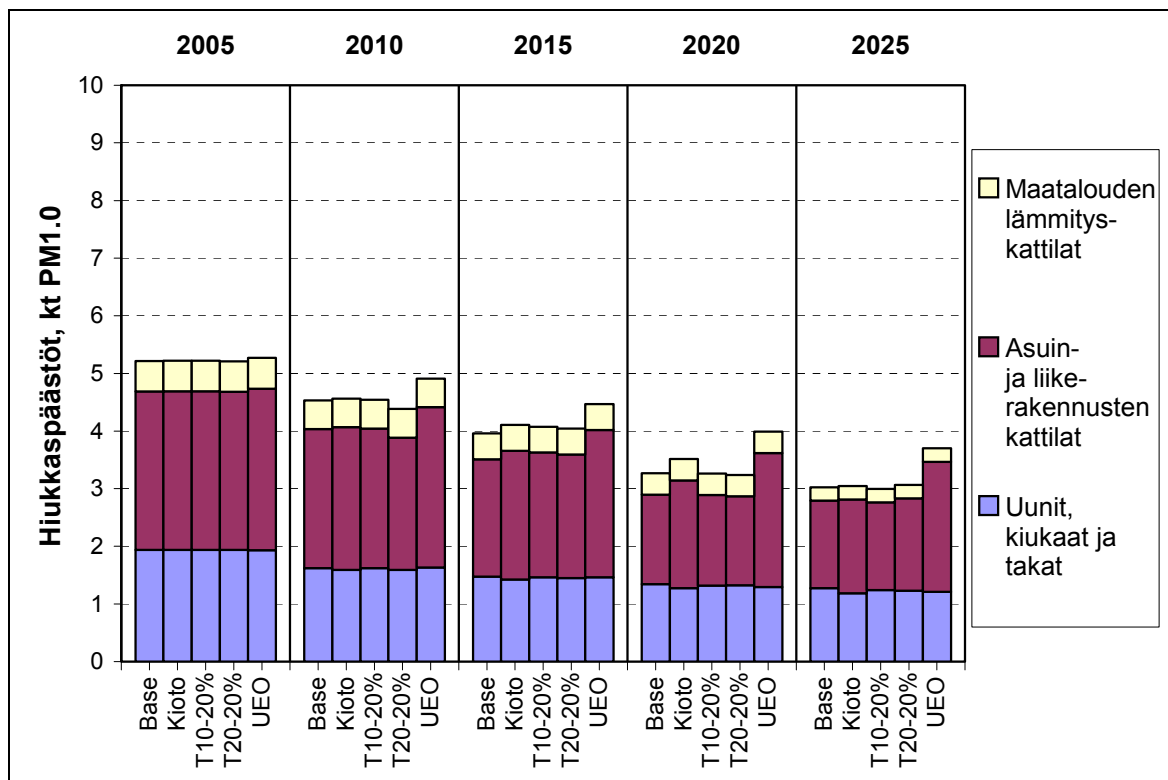
Kuva 6.9. Pienpolton PM_{2,5}-hiukkaspäästöjen määrä tarkastelluissa skenaarioissa.

Puupelleteillä olisi periaatteessa hyvin merkittävä potentiaali sekä puun pienpolton lisäämisessä että sen päästöjen vähentämisessä. Tulosten mukaan pellettilämmitys ei kuitenkaan näytä tulevan kovin kilpailukykyiseksi hakelämmityksen kanssa. Ainoastaan 20 €:n päästökauppaskenaariossa ja UEO-skenaariossa pellettien kotimainen kulutus alkaa tuntuvassa määrin kasvaa.

Uusiutuvan energian edistämishjelman tavoitteena on lisätä puun pienkäyttöä vuoteen 2025 mennessä noin 75 PJ:n tasolle. Kun vuonna 2003 pienkäytön määrä oli yhteensä 49 PJ, lisäys olisi tällöin yli 50 %. Koska rakennusten lämmityksen kokonaisenergiankäytön ei arvioida juuri kasvavan nykyisestä, merkitsisi tavoitteen saavuttaminen merkittävää puun osuuden lisäystä lämmitysenergiamarkkinoilla. Skenaariotulosten mukaan tavoitteen toteutuminen lisäisi pienpolton hiukkaspäästöjä noin 15 % vuonna 2020, kun vertailukohtana pidetään Kioto-skenaariota. Kaikissa energian tuotannon ja käytön sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöjen kokonaismäärässä pienpolton päästöjen kasvu näkyisi kuitenkin vain alle 5 %:n lisäyksenä. Pienhiukkastenkin osalta lisäys on vain

hieman suurempi. Puun pienpolton tuntuvakaan lisäys ei siten tulosten mukaan lisää kovin merkittävästi pienhiukkasten kokonaiskuormitusta. Paikallisesti sillä saattaa silti olla huomattava vaikutus ilman laatuun.

Terveysvaikutusten kannalta keskeisten PM_{2,5}- ja PM₁-hiukkaspäästöjen kehitys on pienpoltossa kaikkiaan varsin samanlainen kuin kokonaispäästöjen (kuvat 6.9 ja 6.10). Sekä PM_{2,5}- että PM₁-hiukkasten päästöt vähenevät vuoteen 2020 mennessä noin 40 % muissa paitsi UEO-skenaariossa. Koska pienpolton osuus on merkittävin nimenomaan pienhiukkasten päästöissä, tulokset osoittavat uusilla lämmityskattila- ja tulisijateknikoilla voitavan vaikuttaa merkittävästi puun pienpolton terveysvaikutuksiin. Laskelmien mahdollinen ylioptimismi nykyisen kannan päästöissä ei muuta tätä johtopäätöstä.

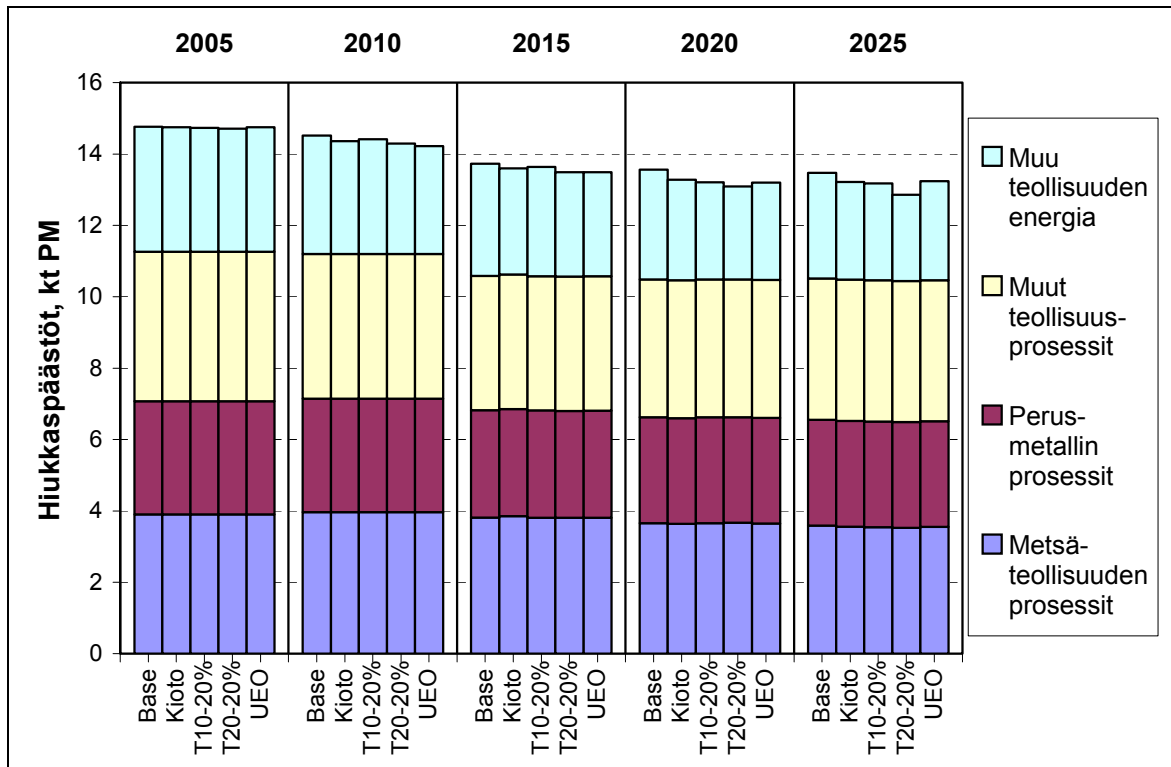


Kuva 6.10. Pienpolton PM₁-hiukkaspäästöjen määrä tarkastelluissa skenaarioissa.

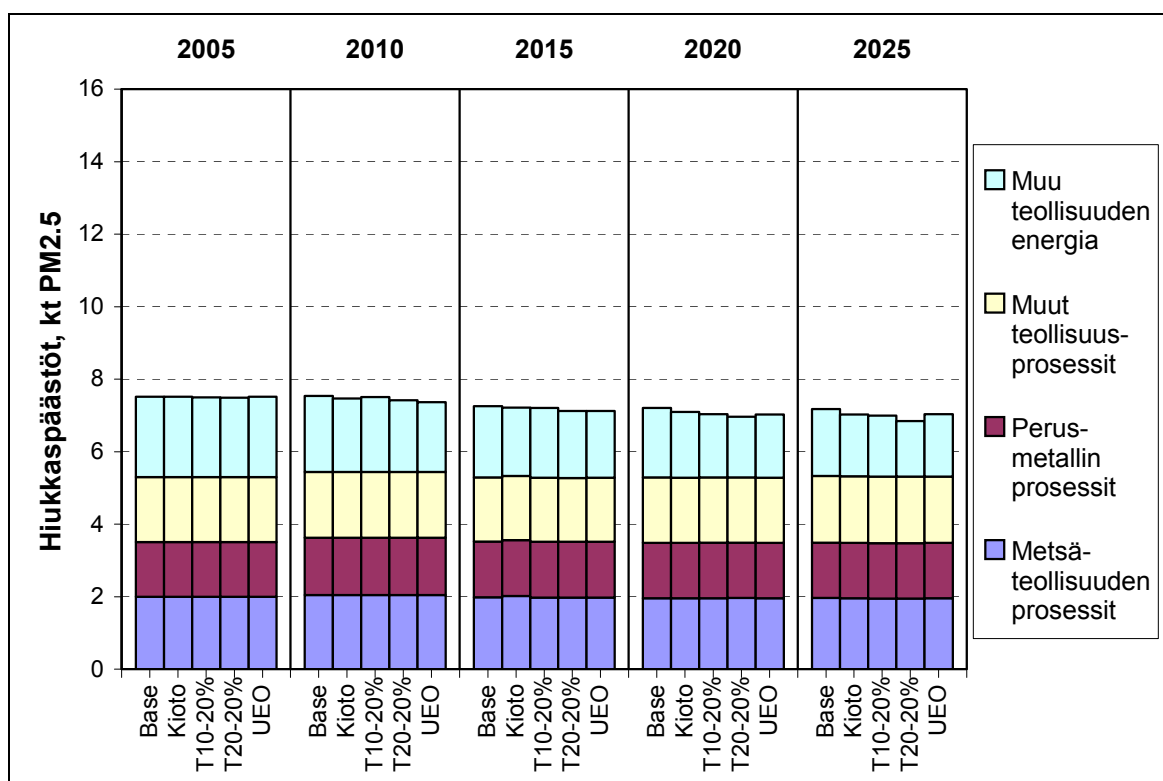
6.4 Teollisuuden hiukkaspäästöt

Kuten jo edellä on kuvattu, teollisuuden hiukkaspäästöistä suurin osa aiheutuu varsinaisista tuotantoprosesseista, mikäli metsäteollisuuden jäteliemikattilat luetaan Energiati-lastoinnin tapaan prosessien piiriin. Jos sen sijaan soodakattilat luetaan teollisuuden energiantuotannon piiriin, energiaperäiset päästöt käsittävät laskentamallin tulosten mukaan nykyisin noin puolet teollisuuden kokonaishiukkaspäästöistä.

Laskelmissa käytetyt varovaiset oletukset teollisuusprosessien ominaispäästöjen kehityksestä johtavat melko vähäisiin muutoksiin teollisuuden kokonaispäästöissä. Tulosten mukainen teollisuuden kokonaispäästöjen kehitys esitetään kuvassa 6.11. Vaikka esimerkiksi soodakattiloiden osalta uusien kattiloiden ominaispäästöjen oletettiin jäävän alle 8 mg/MJ:n tasolle vuoteen 2020 mennessä, laitospäästöjen uusiutumisen hitaus yhdessä tuotannon kasvun kanssa mitätöi suurimman osan ominaispäästöjen pienenemisen kautta saavutetuista metsäteollisuuden prosessipäästöjen vähennyksistä.



Kuva 6.11. Teollisuuden hiukkaspäästöjen kokonaismäärä tarkastelluissa skenaarioissa.



Kuva 6.12. Teollisuuden PM_{2,5}-hiukkaspäästöjen määrä tarkastelluissa skenaarioissa.

Prosessipäästöjen vähäisistä muutoksista huolimatta tuntuvia päästöjen vähennyksiä voidaan tulosten mukaan saavuttaa muussa teollisuuden energian käytössä, erityisesti kasvihuonekaasujen päästöjä vähennettäessä. Perusskenaariossa hiukkaspäästöjen vähennys on noin 12 % mutta 20 €:n päästökauppaskenaariossa noin 25 % vuoteen 2020 mennessä. Päästöjen väheneminen aiheutuu tehokkaampien puhdistuslaitteiden ohella maakaasun käytön laajenemisesta. Teollisuuden biopolttoaineiden käytön kokonaismäärässä ei ole skenaarioiden välillä kovin merkittävää eroa. Energian tuotantosektoreista kasvihuonekaasupäästöjen tuntuva rajoittaminen kuitenkin lisää merkittävimmin juuri teollisuuden oman sähkön ja lämmön tuotannon polttoainekulutusta, kun teollisuuden yhteistuotannon lisäyspotentiaali alkaa tulla laajassa mitassa kannattavaksi. Lisäyksestä tosin huomattava osa kohdistuu maakaasun käyttöön, josta ei aiheudu hiukkaspäästöjen lisäystä.

Pienhiukkasten osalta päästöjen jakauma muuttuu siten, että PM_{2,5}-hiukkasista energiaperäiset päästöt käsittävät jo selvästi yli puolet teollisuuden kokonaispäästöistä. Eriyisesti teollisuusprosessien pienhiukkaspäästöistä ei kuitenkaan ollut käytettävissä kovin luotettavia tietoja. Kuva 6.12 havainnollistaa kuitenkin tulosten mukaisten PM_{2,5}-hiukkasten kehitystä tarkastelluissa skenaarioissa.

Kuten kuvasta nähdään, teollisuustuotannon kasvu kompensoi lähes täysin teollisuusprosessien ominaispäästöissä oletetut vähennykset, jolloin kokonaispäästöjen muutokset jäävät varsin vähäisiksi. Teollisuuden energiantuotannossa voidaan tulosten mukaan silti saavuttaa tuntuva hiukkaspäästöjen vähennys.

6.5 Tulosten epävarmuudet

Edellä esitetyt tulevaisuuden pienhiukkaspäästömäärät on tulkittava melko optimistiseksi vähennyspotentiaaleiksi, koska sekä energiantuotannon infrastruktuurin että pienten tulisijojen uusiutumisenopeus voi olla oletettuakin hitaampaa ilman ohjaavia keinoja. Myös absoluuttiset päästötasot nykytilanteesta lähtien voivat olla aliarvioituja, koska pienhiukkasten päästöt erityisesti pienlähteistä tunnetaan edelleen melko huonosti. Lisäksi päästötasoon vaikuttaa erittäin paljon tulisijan tai kattilan käyttötapa. Pienpoltossa huono polttotapa tai huonolaatuinen polttoaine voi jopa kymmenkertaistaa päästöt.

Myös voimalaitoskokoluokan vuotuiset pienhiukkaspäästöt voivat olla aliarvioituja, koska päästökertoimien määrittäminen perustuu toistaiseksi hetkellisiin mittauksiin, jotka suoritetaan yleensä melko optimaalisissa ajotilanteissa. Toisaalta tätä vaikutusta kompensoi se, että esitetyt pienhiukkaspäästöosuudet on laskettu työssä suoritetusta kyselystä saaduista tietäntyyppisten laitosten ilmoittamista vuotuisista kokonaishiukkasmääristä käyttämällä samantyyppisen laitoksen hiukkaskokojakaumamittausta aina, kun sellainen on ollut saatavilla. Näin saatu PM_{2,5}/PM- tai PM₁/PM-suhde on siis yleistetty kaikille saman poltto-tekniikan, pääpolttoaineen ja hiukkaserotuslaitteen omaaville voimalaitoksille.

Kuitenkin puhdistuslaitteiden häiriötilanteet ja ohitukset voivat nostaa tässä esitettyjä pienhiukkaspäästötasoja selvästi korkeammalle. Näitä tilanteita sisältynee jonkin verran laitosten ilmoittamiin vuosipäästöihin, mutta niitä ei ole erikseen analysoitu ja otettu huomioon tässä työssä. Jatkuvatoimimisten mittausten tarve olisi suuri, jolloin myös laitosten käynnistysten, erotuslaitteiden ohitustilanteiden ja muiden häiriöiden sekä kattilan kuormitusvaihtelun vaikutukset pienhiukkaspäästöihin voitaisiin arvioida.

Skenaariotarkastelun lähtötietoina käytetyissä nykyisen kannan päästökertoimissa on siis verraten suuria epävarmuuksia. Erityisesti tämä koskee PM_{2,5}- ja PM₁-pienhiukkasten osuuksia hiukkasten kokonaispäästöistä. Päästölähteistä suurimmat epävarmuudet liittyvät erityisesti teollisuusprosessien pienhiukkaspäästöihin sekä pienpoltton nykyisen laitekannan ominaispäästöihin. Mikäli työssä arvioidut pienpoltton nykykannan ominaispäästöt ovat edes suunnilleen oikealla tasolla, hiukkaspäästöjen inventaareihin olisi syytä saada merkittävä korjaus pienpoltton osalta. Myös hiili- ja turvehuollon päästöihin liittyy suuria epävarmuuksia, mutta pienhiukkasten vähäisen osuuden vuoksi niiden kokonaismerkitys jää verraten pieneksi.

Päästöjen tulevan kehityksen osalta järjestelmämallin oletuksiin laituskannan uusiutumisesta liittyy huomattavia epävarmuuksia. Todellinen uusiutuminen saattaa monissa tapauksissa olla käytännössä oletettua kehitystä hitaampaa. Sama koskee olemassa olevan kannan päästökerrointen pienenemistä, mutta tämän epävarmuustekijän vaikutukset eivät huomattavasti vaikuta enää vuotta 2020 koskeviin tuloksiin. Lisäksi on muistettava, että teollisuusprosessien ominaispäästöjen tulevasta kehityksestä työssä ei ollut käytettävissä luotettavia arvioita. Teollisuuden päästöihin liittyy siten merkittäviä epävarmuuksia, mutta pääosin päästöjä alentavaan suuntaan.

Pienpolton tapauksessa myös pilkekattiloiden markkinaosuuden mahdollinen säilyminen odotettua suurempana on tuntuva epävarmuustekijä. Uusien lämmityskattiloiden ja tulisijojen päästökertoimiin liittyvien epävarmuuksien voidaan kuitenkin olettaa olevan vähäisempiä kuin vanhan kannan tapauksessa. Koska vanhan kannan epävarmuudet suuntautuvat pääosin ylöspäin, päästökertoimiin liittyvät epävarmuudet eivät siten oleellisesti vaikuta johtopäätöksiin pienpolton päästöjen vähennyspotentialin merkittävyydestä.

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä työssä koottiin uudet mittaus- ja tutkimustulokset Suomen polttoperäisistä primääri- eli suorista pienhiukkaspäästöistä ja niiden päästökertoimista (PM_{2,5} ja PM₁) ja eri vähennystekniikoiden vaikutukset pienhiukkaspäästöihin sekä arvioitiin karkeasti vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Tiedot liitettiin VTT:ssä käytössä olevaan IEA:n ETSAP-yhteistyössä kehitettyyn TIMES-energiajärjestelmämalliin, jolla voidaan arvioida päästöjen kustannustehokasta rajoittamista ja rajoittamisen vaikutuksia muihin ilmapäästöihin. Erityisesti keskityttiin kotimaisiin polttoaineisiin (puuhun, turpeeseen, jätteenpoltoon). Hankkeessa yhdistettiin tietämys pienhiukkasten päästöistä eri prosesseista (polttoaineet, polttotekniikat, rajoitustekniikat, laitoskokoiluokat, teollisuusprosessit jne.) energiajärjestelmämallinnukseen ja skenaariotarkasteluihin siitä, miten Suomen energia- ja teollisuusjärjestelmä tulee muuttumaan Kioton 1. velvoitekauden ja oletettujen myöhempien velvoitekausien rajoitusten alaisena. Työssä hyödynnettiin uusimpia kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaksi talvella 2005 tehtyjä VTT:n skenaarioita ja niiden lähtöoletuksia.

Vuonna 1997 neuvoteltu Kioton pöytäkirja astui voimaan 16.2.2005. Pöytäkirja asettaa rajoitusvelvoitteita kuudelle kasvihuonekaasu(ryhmä)lle: CO₂, CH₄, N₂O, HFC:t, PFC:t ja SF₆. Suomen tulee vähentää näiden päästöjen kokonaismäärä ekvivalenttisina hiilidioksiditonneina vuoden 1990 tasolle. Kioton pöytäkirjan toisen vaiheen (2013–) neuvottelut ovat käynnistymässä EU-tasolla (ns. kahden asteen tavoite). Todennäköistä on, että päästöjä tullaan edelleen rajoittamaan, sillä ilmakehän CO₂-pitoisuuden vakiinnuttamiseksi tietylle tasolle – esim. kaksinkertaiseksi esiteollisen ajan pitoisuuteen verrattuna – vaatii huomattavia päästövähennyksiä maailmanlaajuisesti. Lukujen 5 ja 6 skenaarioissa onkin oletettu kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamistasoksi vuonna 2020 -20 % vuoden 1990 tasosta.

Pienhiukkasten osalta lainsäädäntö on vasta kehittymässä. EU:n CAFE-ohjelmassa (Clean Air for Europe) on hahmoteltu tulevia pienhiukkaspitoisuuksien rajoituksia ja sallittuja tasoja. Ilmanlaadulle on olemassa vasta PM₁₀-raja-arvot, mutta pienhiukkasia (PM_{2,5}) mitataan jo varsin laajasti eurooppalaisissa kaupungeissa ja tausta-alueilla. Pienhiukkasten raja-arvojen säätämisessä ongelmana on se, ettei ole voitu todeta mitään erillistä kynnyсарvoa, jonka ylittyessä vasta ilmenisi terveysvaikutuksia, vaan vaikutukset alkavat näkyä heti, kun pitoisuudet kasvavat taustapitoisuudesta, mikä puolestaan vaihtelee alueellisesti paljonkin. CAFE-ohjelman työryhmä ehdottaa PM_{2,5}-raja-arvojen käyttöönottoa ilmanlaadun seurannassa (CAFE 2004).

Pienhiukkaspäästöjä ei lainsäädännöllä toistaiseksi erityisesti rajoiteta, vaan rajoitukset koskevat kokonaishiukkaspäästöjä. EU:n suurten polttolaitosten direktiivi (2001/80/EY) sekä jätteenpolttodirektiivi (2000/76/EY) aiheuttavat kuitenkin lähivuosina oleellisia

muutoksia polttolaitosten hiukkaspäästöjenkin tarkkailuun. Nämä direktiivit on pantu täytäntöön Suomen lainsäädännössä vastaavina asetuksina. LCP-asetus (large combustion plants) suurille voimalaitoksille (yli 50 MW_{pa}) rajaa kokonaishiukkaspäästöjä vuodesta 2008 lähtien seuraavasti (Vnp 1017/2002, LCP-asetuksen perustelumuistio):

- kiinteät polttoaineet 50 mg/m³n (n. 20 mg/MJ)
- öljy 50 mg/m³n (n. 15 mg/MJ)
- kaasut 5 mg/m³n (n. 2 mg/MJ).

Uusille laitoksille nämä raja-arvot ovat jo voimassa. Käytännössä näillä raja-arvoilla ei ainakaan Suomessa ole kovin suurta ohjaavaa vaikutusta hiukkaspäästöjen vähentämiseksi, koska jo nyt suurissa voimalaitoksissa toimitaan pääosin näiden rajojen tuntumassa tai alapuolella. Pienemmille kattiloille (5–10 MW) on voimassa kokonaishiukkaspäästöjen raja-arvo 60 mg/MJ.

Pienhiukkasten ominaispäästöt riippuvat voimakkaimmin käytetystä hiukkaserotuslaitteistosta. Käytetyllä polttoaineella tai -tekniikalla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Pienhiukkasten erottamiseksi savukaasusta letkusuodatin (kangassuodatin) on kaikkein tehokkain erotuslaite. Uusimpien mittausten perusteella voidaan jopa sanoa, ettei niistä juurikaan pääse pienhiukkasia läpi. Letkusuodattimen jälkeen PM1-pienhiukkasia on VTT:n toimesta mitattujen leijupetikattiloiden puhdistetuissa savukaasuissa ollut vain 1–10 % koko hiukkaspäästön massasta, kun sähkösuodattimen jälkeen PM1/PM-massaosuus on eri mittauksissa ollut n. 20–40 % ja REF-polttoainetta käytettäessä jopa 50 %. Hiukkasten ominaispäästöt kuitusuodattimen jälkeen ovat yleensä alle 5 mg/MJ, ja päästö muodostuu lähinnä suodatin- ja savukaasukanavistosta irtoavasta materiaalista tai suodattimen pinnalle agglomeroituneista suurhiukkasista, jotka irtoavat savukaasuun puhdistuspulssin aikana. Sekä sähkösuodattimella että letkusuodattimella saavutetaan Suomessa tehtyjen mittausten mukaan hiukkasten kokonaismassalle erotustehokkuus 98–99,9 % (ks. taulukko 3.1). Parhaiten aivan pienimpiä hiukkasia savukaasuvirrasta poistavat siis letkusuodattimet (myös < 1 µm), joiden erotustehokkuus myös pienhiukkasille on yli 99 % (Hokkinen ym. 2004). Sähkösuodattimilla halkaisijaltaan 0,1–1 µm:n pienhiukkasten erotustehokkuus on pienempi, 90:n ja 99 %:n välillä.

Työssä arvioitiin hiukkassuodatuslaitteiden erotusasteiden lisäksi niiden investointi- ja käyttökustannuksia sekä laskettiin karkeasti erotuskustannuskäyrät (€/t) kokonaishiukkaspäästötason funktiona. Valtaosa hiukkasten suodatuskustannuksista asettui välille 20–150 €/t (ks. kuva 3.4), mutta laskentaoletukset olivat melko karkeita, vaikka päästötiedot perustuivatkin todellisten voimalaitosten päästöihin.

Polttoperäisistä pienhiukkaspäästöistä tunnetaan tarkimmin energiantuotannon kattiloiden päästöt, mutta niissäkin on jonkin verran epävarmuutta, mikä johtuu mm. rajallisesta määrästä hiukkaspäästöjen kokojakaumamittauksia. Tätä julkista mittaustietoa on saatu

Tekesin FINE-ohjelman aikana merkittävästi lisää, mutta edelleenkin teollisuuden sekä puun pienpolton (erityisesti aidoissa käyttötilanteissa) pienhiukkaspäästöjä ei ole mitattu tarpeeksi. Erityisesti tarvittaisiin jatkuvatoimisia päästömittauksia – ei ainoastaan pienhiukkasista, vaan myös kasvihuonekaasuista – jotta nähtäisiin laitosten käynnistysten, erotuslaitteiden ohitustilanteiden ja muiden häiriöiden sekä kattilan kuormitusvaihtelun vaikutukset päästöjen määrään. Tällöin eri tilastoinneissa, päästökaupassa yms. käyttö-tarkoituksissa käytettävien päästökertoimien todentaminen olisi luotettavampaa.

Työssä lasketut PM_{2,5}-pienhiukkasten ominaispäästökertoimet eri energiantuotannon voimalaitostyypeissä on esitetty pääpolttoaineittain luvussa 4. Suurkattiloilla ja öljypoltossa ovat ominaispienhiukkaspäästöt (PM_{2,5}-päästökertoimet n. 0,5–20...50 mg/MJ) parhaimmillaan alle sadasosa 10–50 kW:n puukattiloiden ja tulisijojen päästömääristä (PM_{2,5}-päästökertoimet n. 50–600 mg/MJ). Kiinteistölämmitys- ja aluelämpökeskuskokoluokka (500 kW–5 MW) on edelleen huonosti tunnettu pienhiukkaspäästöjen osalta. Tämän hankkeen alkuvaiheiden tulosten perusteella ehdotettiin, että FINE-ohjelmassa tulisi vielä mitata ko. kokoluokan öljy- ja puukattiloita, ja ainakin yksi uusi mittaushanke käynnistyikin ohjelman viimeiselle vuodelle.

FINE-ohjelman PIPO-hankkeen mittaustulosten mukaan kaikissa panospolttolaitteissa (puun pienpoltto) ja niihin soveltuvissa laitteissa päästön vaihteellinen vaihtelu on erittäin suurta. Erikoisesti tämä koskee kylmänä käynnistettävää polttoa ja ensimmäistä panosta. Syttymisvaiheen päästöt muodostavat hiukkaspäästön tärkeimmän osan. Eräillä laitteilla saavutetaan hiukkasmassapäästöstä lähes 90 % jo viiden minuutin kuluttua polton alusta. Myöhemmillä panoksilla nopeimmasta päästökertymästä vastaavat hiilivedyt, eivät hiukkaset. Mikäli hiilivetyjä ei ehditä polttaa loppuun, on seurauksena nopeapäästön kasvu. Panoskoko ja tulisijan täyttöaste ovat ratkaisevia polton hyvälle etenemiselle ja päästön määrälle. Polttoaineen koostumus vaikuttaa hiukkaspäästöön puun kuoriosan ollessa tärkeä osatekijä. Puun pienpolton (<50 kW) keskiarvoiset hiukkasominaispäästöt ovat yleisesti alle 200 mg/MJ ja maksimiarvot noin 600 mg/MJ. Myös lähes kaikki ominaispäästöt vaihtelevat suuresti.

Työssä suoritetun kyselyn vastausten mukaisista hiukkasten kokonaispäästöistä arvioitiin pienhiukkasten ominaispäästökertoimet eri voimalaitostyypeille käyttäen saatavilla olevia pienhiukkasten kokojakaumamittauksia. Leijupetikattiloiden PM_{2,5}-ominaispäästökertoimet näyttäisivät olevan keskimäärin 3–25 mg/MJ, kun erotuslaitteena on sähkösuodatin, ja 1–5 mg/MJ, kun erotuslaitteena on letkusuodatin. Jos polttoainevalikoimassa on mukana myös yhdyskuntajätettä (REF), nousee pienhiukkasten osuus savukaasun hiukkasissa ja PM_{2,5}-pienhiukkaspäästökertoimet näyttäisivät nousevan noin 1–10 mg/MJ verrattuna saman pääpolttoaineen päästökertoimiin ilman REF-polttoainetta. Prosentuaalisesti tämä kasvu voi olla suurikin, mutta luotettavaa vertailua vaikeuttavat mm. eri kattiloiden yksilölliset polttoaineseossuhteet. Suurilla raskasöljykattiloilla

(5–300 MW) PM_{2,5}-pienhiukkasten ominaispäästö on noin 8–50 mg/MJ, kun käytössä ei ole savukaasun puhdistusta, ja noin 4–25 mg/MJ, kun käytetään multisyklonia hiukkasten erotukseen. Kevytöljypoltossa (pienkattiloissa) pienhiukkaspäästöt ovat vähäisiä, kun laboratorio-olosuhteissa mitattuna PM₁-pienhiukkasten ominaispäästö oli n. 1–2 mg/MJ.

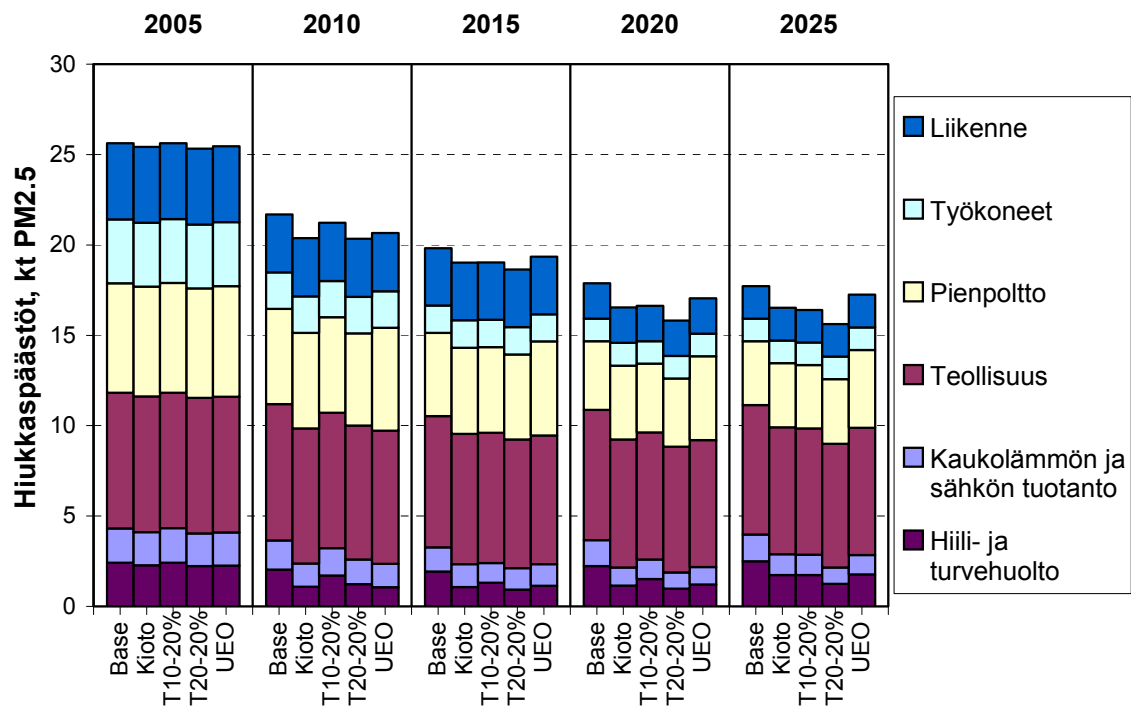
Myös teollisuusprosessien ja liikenteen päästökertoimia on arvioitu luvussa 4. Tästä työstä liikenne oli alun perin rajattu pois, mutta hiukkasmittauksia erilaisista ajoneuvoista on tehty viime aikoina melko paljon ja niiden tuloksia päivitettiin työssä käytettyyn energiajärjestelmämalliin. Näin ollen työssä on saatu arviot eri sektoreiden pienhiukkaspäästösuuksista, kuten luvun 6 kuvissa 6.6 (PM_{2,5}) ja 6.7 (PM₁) on esitetty. Teollisuuden osuus pienhiukkaspäästöistä voi tosin olla liian suurikin, koska varsinaisia mittaustuloksia ei juuri ollut käytettävissä, vaan teollisuusprosessien pienhiukkasosauudet on karkeasti arvioitu tilastoiduista kokonaishiukkaspäästöistä, joiden puolestaan arvioitiin vähenevän melko maltillisesti vuoteen 2020 mennessä. Käytetyillä oletuksilla tuotannon kasvu itse asiassa syö ominaispäästön alenemisesta saatavan hyödyn.

Suomen hiukkaspäästöjen kehityksen skenaariotarkastelussa käytettiin TIMES-energiajärjestelmämallia. Malli on luonteeltaan optimointiin perustuva ns. osittaistasapainomalli, jossa voidaan kuvata yksityiskohtaisesti suuri määrä erilaisia energiatekniikoita sekä energian tuotannon että kulutuksen sektoreilla. Järjestelmämallilla voidaan laskea skenaarioita siten, että yksityiskohtaisia tuloksia saadaan valituista tarkasteluvuosista, joiden välillä kehitys oletetaan lineaariseksi. Tässä työssä mallilaskelmissa laskentavuosiksi valittiin vuodet 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 ja 2030. Tuloksia käsitellään kuitenkin vain vuoteen 2025 saakka.

Tarkastellut skenaariot koostuvat perusskenaariosta (Base), Kioto-skenaariosta, päästökauppaskenaarioista (10 ja 20 €/t CO₂ hinnoin), pienpolton UEO-skenaariosta sekä jäte-direktiiviskenaariosta. Perusskenaariota lukuun ottamatta kaikissa skenaarioissa oletetaan Kioton pöytäkirjan ja EU:n taakanjaon mukainen kasvihuonekaasujen päästötavoite. Päästökauppaskenaarioissa oletetaan sen lisäksi, että vuoteen 2020 mennessä päästöjä on rajoitettava 20 %. Perusskenaario vastaa Suomen ilmasto- ja energiastrategian ns. "With measures" -skenaariota (WM), kun taas kukin kasvihuonekaasujen rajoitus-skenaario edustaa erästä "With additional measures" -skenaariota. Perusskenaariota voidaan siten pitää muiden skenaarioiden vertailukohtana arvioitaessa päästöjen vähentämisen vaikutuksia.

Pienpolton UEO-skenaariossa tarkastellaan kehitysvaihtoehtoa, jossa uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman tavoitteet puubiomassan pienkäytön lisäämisestä toteutetaan (KTM 2003). Koska pienpolto on merkittävä hiukkaspäästöjen lähde, skenaariol-la pyritään havainnollistamaan pienpolton muutosten vaikutuksia hiukkaspäästöihin.

Hiukkasten kokonaispäästöt vähenevät eri skenaarioissa vuoden 2002 tasosta 15–22 % vuoteen 2010 mennessä ja 26–38 % vuoteen 2020 mennessä, vaikka Suomen primäärienergian kokonaiskulutus nousee kaikissa skenaarioissa selvästi. PM_{2,5}-pienhiukkasten vastaavat vähennykset ovat 15–21 % vuoteen 2010 mennessä ja 30–38 % vuoteen 2020 mennessä (kuva 7.1). Kasvihuonekaasujen rajoittaminen nopeuttaa jonkin verran hiukkaspäästöjen vähenemistä. Bioenergian käytön lisäys kohdistuu pääasiassa lämpö- ja voimalaitoksiin, joissa puun polton hiukkaspäästöt eivät oletusten mukaan poikkea merkittävästi fossiilisten polttoaineiden tai turpeen päästöistä, kun käytössä on tehokkaat hiukkaserotuslaitteet, kuten sähkösuodatin ja kuitusuodatin.



Kuva 7.1. Yhteenveto energian tuotannon ja kulutuksen sekä teollisuusprosessien PM_{2,5}-hiukkaspäästöistä ja niiden vähennyspotentiaaleista tarkastelluissa skenaarioissa.

Teollisuus kattaa tulosten mukaan nykyisin noin 30 % PM_{2,5}-pienhiukkaspäästöistä. Kasvihuonekaasujen rajoitusskenaarioissa teollisuuden osuus pienhiukkaspäästöistä nousee vuoteen 2020 mennessä yli 40 %:iin. Osuuden nousu johtuu kuitenkin pitkälti siitä, että teollisuusprosessien ominaispäästöjen kehitys arvioitiin melko varovaisesti verrattuna muiden sektorien päästökemitykseen, mikä johtuu mm. teollisuusprosessien pienhiukkasmittausten vähyydestä. Kaukolämmön ja sähkön tuotannon PM_{2,5}-pienhiukkaspäästöt ovat tulosten mukaan yllättävänkin pienet. Laskelmien mukaan päästöt ovat nykyisin noin 2 kt, eli hieman alle 10 % kaikista energian tuotannon ja käytön sekä teollisuusprosessien hiukkaspäästöistä. Vuoteen 2020 mennessä energiantuo-

tannon päästöt vähenevät edelleen perusskenaariossakin 20 % ja rajoitusskenaarioissa 40–50 %. Sekä hiili- että turvelauhdevoiman tuotanto supistuu rajoitusskenaarioissa hyvin vähäiseksi vuodesta 2010 lähtien. Kaukolämpösektorilla bioenergian ja kierrätyspolttoaineiden käyttö lisääntyy tuntuvasti yhteistuotannossa, mutta laituskannan uusiutumisen ansiosta päästöjen määrä vähenee.

Suurimmat pienhiukkaspäästöjen vähennyspotentiaalit näyttäisivät olevan puun pienpoltoissa sekä liikenteessä. Pienpoltto on nykyisten virallisten inventaarien mukaan merkittävin energiaperäisten hiukkaspäästöjen lähde. Mallitarkastelun tulosten mukaan pienpolton päästöt ovat nykyisin kuitenkin vain alle puolet inventaarien mukaisista arvioista. Kun sekä Tilastokeskuksen julkaiseman inventaarin että CLRTAP-raportoinnin mukaan pienpolton kokonaispäästöt ovat olleet viime vuosina yli 20 kt, mallilaskelmissa käytettyjen päästökertoimien mukaan päästöt ovat nykyisin selvästi alle 10 kt. Työssä koottu tuore päästöjen mittaustieto antanee siten aihetta pienpolton hiukkaspäästöjen uudelleenarviointiin. Tosin laboratoriomittauksiin perustuvat päästökertoimet voivat todellisissa käyttöolosuhteissa ja erilaisilla käyttötavoilla helpostikin kaksinkertaistua. Tähän ongelmaan saataneen lisätietoa juuri alkaneessa PUPO-hankkeessa, jossa mitataan todellisia päästötilanteita kentällä.

Liikenteen jatkuvasti tiukentuneet ja yhä tiukentuvat päästörajoitukset ohjaavat pienhiukkaspäästöjen kehitystä. Dieselajoneuvoille tulossa olevat tiukentuvat EU-tason päästönormit johtaisivat täysimääräisesti toteutuessaan varsin nopeaan päästöjen pudotukseen. Laskelmissa oletettiin ominaispäästöjen pienenevän kuitenkin käytännössä hitaammin. Tieliikenteen ohella vastaavat päästönormit tulevat oletusten mukaan johtamaan myös työkoneiden hiukkaspäästöjen merkittävään vähenemiseen, tosin jonkin verran viivästetysti.

Hiilidioksidin päästökauppa ei sinänsä juuri vaikuta hiukkaspäästöihin, vaan ratkaisevaa on päästöoikeuksien hinta. Jos hinta jää alhaiseksi, päästöoikeuksia kannattaa ostaa Suomeen runsaasti, jolloin päästöjen kehitys on vuoteen 2015 saakka lähellä perusskenaarion kehitystä. Korkeammilla päästöoikeuksien hinnoilla hiukkaspäästöjen kehitys on lähempänä kotimaisiin toimiin perustuvaa rajoitusskenaariota (Kioto) ja jää Kioton periodin jälkeen jo sen alapuolelle. Uusiutuvien energialähteiden edistämishojelman mukaisessa UEO-skenaariossa puun pienpolton runsas lisääminen johtaa hiukkaspäästöjen vähenemisen hidastumiseen, mutta vaikutus päästöjen kokonaistaseeseen on silti melko pieni.

Pienhiukkaspäästöjen kehitys on varsin samansuuntainen kuin hiukkasten kokonaispäästöjen (kuvat 6.5 ja 6.6). Eri päästölähteiden pienhiukkasosuuksien erilaisuus johtaa kuitenkin tulosten mukaan siihen, että teollisuusprosessien merkitys korostuu kaikkein voimakkaimmin juuri pienhiukkaspäästöissä. Skenaariotarkastelussa korostuminen joh-

tuu kuitenkin osin teollisuusprosesseille oletetuista varsin varovaisista ominaispäästöjen kehitysarvioista. Tulosten mukaan pienpolton PM1-pienhiukkaspäästöt voivat vähentyä jopa alle 3 kt:n määrään vuonna 2020. Vaikka nykyisen laitekannan ominaispäästöt olisivatkin arvioitu liian alhaisiksi, tulokset osoittavat joka tapauksessa uusien pienpolttotekniikoiden merkittävän potentiaalin pienhiukkaspäästöjen vähenemisen kannalta.

Eniten tarvetta pienhiukkaspäästöjen selvittämiseksi näyttäisi jatkossa olevan teollisuusprosessien osalta (tässä työssä päästöt todennäköisesti yliarvioitu) sekä puun pienpolton osalta (tässä työssä päästöt ehkä aliarvioitu, kun verrataan tilastointiin). Näin ollen tässä työssä (luvuissa 6 ja 7) esitetyt eri sektorien osuudet pienhiukkaspäästöistä ovat vielä melko epävarmalla pohjalla, kunnes saadaan enemmän mittaustietoa sekä teollisuusprosessien pienhiukkaspäästöistä että pienpolton todellisista kenttämittauksista.

Lähdeluettelo

Alstom 2004. Jukka Vanninen, puhelinkeskustelu 23.12.2004 sekä esitelmä suodatin-koulutuspäiville.

Baumbach, G., Zuberbuhler, U., Siegle, V. & Hein, K. R. 1997. Luftverungreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomassa und Holzfeuerungen. Inst. für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Univ. Stuttgart, IVD-Bericht; Landsberg/Lech:ecomod.

CAFE 2004. Second Position Paper on Particulate Matter. CAFE Working Group on Particulate Matter, December 2004.

http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf

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

Energia Suomessa – Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 2004. Toim: Kara, M., Helynen, S., Mattila, L., Viinikainen, S. Ohlström, M. & Lahnalampi-Vesivalo, M. (VTT Prosessit). 3. täysin uudistettu painos. Edita, Helsinki. 396 s. ISBN 951-37-2745-9.

ETSAP 2000. The New TIMES: a Model for the Millennium. ETSAP news, Vol. 7, No. 1, s. 14, ECN Policy Studies, Petten, The Netherlands.

<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/news/etsap/etsap71.pdf>

EU 2000. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, 2000. Ehdotus neuvoston päätökseksi valtiosta toiseen tapahtuvasta ilman epäpuhtauksien kaukokulkeutumisesta. 2000/C 311 E/07.

Feldman, P. L. & Kumar, K. S. 1993. Utility particulate emissions of heavy metals. In: Proceedings of 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.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A. & Oinas, V. 2001. Global warming in the twenty first century: An alternative scenario. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), August 29, Vol. 97, No. 18, s. 9875–9880.

Hartmann, H., Launhardt, T. & Schmid, H. 1997a. Technische Möglichkeiten und umweltrelevante Auswirkungen der Kombination von Holz- und Gasfeuerungen kleinerer Leistung. Forschungsbericht, Nr. 1, Selbstverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Freising. 76 s.

Hartmann, H., Strehler, A., Madeker, U. & Maier, L. 1997b. Biogene Festbrennstoffe und deren Nutzung in Feuerungsanlagen bis 1 MW Nennleistung – Verfahrenstechniken, Marktbetrachtungen, Brennstoffhandel und Kosten. Studie für die Bayernwerk AG München, Selbstverlag Bayernwerk, München. 155 s.

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

Hokkinen, J., Jokiniemi, J., Aurela, M. & Hillamo, R. 2004. Energiantuotannon ja prosessiteollisuuden pienhiukkas- ja raskasmetallipäästöjen karakterisointi. Espoo: VTT Tiedotteita 2258. 39 s. + liitt. 18 s. ISBN 951-38-6492-8.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2258.pdf>

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

IIASA. Modelling Particulate Emissions in Europe. A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs. <http://www.iiasa.ac.at/rains/reports/ir-02-076.pdf>

Ion Blast 2005. <http://www.ionblast.com>. Viitattu 4.1.2005.

IPCC 2001. Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group 3 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jokiniemi, J. 2005. Suullinen asiantuntija-arvio kuitusuodattimien erotuskyvystä pienhiukkasille perustuen VTT:n viimeaikaisiin mittauksiin. Toukokuu 2005, Espoo.

Kaukanen, E., Pyykkönen, A. & Larnimaa, K. 1987. Raskaan polttoöljyn vesiemulsiopoltto Suomessa. Tutkimusraportti. Enconsults Oy, Kaarina. Åbo Akademis kopieringscentral. 68 s.

Kauppinen, E., Lind, T., Valmari, T., Ylätalo, S. & Jokiniemi, J. 1996. The structure of submicron ash from pulverized combustion of South African and Colombian coals. In: Applications of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers, Eds. Larry Baxter & Richard DeSollar. Engineering Foundation Conference, Waterville Valley, USA, 16–21 July 1995. S. 471–484.

KTM 2003. Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006. Työryhmän ehdotus. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, työryhmä- ja toimikuntaraportteja 5/2003. 58 s.

Kurkela, J., Latva-Somppi, J., Tapper, U., Kauppinen, E. & Jokiniemi, J. 1998. Fly ash particle formation in fluidized bed combustion of wood-based fuels. Abstracts of the 5th International Aerosol Conference. Edinburgh, GB, 14–18 Sept. 1998. *Journal of Aerosol Science*. Vol. 29, No. S1, s. 571–572.

Lammi, K., Lehtonen, E. & Timonen, T. 1993. Energiantuotannon hiukkaspäästöjen teknis-taloudelliset vähentämismahdollisuudet. Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto. Selvitys 120. Painatuskeskus Oy, Helsinki. 64 s.

Lappi, M. 2005. Suullinen ja kirjallinen asiantuntija-arvio liikenteen uusimmista pienhiukkaspäästömittauksista, Espoo 4.3.2005.

Launhardt, T. 1998. Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München. BayStMLU.

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 fluidized bed coal combustion. In: *25th International Symposium on Combustion Proceedings*, Irvine, California, 31 July – 5 August 1994. S. 201–209.

Linna, V. 2005. Multisyklonien erityispiirteitä. Henkilökohtainen keskustelu 24.3.2005 Tsupari – Veli Linna.

Lyyränen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. & Joutsensaari, J. 1998. Particle formation in medium speed diesel engines operating with heavy fuel oils. *International Aerosol Conference*. Edinburgh, Scotland, 12–18 Sept. 1998. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 29, No. S1, s. 1003–1004.

Maskuniitty, H. 1995. Arinapoltto. Teoksessa: *Poltto ja palaminen*, luku 15. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. S. 393–416.

Moisio, M. 1997. *Palamisaerosolien kokojakaumien mittaaminen sähköisellä alipaineimpaktorilla*. Lisensiaattityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere. 181 s.

Mäkelä, K., Laurikko, J. & Kanner, H. 2004. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2003 laskentajärjestelmä. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Tutkimusraportti RTE 2814/04.

Nordkalk 2004. Nordkalkin tilinpäätöstiedote vuodelta 2003.

http://www.nordkalk.fi/servlet/CollectionServlet?view=0&page_id=1867.

Ohlström, M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. Espoo: VTT Tiedotteita 1934. 114 s. + liitt. 33 s. ISBN 951-38-5403-5, 951-38-5404-3.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1934.pdf>

Ohlström, M. O., Lehtinen, K. E. J., Moisio, M. & Jokiniemi, J. K. 2000. Fine-particle emissions of energy production in Finland. Atmospheric Environment, Vol. 34, s. 3701–3711.

PIPO 2002–2005 ennakkotieto. Prof. Taisto Raunemaan kokoama taulukko pienpoltto-hankkeen ennakkotuloksista.

Pleym, H. ym. (useita kirjoittajia). 1989. MILJØSTUDIER. NKI Forlaget. Suomennos: Sundberg, Jaakko. Ympäristötekniikka. 1991. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 324 s.

Riionheimo, Y. 1978. Kivihiilikäyttöisten voimalain savukaasunpuhdistus. Puhallin 1978, Voimalaitostekniikka.

Sarofim, A. F., Howard, J. B. & Padia, A. S. 1977. Combustion Sci. Technol. 16, s. 187–204.

Schleicher, B. & Kauppinen, E. 1998. Performance optimization of an electrostatic precipitator for ultrafine exhaust particles. SIHTI 2 Review Report. 9 s.

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.

Struschka, M. 1998. Feuerstättenstruktur in Wohngebäuden und Wohnungen in den alten und neuen Bundesländern. Inst. für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Univ. Stuttgart, Abteilung der Luft; 40-1998.

SYKE 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka 5–50 MW laitoksille.

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=3708&lan=FI>

SYKE 2005. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Finland's Report on the Air Pollutants Inventory to the UNECE Secretariat. Year 2003 emissions. Helsinki: Finnish Environment Institute, 15th February 2005.

Syri, S. & Lehtilä, A. 2003. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin. Espoo: VTT Tiedotteita 2186. 69 s. ISBN 951-38-6139-2; 951-38-6140-6. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2186.pdf>

Tilastokeskus 2003. Energiatilastot 2002. Helsinki: Tilastokeskus, SVT Energia 2003:2.

Tilastokeskus 2004. Energiatilastot 2003. Helsinki: Tilastokeskus, SVT Energia 2004:2.

Tissari, J., Raunemaa, T. & Ålander, T. 1998. Puupolttoaineiden rakenne, koostumus, polttoon vaikuttavat ominaisuudet ja päästömittaukset. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja 1998.

Vnp 1017/2002. Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan vähintään 50 megawatin polttolaitosten ja kaasuturbiinien rikkidioksidi-, typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen rajoittamisesta (1017/2002) & 2001/80/EY Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen suurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisesta.

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.

Ympäristötietokeskus Moreenia, 2003. Puhtaan jätepuun energiasisällön talteenotto. <http://www.tampereenkaupunki.com/best>

Ålander, T. 2000. Palamishiukkasten orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen analyysi. Licensiaatin tutkielma. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja 2000.

Liite 1. Hiukkaskyselyn tiedonkeruulomake

Voimalaitos	Laitos A	Laitos B	Laitos C jne.
Polttotekniikka			
Polttoaineteho, MW			
- sähköteho, MW			
- lämpöteho, MW			
Polttoainekulutus, TJ/a			
Polttoainejakauma (keskimääräiset %-osuudet vuoden kokonaiskulutuksesta)			
Savukaasujen puhdistusjärjestelmä järjestyksessä			
Laitteiden erotusasteet hiukkasille ja lähde			
Puhdistuslaitetoimittajan antama takuarvo (mg/MJ)			
Kokonaishiukkaspäästöt (TSP)			
- t/a			
- mg/MJ			
Pienhiukkaspäästöt			
- PM10 (D<10 mikrometriä)			
- PM2,5 (D<2,5 mikrometriä)			
- PM1 (D<1 mikrometri)			
Muuta lisätietoa? esim. tulevat puhdistuslaitteinvest. puhd.järjestelmien käyttöaste tyypillinen polttoaineseos			

Tekijä(t) Ohlström, Mikael, Tsupari, Eemeli, Lehtilä, Antti & Raunemaa, Taisto			
Nimeke Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset			
Tiivistelmä <p>Julkaisuun on koottu uudet mittaus- ja tutkimustulokset Suomen polttoperäisistä primääripienhiukkasista ja niiden päästökertoimista (PM_{2,5} ja PM₁) sekä eri vähennystekniikoiden vaikutukset pienhiukkaspäästöihin ja niiden ominaisuuksiin ja arvioitu vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Tiedot on liitetty VTT:ssä käytössä olevaan IEA:n ETSAP-yhteistyössä kehitettyyn TIMES-energiajärjestelmämalliin, jolla voidaan arvioida päästöjen kustannustehokasta rajoittamista ja rajoittamisen vaikutuksia muihin ilmapäästöihin. Erityisesti keskityttiin kotimaisiin polttoaineisiin (puuhun, turpeeseen, jätteenpolttoon). Hankkeessa yhdistettiin tietämys pienhiukkasten päästöistä eri prosesseissa (polttoaineet, polttotekniikat, rajoitustekniikat, laitoskokuoluokat, teollisuusprosessit jne.) energiajärjestelmämallinnukseen ja skenaariotarkasteluihin siitä, miten Suomen energia- ja teollisuusjärjestelmä tulee muuttumaan Kioton 1. velvoitekauden ja oletettujen myöhempien velvoitekausien rajoitusten alaisena. Työssä hyödynnettiin uusimpia kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaksi talvella 2005 tehtyjä VTT:n skenaarioita ja niiden lähtöoletuksia.</p> <p>Suurkattiloilla ja öljypoltossa ovat PM_{2,5}-pienhiukkasten ominaispäästöt parhaimmillaan alle sadasosa 10–50 kW:n puukattiloiden ja tulisijojen päästömääristä (tasot n. 0,5–50 mg/MJ vs. 50–600 mg/MJ). Pienhiukkasten ominaispäästöt riippuvat voimakkaimmin käytetystä hiukkaserotuslaitteistosta. Käytetyllä polttoaineella tai -tekniikalla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Pienhiukkasten erottamiseksi savukaasusta letkusuodatin on kaikkein tehokkain erotuslaite. Tuoreiden mittausten perusteella voidaan sanoa, ettei niistä juuri pääse PM₁-pienhiukkasia läpi (massasta 1–10 %), vaan hiukkaspäästö muodostuu lähinnä suodattimesta tai savukaasukanavistosta irtoavista karkeista partikkeleista tai materiaalista. Työssä arvioitiin lisäksi erotuslaitteiden erotusasteita sekä investointi- ja käyttökustannuksia.</p> <p>PM_{2,5}-pienhiukkaspäästöt vähenevät eri skenaarioissa vuoden 2002 tasosta 15–21 % vuoteen 2010 mennessä ja 30–38 % vuoteen 2020 mennessä, vaikka Suomen primäärienergian kokonaiskulutus nousee kaikissa skenaarioissa selvästi. Kasvihuonekaasujen rajoittaminen nopeuttaa jonkin verran päästöjen vähenemistä. Bioenergian käytön lisäys kohdistuu pääasiassa lämpö- ja voimalaitoksiin, joissa puun polton hiukkaspäästöt eivät oletusten mukaan poikkea merkittävästi fossiilisten polttoaineiden tai turpeen päästöistä, kun käytössä on tehokkaat hiukkaserotuslaitteet, kuten sähkösuodatin ja kuitusuodatin.</p> <p>Hiilidioksidin päästökauppa vaikuttaa hiukkaspäästöihin epäsuorasti päästöoikeuksien hinnan kautta. Jos hinta jää alhaiseksi, päästöoikeuksia kannattaa ostaa Suomeen runsaasti, jolloin päästöjen kehitys on vuoteen 2015 saakka lähellä perusskenaarion kehitystä. Korkeammilla päästöoikeuksien hinnoilla hiukkaspäästöjen kehitys on lähempänä kotimaisiin toimiin perustuvaa rajoitusskenaariota (Kioto) ja jää Kioton 1. jakson jälkeen jo sen alapuolelle. Uusiutuvien energialähteiden edistämishojelman mukaisessa UEO-skenaariossa puun pienpolton runsas lisääminen johtaa hiukkaspäästöjen vähenemisen hidastumiseen, mutta tämän vaikutus päästöjen kokonaistaseeseen on melko pieni.</p>			
Avainsanat fine particle, particulate emissions, PM _{2.5} , PM ₁ , greenhouse gas emissions, energy production, industry, small-scale wood burning, scenarios, emissions reduction			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Biologinkuja 7, PL 1602, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6720-X (nid.) 951-38-6721-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero C3SU00675	
Julkaisu-aika Kesäkuu 2005	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 91 s. + liitt. 1 s.	Hinta B
Projektin nimi Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset		Toimeksiantaja(t) Tekes, Finergyn ympäristöpooli, VTT	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Author(s) Ohlström, Mikael, Tsupari, Eemeli, Lehtilä, Antti & Raunemaa, Taisto			
Title Fine particle emissions and their reduction potentials in Finland The effects of greenhouse gas emission reduction			
Abstract <p>In this study, new measuring and research results from combustion-based primary fine particles in Finland were gathered up in order to calculate the emission factors (PM_{2.5} and PM₁). Also the effects of particle separation devices on fine particle emissions, and some emission reduction costs were evaluated. The fine particle data modules were then added to VTT's national energy system model TIMES that has been developed under the IEA ETSAP co-operation. With TIMES model, cost-efficient emission reduction can be evaluated, and the simultaneous changes occurring in the emissions of other air pollutants can be observed. The focus has been especially on the nationally important fuels like wood, peat, and waste derived fuels in mixed fuel combustion. Knowledge of fine particle emissions from different processes has been combined to energy system modelling and to scenario studies on how the Finnish energy production and industrial system will be changing due to commitments of the first and assumed following Kyoto periods.</p> <p>In large-scale boilers the specific emissions of PM_{2.5} fine particles are even less than hundredth part of the emissions of small-scale (10–50 kW) boilers, i.e. 0.5–50 mg/MJ compared to 50–600 mg/MJ. The specific emissions of fine particles depend most of all on particle separation device(s) used. The used fuel or combustion technique does not have as great influence. The most effective separation device for fine particles is fabric filter. Recent measurements show that after fabric filter the share of PM₁ in flue gas is only 1–10 % of the total particle mass that is mainly composed of coarse particles/material released from filter or from exhaust gas duct. In addition, collecting efficiencies as well as investment and operating costs of particle separation devices were roughly calculated in this study.</p> <p>PM_{2.5} fine particle emissions are reduced 15–21 % from year 2002 to 2010, and 30–38 % till year 2020 in different scenarios calculated, despite the fact that primary energy consumption rises clearly in all the scenarios considered. Reducing greenhouse gas emissions speeds up fine particle emission reduction. Additional use of bioenergy will mainly take place in heat and power plants where fine particle emissions of burning wood don't diverge significantly from emissions from fossil fuels or peat because of efficient particle separation devices, as electrostatic precipitator and fabric filter, used.</p> <p>Emission trading of carbon dioxide has indirect impact on particle emissions through the price of emission allowances. If the price remains low, it's cheaper to buy plenty of emission allowances to Finland in which case the volume of energy production remains at high level and the amount of particle emissions till 2015 is closely-based to base scenario emissions. At the higher prices of CO₂ emission allowances, the progress of particle emissions is more like that in the Kyoto scenario basing on national actions to reduce greenhouse gases, and after the first Kyoto period remains already lower. In the Renewable Energy Sources (UEO) scenario, the great increase of small-scale wood burning leads to slower decrease of particle emissions, but the effect on the total emissions is still rather low.</p>			
Keywords fine particle, particulate emissions, PM _{2.5} , PM ₁ , greenhouse gas emissions, energy production, industry, small-scale wood burning, scenarios, emissions reduction			
Activity unit VTT Processes, Biologinkuja 7, P.O.Box 1602, FI-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6720-X (soft back ed.) 951-38-6721-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number C3SU00675	
Date June 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 91 p. + app. 1 p.	Price B
Name of project Fine particle emissions and their reduction potentials in Finland. The effects of greenhouse gas emission reduction		Commissioned by	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

Julkaisu esittelee VTT Prosesseissa tehdyn selvityksen, joka toteutettiin osana Tekesin Pienhiukkaset - Teknologia, ympäristö ja terveys -teknologiaohjelmaa (FINE). Työssä koottiin uudet mittaus- ja tutkimustulokset Suomen polttoperäisistä pienhiukkasista ja niiden ominaispäästökertoimista (PM_{2,5} ja PM₁) sekä eri vähennystekniikoiden vaikutukset pienhiukkaspäästöihin ja niiden ominaisuuksiin ja arvioitiin vähennystoimenpiteiden kustannuksia. Tiedot on liitetty VTT:ssä käytössä olevaan TIMES-energiajärjestelmämalliin, jolla voidaan arvioida päästöjen kustannustehokasta rajoittamista ja rajoittamisen vaikutuksia muihin ilmapäästöihin. Hankkeessa yhdistettiin tietämys pienhiukkasten päästöistä eri prosesseista energiajärjestelmämallinnukseen ja skenaariotarkasteluihin siitä, miten Suomen energia- ja teollisuusjärjestelmä tulee muuttumaan Kioton 1. velvoitekauden ja oletettujen myöhempien velvoitekausien rajoitusten alaisena vuoteen 2025 saakka. Työssä hyödynnettiin uusimpia kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaksi talvella 2005 tehtyjä VTT:n skenaarioita ja niiden lähtöoletuksia.

Tutkimuksella saatiin arvioita siitä, mitkä ilmastonmuutoksen hillinnässä käytettävät teknologiat samalla edistävät myös pienhiukkaspäästöjen vähentämistä ja mitkä teknologiat toisaalta saattavat aiheuttaa terveysriskin kohoamista lisääntyvinä pienhiukkaspäästöinä. Tämä tieto on tarpeellista eri kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinojen vaikutusten arvioinnissa, jotta voidaan ohjata puhtaiden teknologioiden käyttöönottoa kaikilta kannoilta kestäviin ratkaisuihin.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. 020 722 4404
Faksi 020 722 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. 020 722 4404
Fax 020 722 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4404
Fax + 358 20 722 4374
