

PIENPOLTON HIUKKASPÄÄSTÖT JA NIIDEN VÄHENTÄMINEN

Kati Nuutinen ja Tommi Karhunen

**Northern Solutions Oy
Vuorelankatu 14
70300 Kuopio**

18.5.2009

1 Pienpolton päästöihin liittyvä lainsäädäntö Euroopassa

1.1 Nykyiset biomassan poltolle asetetut päästörajat Saksassa

Saksassa voimassa olevat päästörajat pienille ja keskikokoisille lämmitysyksiköille säädöksen *Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV* mukaan on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Päästörajat biomassan poltolle (normeerattuna olosuhteisiin 0 °C, 1013 mbar) (Hartmann ym., 2008).

Polttoaine	Nimellisteho kW	Päästörajat	
		CO g/Nm ³	Kokonaispöly mg/Nm ³
Käsittelemättömän puu	<15	ei rajoituksia ^a	
	15–50	4	150
	50–150	2	150
	150–500	1	150
	500–<1000	0,5	150
Olki ym. vastaava peltobiomassa	15–100	4	150

^a Paitsi rajoitus savukaasun värille, jonka tulee olla tiettyä harmaan sävyä vaaleampi.

1.2. Ehdotetut päästörajat Saksassa

Saksassa ollaan valmistelemassa uusia päästörajoja pienille panospolttolaitteille sekä keskuslämmityskattiloille. Lain voimaantulon ajankohdasta ei ole tiedossa, mutta asiantuntija-arvion mukaan kansalliset lainsäätäjät käsittelevät esityksen vuoden 2009 aikana (Hartmann, 2009). Luonnoksessa esitetyt uudet päästörajat ovat taulukoissa 2 ja 3.

Taulukko 2. Pienten lämmityslaitteiden tyyppitestien päästörajat ja vähimmäisvaatimus hyötysuhteelle (reduointi happipitoisuuteen 13 %) lakiluonnoksen mukaan (Hartmann ym., 2008 ja BImSchV- luonnos).

Tulisijatyyppi (tyyppiä koskevia standardeja)	Vaihe 1: lain voimaantulon jälkeen asennetut tulisijat			Vaihe 2: 31.12.2014 jälkeen asennetut tulisijat	
	Minimi hyötysuhde %	CO g/m ³	Kokonaispöly g/m ³	CO g/m ³	Kokonaispöly g/m ³
Kamiina, matala tulipesä (EN 13240, DIN 18891)	73	2,0	0,10	1,25	0,04
Kamiina, jatkuva polttoaineen syöttö (EN 13240, DIN 18890)	70	2,5	0,10	1,25	0,04
Varaavat tulisijat (EN 15250/A1, DIN 18840)	75	2,0	0,10	1,25	0,04
Takkasydämet (EN 13229, DIN 18895)	75	2,0	0,10	1,25	0,04
Kaakeliuunit, matala tulipesä (EN 13229/A1, DIN 18892)	80	2,0	0,10	1,25	0,04
Kaakeliuunit, jatkuva polttoaineen syöttö (EN 13229/A1, DIN 18892)	80	2,5	0,10	1,25	0,04
Liedet (EN 12815, DIN 18880)	70	3,0	0,10	1,5	0,04
Keskuslämmitysliedet (EN 12815, DIN 18882)	75	3,5	0,10	1,5	0,04
Pellettitakat ilman vesivaippaa (EN 14785, DIN 18894)	85	0,40	0,05	0,25	0,03
Pellettitakat vesivaipalla (EN 14785, DIN 18894)	90	0,40	0,03	0,25	0,02

Taulukko 3. Keskuslämmityskattiloiden tyyppitestien päästörajat (reduointi happipitoisuuteen 13 %) lakiluonnoksen mukaan (Hartmann, 2008).

	Polttoaine (§3.1 mukaan)	Nimellisteho kW	Kokonaispöly g/Nm ³	CO g/Nm ³
Vaihe 1: lain voimaantulon jälkeen asennetut laitteet	No. 1-3a (hiili, turve)	4-500	0,09	1,0
		>500	0,09	0,5
	No. 4-5 ja 8 (puu, olki, muu kasviperäinen)	4-500	0,10	1,0
		>500	0,10	0,5
	No. 5a (puupelletit)	4-500	0,06	0,8
		>500	0,06	0,5
	No. 6-7 (kyllästeitä sisältämätön puusepän- teollisuuden jäte)	50-100	0,10	0,8
		100-500	0,10	0,5
		>500	0,10	0,3
Vaihe 2: 31.12.2014 jälkeen asennetut	No. 1-5a ja 8 (ks. yllä)	≥4	0,02	0,4
	No. 6-7(ks. yllä)	4-500	0,02	0,4
		>500	0,02	0,3

1.3 Päästörajat Sveitsissä

Uusien, teholtaan ≤350 kW, kiinteää polttoainetta käyttävien polttolaitteiden on täytettävä taulukossa 4 esitetyt päästövaatimukset (oltava todistus, 'konformitätsnachweis'). Muut kuin sarjatuotantoiset polttolaitteet on varustettava päästöjen puhdistuslaitteella.

Nykyisestä pitoisuudesta 150 mg/m³ automaattisten, teholtaan >70 kW:n polttolaitteiden hiukkaspäästöraja kiristyy arvoon 30 mg/m³ vuonna 2015, ja teholtaan >350 kW:n jo vuonna 2011 (reduointi happipitoisuuteen 13 %) (Jansen, 2006).

Taulukko 4. Sveitsin päästövaatimukset uusille, teholtaan ≤350 kW kiinteän polttoaineen polttolaitteille (reduointi happipitoisuuteen 13 %) (Jansen, 2006).

Polttolaite (standardit)	1.1.2008		1.1.2011
	CO mg/m ³	Kokonaispöly mg/m ³	Kokonaispöly mg/m ³
Klapikattila (EN 303-5, EN 12809)	800	60	50
Autom. kattila (EN 303-5, EN 12809)	400	90	60
Pellettikattila (EN 303-5, EN 12809)	300	60	40
Kamiina (EN 13240)	1500	100	60
Pellettitakka (EN 13240, EN 14785)	500	50	40
Liesi (EN 12815)	3000	100	90
Takkasydämet ym. (EN 13229)	1500	100	60

1.4 Päästörajat muualla Euroopassa

Taulukossa 5 on esitetty eurooppalaisen lainsäädännön ja standardien mukaisia päästörajoja pienpolttolaitteille Hulkkosen ja Rautasen (2006) mukaan.

Taulukko 5. Eurooppalaisen lainsäädännön ja standardien mukaisia päästörajoja pienpolttolaitteille (Hulkkonen ja Rautanen, 2006).

	CO		NO _x		OGC		Pöly			Hyötysuhde	
	til-%	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/kg _{pa}	%
Tulisijat, <50kW											
Lainsäädäntö											
Itävalta, automaat.	0,059	736	500	221	150	59	40	88	60	1,01	
Itävalta, käsisyöt.	0,13	1620	1100	221	150	118	80	88	60	1,01	
Saksa, München	0,12	1500	1018					150	102	1,72	
Saksa	0,32	4000	2716					150	102	1,72	
Hollanti	0,4	5000	3395								
Ruotsi						250	170				
EU standardit											
EN 12815/A1	1	12500	8487								60
EN 13240/A2	1	12500	8487								50
EN 13229/A2	1	12500	8487								30
EN 12809/A1	1	12500	8487								
Ehdotus											
Ruotsi, pelletti	0,04	500	339			100	68				70
Ruotsi, klapi	0,3	3750	2546			250	170				60
prEN 14785, täysi teho	0,04	500	339								75
prEN 14785, osateho	0,06	750	509								70
prEN 15250	0,3	3750	2546								70

		CO		NO _x		OGC		Pöly			Hyötysuhde
	til-%	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/m ³	mg/MJ	mg/kg _{pa}	%
Kattilat											
Lainsäädäntö											
Hollanti								110	54	0,92	
Itävalta, automaat.	0,081	1013	500	304	150	81	40	121	60	1,01	68,3+7,7logQ
Itävalta, käsisyöt.	0,178	2228	1100	304	150	162	80	121	60	1,01	65,3+7,7logQ
Saksa	0,44	5500	2715					206	102	1,72	
Ruotsi, >50kW	0,055	688	340					481	237	4,01	
Ruotsi, <50kW						150	74				
EU standardi, EN 303-5											
Automaat., 150-300kW	0,096	1200	592			80	39	150	74	1,25	67+6logP
Automaat., 50-150kW	0,2	2500	1234			80	39	150	74	1,25	67+6logP
Automaat., <50kW	0,24	3000	1481			100	49	150	74	1,25	67+6logP
Käsisyöt., 150-300kW	0,096	1200	592			100	49	150	74	1,25	67+6logP
Käsisyöt., 50-150kW	0,2	2500	1234			100	49	150	74	1,25	67+6logP
Käsisyöt., <50kW	0,4	5000	2468			150	74	150	74	1,25	67+6logP
Ehdotus											
EN 15270, luokka 1, <70kW	0,08	1000	494			75	37	68	34	0,6	
EN 15270, luokka 4, <70kW	1,2	15000	7405			1750	864	200	99	1,7	
Ruotsi, automaat. , <50kW						100	49				
Ruotsi, käsisyöt., <50kW						150	74				

Näiden lisäksi vapaaehtoisissa standardeissa on tiukempia raja-arvoja,

tulisijoille:

- CO: 0,008 til-%, 100 mg/m³, 68 mg/MJ (Saksa)
- NO_x: 107 mg/m³, 73 mg/MJ (Ruotsi)
- OGC: 5 mg/m³, 3,4 mg/MJ (Saksa)
- Pöly: 29 mg/m³, 20 mg/MJ, 0,33 mg/kg puuta (Itävalta)
- Hyötysuhde: 90 % (Saksa)

kattiloille:

- CO: 0,011 til-%, 138 mg/m³, 68 mg/MJ (Saksa)
- NO_x: 202 mg/m³, 100 mg/MJ (Itävalta)
- OGC: 7 mg/m³, 3,5 mg/MJ (Saksa)
- Pöly: 40 mg/m³, 20 mg/MJ, 0,33 mg/kg puuta (Itävalta)
- Hyötysuhde: 90 % (Itävalta)

1.5 Suomalainen lainsäädäntö

Suomessa puun pienpolttolaitteille ei ole toistaiseksi hiukkaspäästörajoja. Valmisteilla oleva luonnos *D8: Puupolttoaineita käyttävien lämmityslaitteiden päästöt ja hyötysuhteet* rajoittaa CO- ja OGC-pitoisuuksia sekä asettaa vaatimuksen minimihyötysuhteelle (Taul. 6 ja 7).

Taulukko 6. Vaatimukset lämmityskattiloille D8-luonnoksen mukaan (reduointi happipitoisuuteen 10 %) (Ympäristöministeriö, 2006).

	Pääasiallisen lämmitysjärjestelmä			Toissijainen lämmitysjärjestelmä		
	CO	OGC	Minimi- hyötysuhde	CO	OGC	Minimi- hyötysuhde
	mg/m ³ _n	mg/m ³ _n	%	mg/m ³ _n	mg/m ³ _n	%
Lämmityskattilat						
P ≤ 50 kW	3000	100	67+6logP	5000	150	67+6logP
50 kW < P ≤ 150 kW	2500	80	67+6logP	2500	100	67+6logP
150 kW < P	1200	80	67+6logP	1200	100	67+6logP

Taulukko 7. Vaatimukset tulisijoille ja kiukaille D8-luonnoksen mukaan (reduointi happipitoisuuteen 13 %)(Ympäristöministeriö, 2006).

	Pääasiallinen lämmitysjärjestelmä		Toissijainen lämmitysjärjestelmä	
	CO	Minimihyötysuhde	CO	Minimihyötysuhde
	%	%	%	%
Tulisijat				
P ≤ 50 kW	0,17	70	0,3	70
Kiukaat				
P ≤ 50 kW	0,5	55		

1.6 Yhteenveto päästörajoista

Pienpolton hiukkaspäästöille on rajoituksia useissa Euroopan maissa. Suomessa rajoja on kaavailtu vasta lähinnä häkäpäästöille ja kattiloiden osalta kaasumaisen orgaanisen hiilen päästöille (OGC), sekä hyötysuhteelle. Saksassa kaavaillaan selvää päästörajojen kiristämistä vuoteen 2014 mennessä, jolloin kattiloiden kokonaispölyn päästöraja pienenesi pitoisuudesta 150 mg/m³ pitoisuuteen 20 mg/m³; useimmille panospolttolaitetyypeille uusi raja-arvo tulee olemaan 40 mg/m³.

2 Pienpolttolaitteiden päästöt ja niiden vähentäminen

2.1 Suomalaisen puunpienpolttolaitteiden päästöt

2.1.1 Päästökertoimia

Suomessa on tuntematon määrä monentyypisiä pienpolttolaitteita. Tunnetusti polttolaitteen lisäksi suuri vaikutus päästöihin on polttoaineella ja laitteen käyttötavalla. Taulukossa 8 on esitetty lähinnä Kuopion yliopistossa ja Jyväskylän VTT:llä mitattuja polttolaitteiden päästöjä Tissarin (2008) mukaan. Päästöt on ilmoitettu polttoainekiloa kohti; päästö polttoaineen sisältämää MJ:a kohden saadaan jakamalla luvut polttoaineen kuivalla, tehollisella lämpöarvolla [MJ/kg], joka on tyypillisesti noin 19 MJ/kg (Alakangas, 2000). Pitoisuuksiksi päästöjä ei voi suoralta kädeltä muuttaa, sillä laskennassa tarvitaan mm. ilmakerrointa, joka vaihtelee eri polttolaitteilla. Taulukossa polttolaitteet on ryhmitelty tyypeittäin. Joistain laitetypistä, kuten kevyistä metallikamiinoista ja avotakoista, päästötietoja on hyvin vähän, joten ne on jätetty tarkastelusta pois. Oletettavasti yleisimmät polttolaitetyypit on kuitenkin katettu taulukossa.

Varaava polttolaite yleensä tarkoittaa rakenteeltaan massiivista tiili-, vuolukivi - tai keraamista laitetta, joka varaa lämpöä rakenteeseensa. Kyseessä voi olla niin takka kuin leivinuunikin. Moderneilla varaavilla polttolaitteilla tarkoitetaan tulisijoja, joissa ilman syöttö on jaettu primääri - ja sekundääri-ilmaan, joista sekundääri-ilma syötetään palotilan ylempiin osiin. Perinteisillä varaavilla polttolaitteilla tarkoitetaan laitteita, joissa usein on rakoarina, ja lähes kaikki ilma tulee tulipesään arinan läpi mahdollista luukun suojailmaa lukuun ottamatta, tai kiviarinaisen laitteen tapauksessa, kaikki paloilma tulee tulipesään luukun reikien kautta.

Tuloksista voidaan havaita, että jatkuvapolttoisten laitteiden eli lähinnä kattiloiden päästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin panospolttolaitteilla. Modernien panospolttolaitteiden päästöt ovat pienemmät kuin perinteisten, ja kaikista suurimmat päästöt ovat saunan kiukailla.

Taulukossa 9 on esitetty osittain samoja tuloksia kuin taulukossa 8 yksikössä mg/MJ_{polttoaine}, lisäksi taulukko sisältää vertailun aluekokoluokan lämpölaitoksen ja kevytöljypolttimen päästöihin. Modernien varaavien polttolaitteiden PM₁-päästöt voivat olla luokkaa 30 mg/MJ, kun taas perinteisten päästöt voivat olla 100 mg/MJ.

Taulukko 8. Suomalaisten puun pienpolttolaitteiden aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 1 µm:n kokoisten hiukkasten (PM₁), hään (CO) ja orgaanisen kaasumaisen hiilen (OGC) päästöjä (Tissari, 2008).

Polttolaitetyyppi (polttoaine)	PM ₁ g/kg _{pa}	CO g/kg _{pa}	OGC gC/kg _{pa}
Pellettipolttimet ja kattilat	0,18 ^a ; 0,28 ^b	0,4 ^a ; 0,55 ^b	
Pelletti- ja stokeripolttimet, (peltobiomassat)	0,3–0,5 ^b	1,5–1,6 ^b	
Pellettitakat		2,5 ^h	
Stokeripolttimet, (puupelletit)	0,19 ^c ; 0,22 ^a	3,7 ^a ; 7,6 ^c	
Stokeripolttimet, (puuhake)	0,24–0,35 ^{a,c,d}	6,0–8,8 ^a ; 26 ^c	
Klapikattilat	1,0 ^e	22 ^e	5,5 ^e
Moderni varaavat polttolaitteet	0,3–0,5 ^c ; 0,7 ^{f,g}	14 ^f ; 15–16 ^c ; 28 ^g	0,4 ^f
Perinteiset varaavat polttolaitteet	0,6–1,6 ^g 0,7 ^f ; 0,7–0,8 ^d ; 1,9 ^d ; 2,5–3,3 ^d	15–16 ^d ; 22 ^f ; 29–56 ^d 29–68 ^g ; 42 ⁱ ; 67–74 ^d ;	1,1–1,2 ^d ; 1,9–6 ^g ; 2,2 ⁱ ; 2,7 ^f ; 4,6–6,2 ^d
Liesi	0,5–1,2 ^c ; 0,9 ^g	25–47 ^c ; 35 ^g	2,3 ^g
Kiuas	2,7 ^g ; 2,9 ^d ; 5,0 ^f	55 ^f ; 65–137 ^d ; 120 ^g	10 ^f ; 13 ^g

^aTissari ym., 2004b ^bTissari ym., 2008b ^cTissari ym., 2005a ^dTissari ym., 2007b (useiden eri mittausjaksojen tuloksia) ^eTissari ym., 2005b ^fTissari ym., 2009. ^gTissari ym., 2007a ^hSippula ym., 2007 ⁱTissari ym., 2008a

Taulukko 9. Suomalaisten polttolaitteiden kokonaispölypäästö (TSP), aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 1 µm:n kokoisten hiukkasten massapäästö (PM₁), hiukkaslukumäärä (N ELPI) ja hään (CO) ja orgaanisen kaasumaisen hiilen (OGC) päästöt (Hytönen ym., 2008).

	TSP	PM1	N (ELPI)	CO	OGC	Poltto- laitteita	Ref.
	mg/MJ	mg/MJ	×10 ¹³ #/MJ	mg/MJ	mgC/MJ		
Kiukaat	130–260	130–160	5,2–9,4	3100–7900	590–720	7	a & b
Varaavat takat, leivinuunit, liedet ym.	100–150	30–100	4–21	1200–3500	100–310	17	a & b
Kattilat +polttimet <500 kW, puupelletti/hake	13–90	8–25	0,69–3	85–1400	1–35	9	a & b
Aluelämpökattila, 10 MW*	11	3	0,043	20		2	a
Kevytöljypoltin	2	2	0,011	35		2	a

*Multisykloni ja sähkösuodatin

^aTissari ym., 2005a ^bTissari ym., 2007b

2.1.2 Hiukkaslukumääräjakaumia

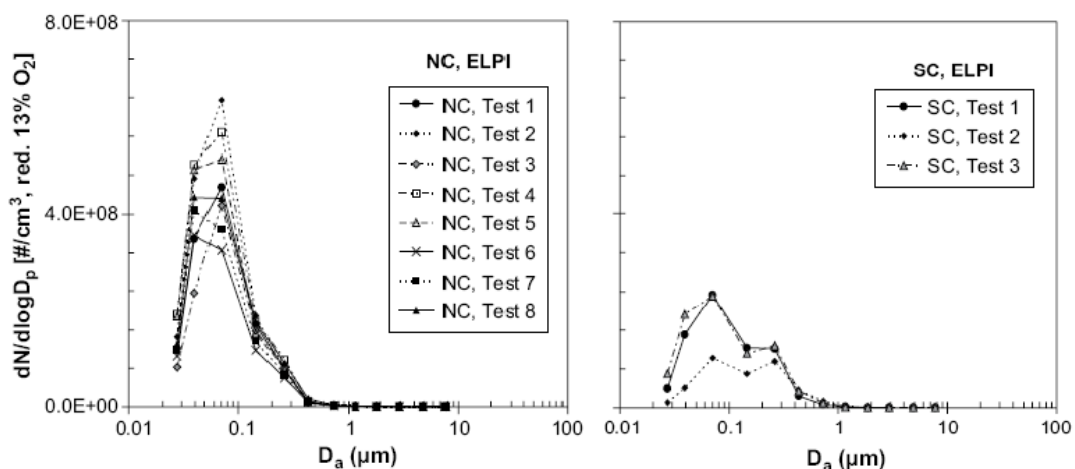
Palamisessa syntyvien hiukkasten koostumus ja syntyprosessit vaihtelevat; hiukkasissa on nokea, hiilivetyjä ja tuhkaa, ja niitä syntyy eri reaktioissa palamisessa ja savukaasun jäähtyessä. Hiukkasten kokoon vaikuttavat monet asiat, mm. epätäydellisessä palamisessa syntyvät hiilivedyt voivat kondensoitua hiukkasten pinnalle, jolloin hiukkaset kasvavat. Korkea lämpötila voi aiheuttaa tuhkakomponenttien höyrystymistä, jotka tiivistyvät pieniksi nanohiukkasiksi. Hiukkaslukumääräpitoisuus on myös suure joka muuttuu ajan myötä; hiukkaset törmäilevät ja takertuvat toisiinsa muodostaen suurempia hiukkasia.

Pienpolttolaitteiden hiukaspäästön lukumääräkokojakaumia on esitetty mm. teoksessa Tissari, 2008. Pienpolton hiukkaslukumääräjakaumissa valtaosa hiukkasista on alle mikrometrin kokoisia, ja jakauman huippu on yleensä välillä 0,04–0,20 μm . Jatkuvassa poltossa jakauma pysyy melko vakiona, sen sijaan panospoltossa jakaumat eri palamisolosuhteissa ja -vaiheissa vaihtelevat suuresti. Hiukkaslukumääräkokojakaumat ovat leveimpiä syttymisvaiheessa, jolloin myös hiukkaskoko on suurin (Tissari, 2008).

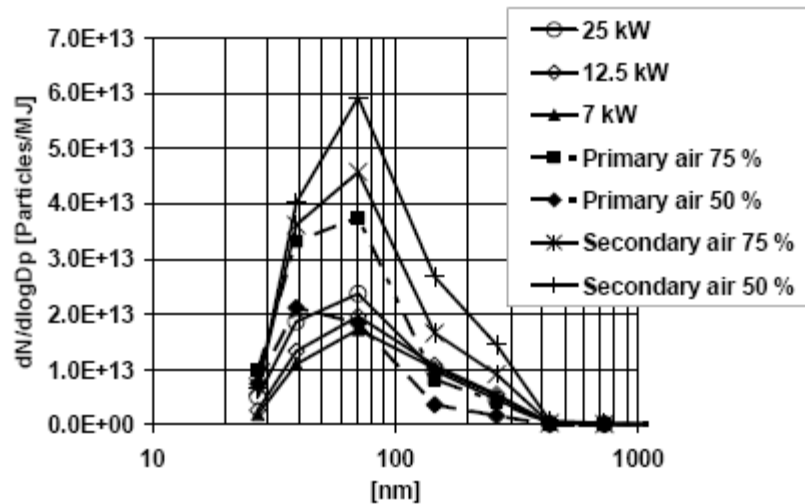
Tissari ym. (2009) havaitsivat suurimpien hetkellisten hiukkaskokojen syntyvän perinteisellä takalla ja kiukaalla polttoaineen rajun kaasuuntumisen aikana. Koko polton ajalla havaittiin hiukkasten aerodynaamisen halkaisijan geometrisen keskikoon (GMD) olevan modernilla takalla hieman pienempi kuin perinteisellä takalla (0,13 μm ja 0,15 μm), kiukaalla koko oli pienin (0,11 μm), sillä huolimatta epätäydellisimmästä palamisesta, jossa syntyy suuria hiukkasia, myös nanohiukkasten tuotto oli suurta (Tissari ym. 2009).

Tissari ym. (2008a) tutkivat perinteisellä takalla toteutettua ”hyvää” ja ”huonoa” palamista (palamista huononnettiin suurella panoskoolla, pienellä klapikoolla ja palamisilmaa rajoittamalla). Hiukkaslukumääräpitoisuus oli suurempi hyvässä poltossa, sen sijaan GMD oli hyvässä poltossa pienempi, 0,065 μm , ja huonossa 0,160 μm . Suurempi hiukkaskoko huonossa palamisessa johtui hiukkasten pinnalle tiivistyneistä hiilivedyistä. Hiukkaslukumääräkokojakaumat on esitetty kuvassa 1 (Tissari ym., 2008a).

Pellettikattilan (25 kW) päästön hiukkaslukumääräkokojakauma on esitetty kuvassa 2 (Lamberg ym., 2008).



Kuva 1. Keskimääräiset hiukkaslukumääräkokojakaumat perinteisellä takalla tehdyssä ”hyvässä” (NC) ja ”huonossa” poltossa (SC) (mittalaite: ELPI, Dekati Oy) (Tissari ym., 2008a).



Kuva 2. Pellettikattilan (25 kW) päästön hiukkaslukumääräjakauma eri käyttöasetuksilla (mittalaite: ELPI, Dekati Oy) (Lamberg ym., 2008).

2.2 Kehitteillä olevat hiukkaspäästöpuhdistuslaitteet pienpoltoon

2.2.1 Hiukkassuodatustekniikan tila Euroopassa

Savukaasujen pienhiukkaspäästöjen suodatukseen on useita teknisiä ratkaisuja, joita on sovellettu vaihtelevalla menestyksellä teollisuuslaitoksissa. Taulukko 10 listaa näiden tekniikoiden soveltuvuutta pienpolton hiukkaspäästöjen suodatukseen.

Taulukko 10. Hiukkassuodatustekniikat ja niiden sopivuus pienpolttosovelluksiin.

Laite	Hiukkaskoko (µm)	Suodatusteho kokonaispölylle (%)	Hyvät puolet	Huonot puolet
Kuitusuodatin	0.01 ... 100	99 ... 99.99	keräystehokkuus, yksinkertaisuus, ei korroosio ongelmia	huoltotiheys, huono kuumuuden ja kosteuden kesto, kipinöistä aiheutuva palovaara, suodatustehon riippuvuus virtausnopeudesta
Sähkösuodatin	0.01 ... 100	99 ... 99.99	keräystehokkuus, hyvä kuumuuden ja kosteuden kesto, pieni painevastus, suhteellisen matalat käyttökustannukset	korkeat investointikustannukset, suodatustehon riippuvuus hiukkaspitoisuudesta, suuri koko, korkean jännitteen ongelmat, huomaamaton tehokkuuden lasku

Laite	Hiukkaskoko (μm)	Suodatusteho kokonaispölylle (%)	Hyvät puolet	Huonot puolet
Hiukkaspesuri	0.5 ... 100	90 ... 99.9	suodattaa sekä hiukkasia että kaasuja, pieni huollon tarve, hyvä kuumuuden ja kosteuden kesto, neutraloi korroosiota aiheuttavia yhdisteitä	korroosio-ongelmat, jäteveden käsittely, suuri painevastus, huono keräysteho pienimmille hiukkasille, jäätymisriski
Sykloni	1 ... 100	50 ... 99	yksinkertaisuus, pieni huollon tarve, edullisuus, vakaa painevastus ja tehokkuus, pieni koko	huono keräysteho pienimmille hiukkasille, tukkeutumisriski, mahdollisesti äänekäs
Lämmönvaihdin	0.005 ... 0.05	25–95	hukkalämmön talteenotto, itsepuhdistuva	tehokkuuden riippuvuus palokaasun lämpötilasta ja kosteudesta, vasta kehitteillä
Katalysaattori	ei tietoa	ei tietoa	vähentää häkää ja orgaanisia yhdisteitä savukaasussa, vähentää orgaanisia hiukkasia, kaupallisia ratkaisuja tarjolla	suuri painevastus, ei tietoa hiukkasten suodatus- tehokkuudesta, uusittava n. 10000 tunnin käytön jälkeen

Eniten pienpolton hiukkaspäästöjä syntyy kokoluokassa 0.01–0.1 μm . Näin ollen syklonit ja hiukkaspesurit soveltuvat huonosti pienpolton päästöjen vähennykseen. Kuitusuodatin olisi keräystehonsa ja yksinkertaisuutensa puolesta hyvä ratkaisu, mutta sen huono kuumuuden kesto ja kipinöiden aiheuttama palovaara ovat ongelmallisia. Katalysaattorit ovat jo arkipäivää, mutta niiden suuresta painevastuksesta ja lyhyestä käyttöiästä johtuva huono käytettävyyys on rajoittanut niiden yleistymistä.

Siispä tällä hetkellä eniten kiinnostusta herättävät sähkösuodattimet ja lämmönvaihtimet. Kummankin tekniikan kohdalla panospolton palokaasujen lämpötilan, kosteuden ja hiukkaspitoisuuden vaihtelut aiheuttavat kuitenkin optimoinnille ongelmia.

2.2.2 Kaupallinen tarjonta

Kuitusuodatin. Kaupallisia laitteistoja on tarjolla ainoastaan teolliseen mittakaavaan. Löytyi viitteitä siitä, että kehitystyö etenee myös pienpolttoon soveltuvien suodattimien kohdalla (Oscar Winkel, Saksa, suodatusteho: 95–99 %).

Sähkösuodatin. Useita laitteita pienpolton hiukkassuodatukseen on kehitteillä. Prototyyppejä ovat kehittäneet ainakin:

- Applied Plasma Physics, Norja (APP Residential Electrostatic Precipitator, hinta-arvio: alle € 1000, suodatusteho: 90–95 %)
- Swiss Federal Institute of Material Sciences and Technology, Sveitsi (Miniature Particle Absorber, hinta-arvio: € 1000–1500, suodatusteho: yli 50 %)
- Jyväskylän yliopisto, Suomi (MiniDust-projekti, hinta-arvio: alle 10 % polttolaitteen hinnasta, suodatusteho: n. 85 %)
- Spanner RE², Saksa (Spanner Feinstaub Filter, hinta-arvio: € 1000–1500, suodatusteho: 80–95 %)
- Rüegg Cheminée, Sveitsi (Zumik® on Particle Separator, hinta-arvio: n. € 1300, suodatusteho: 20–60 %)
- OekoSolve, Liechtenstein (OekoTube Elektrostatischer Filter, hinta-arvio: n. € 1400, suodatusteho: 85–95 %)
- Spartherm Feuerungstechnik, Saksa (Airbox, hinta-arvio: n. € 1500, suodatusteho: yli 60 %)

Hiukkaspesuri. Tekniikkaa on käytössä teollisen mittakaavan polttolaitteissa. Pienpolttoon soveltuvaa laitteistoa tarjoaa ainakin Schröder Abgastechnik, Saksa (suodatusteho: n. 50 %). Lisäksi Fachhochschule Gelsenkirchen, Saksa, kehittää sähkö-hiukkaspesuria (electrostatic scrubber) joka kykenisi suodattamaan tehokkaasti myös alle 1 µm:n hiukkasia.

Sykloni. Kaupallisia ratkaisuja löytyi ainoastaan teollisenmittakaavan polttolaitteille.

Lämmönvaihdin. Pienpolttoon suunnattua lämmönvaihdintekniikkaa kehittää ainakin:

- Kuopion yliopisto, Suomi (suodatusteho: 25–40 %)
- Technical University of Munich, Germany (suodatusteho: n. 40 %)
- SGL Carbon, Germany (suodatusteho: alle 40 %)

Katalysaattori. Pienpolttolaitteisiin integroituja katalysaattoreita on käytössä erityisesti Pohjois-Amerikassa. Näitä ns. "catalytic combustion" -laitteita tarjoavat useat valmistajat, esim:

- Sierra Fireplace, California, USA
- Lennox International, Texas, USA
- Energy King, Wisconsin, USA

Liittyen pienpolttoon soveltuviin hiukkaspäästöjen puhdistuslaitteisiin on valmisteilla eurooppalainen ERA-NET-projekti, jossa selvitetään, mitä on alan eurooppalainen state-of-the-art, sekä mm. testataan eri valmistajien tuotteiden hiukkaserotustehokkuutta. Kuopion yliopistossa tutkitaan katalysaattorin tehokkuutta kiukaan hiukkaspäästöjen vähentämisessä. Toisen katalysaattorin kaasumaisten päästöjen puhdistustehokkuutta pienpolttossa on tutkittu Jyväskylän VTT:lla.

2.3. Pienpolton päästöjen vähentäminen prosessiin liittyvin keinoin

2.3.1 Polttotekniset keinot

Polttotekniset päästönvähennyskeinot voivat liittyä esimerkiksi ilman jakoon, tulipesän muotoiluun, arinaratkaisuihin tai automaattiseen säätelyyn.

Ilmanjaolla palamista pyritään vaiheistamaan siten, että ensimmäisessä vaiheessa polttoaine kaasutetaan, ja toisessa vaiheessa kaasut poltetaan. Tämä toteutetaan jakamalla ilma primääri- ja sekundääri-ilmaan, joista ensimmäinen syötetään polttoainevyöhykkeeseen esimerkiksi arinan läpi, mutta rajoitettusti, jolloin lämpötila ei pääse liikaa pienenemään. Sekundääri-ilma syötetään palamisvyöhykkeelle polttoainekerroksen yläpuolelle, jolloin syntyneet kaasut hapettuvat.

Sekä jatkuvatoimisilla että panospolttolaitteilla on saatu hyviä tuloksia päästöjen vähennyksestä ilman jaon avulla. Esimerkiksi pellettikattilalla (25kW), jossa on primääri- ja sekundääri-ilman syöttö, ilmanjaon hienosäädöllä, esimerkiksi primääri-ilmaa pienentämällä, on mahdollista vähentää hiukkaspäästöjä kymmeniä prosentteja (Lamberg, 2008).

Tulipesän muotoilulla ja arinaratkaisuilla voidaan optimoida esimerkiksi ilman syöttöä ja sen sekoittumista polttoaineen tai siitä kaasuuntuneiden komponenttien kanssa. Arinaratkaisuilla voidaan pyrkiä esimerkiksi tuhkan tehokkaaseen puhdistumiseen arinalta, tai hiilloksen tehokkaaseen loppuun palamiseen.

Ilmanjakoon sekä tulipesän ja arinan muotoiluun liittyen on valmisteilla eurooppalainen ERA-NET-tutkimusprojekti. Projektissa tutkitaan mm. mahdollisuutta vähentää hiukkaspäästöjä kattiloissa ja panospolttolaitteissa vaiheistetun palamisen ja ilman jaon avulla. Tyypillisesti myös polttolaitteiden valmistajien tuotekehitysprojektit ovat liittyneet näihin asioihin viime vuosina.

Automaattisen säätelyn soveltamista pienpolton päästöjen vähentämiseen on tutkittu mm. Oulun yliopistossa. Sitä voidaan hyödyntää mm. tasaisten palamisolosuhteiden ylläpidossa (jäännöshappipitoisuus, teho), mikä johtaa pienempiin päästöihin. Säätelyn käyttö edellyttää soveltuvien parametrien mittaamista prosessista (esim. polttoainepedin tai palamisvyöhykkeen lämpötila). Soveltaminen jatkuvaan polttoon onnistuu suhteellisen hyvin. Automaattisella säätelyllä on saatu panospolton CO-päästöä pienennettyä tyypillisesti 15–40 % polttolaitteesta ja säätelytekniikasta riippuen (Ruusunen, 2007). Ilmeisesti tietoa vaikutuksista hiukkaspäästöön ei toistaiseksi ole saatavilla. Automaattisen säätelyn käytön esteenä voivat olla mm. sensoreiden kalleus, luotettavan mittaustekniikan puute ja sopivien säätelymenetelmien löytäminen muuttuviin palamisolosuhteisiin.

2.3.2 Käyttötavan optimointi

Käyttötappaa voidaan optimoida esimerkiksi käytetyn panoskoon, klapikoon tai sytytystavan suhteen. Käyttötavalla on olennainen vaikutus polttolaitteen päästöihin, mutta siihen on vaikea vaikuttaa muuten kuin polttolaitteen mukana tulevilla käyttöohjeilla tai -opastuksella, tai yleisellä tiedotuksella. Tiedossa ei ole meneillään olevia tutkimushankkeita asian tiimoilta,

mutta jonkin verran tutkimusta on tehty esimerkiksi kattiloilla Ruotsissa (Johansson ym., 2004) ja panospolttolaitteilla Kuopion yliopistossa (Tissari ym., 2009).

Liian suuri panoskoko johtaa hapen ja polttoaineen riittämättömään sekoittumiseen ja suuriin epätäydellisen palamisen päästöihin, liian pieni klapi koko aiheuttaa järeää klapia rajumman kaasuuntumisen suuren pinta-alansa vuoksi, jolloin kaikkea kaasuuntuvaa ainesta ei saada poltetuksi loppuun asti. Tissarin ym. (2009) tutkimuksessa panoskoon kaksinkertaistaminen varaavalla takalla johti lähes kaksinkertaiseen hiukkaspäästöihin (PM₁), ja pienten klapien polttaminen järeämpiin verrattuna johti lähes viisinkertaiseen hiukkasmassapäästöön.

2.3.3 Polttoaineen optimointi

Polttoaineen päästöihin vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. kosteus ja tuhkapitoisuus sekä tuhkan koostumus. Tuhkapitoisuus ja sen koostumus ovat erityisen merkityksellisiä, kun on kysymys esimerkiksi peltobiomassojen käyttämisestä pellettien raaka-aineena.

Polttoaineen tuhkakomponentit jäävät pohjatuhkaan tai höyrystyvät ja tiivistyvät savukaasussa hiukkasten pinnalle yhdisteiden ominaisuuksista riippuen. Tuhkan vapautumista savukaasuun on mahdollista kontrolloida esimerkiksi lisäämällä polttoaineeseen, kuten pelletteihin, tiettyjä lisäaineita. Esimerkiksi tiedetään, että polttoaineen suuri klooripitoisuus lisää joidenkin metallien vapautumista savukaasuun, ja siten lentotuhkapäästö suurenee. Rikin läsnä ollessa metalleista kuitenkin muodostuu sulfaatteja, joiden höyrönpaine on alhaisempi. Myös silikaattien ja alumiinin kanssa reagoiminen estää alkalimetallien vapautumisen. Seospoltolla on voitu pienentää palamisen päästöjä suuren mittakaavan laitoksissa, ja varmasti myös valikoidussa pienpoltossa optimoiduilla polttoaineseoksilla päästöjä voitaisiin pienentää (Sippula, 2007). Mm. turpeesta ja puusta valmistettujen pellettien poltosta on mitattu pieniä PM₁-päästöjä (alle 100 mg/kg_{polttainetta}) (Sippula ym., 2008).

Valmisteilla olevassa eurooppalaisessa ERA-NET-tutkimusprojektissa on tarkoitus tutkia seospolttoa päästöjen vähennyskeinona uusien biomassojen poltossa. Polttoaineiden valmistajat ovat puolestaan tutkineet erilaisten biomassojen sopivuutta mm. pellettien raaka-aineiksi. Aiheen tiimoilta on käynnissä useita suomalaisia ja eurooppalaisia projekteja (esim. PELLETime-projekti, Northern Periphery Programme).

Nanokokoisien lisäaineiden hyödyntämismahdollisuuksia biomassan ja jätteiden polttoprosesseissa tutkitaan juuri alkaneessa Tekes-hankkeessa, jossa on mukana mm. Kuopion yliopisto (NanoPoltto-projekti).

2.4 Yhteenveto pienpolton päästöistä ja tavoista pienentää niitä

Karkeasti ottaen tyypillinen PM₁-pitoisuus kiukaalle keskiarvona koko polton ajalle olisi useita satoja mg/m³, perinteiselle varaavalle takalle noin 100 mg/m³ ja modernille varaavalle takalle joitain kymmeniä mg/m³.

Pienpolton päästöjen puhdistuslaitteisiin liittyen kehitystyötä on menossa Euroopassa liittyen useampaankin tekniikkaan. Nykykäsityksen mukaan parhaiten pienpolton tarpeisiin skaalautuvia menetelmiä lienevät sähkösuodattimet, lämmönvaihtimet ja katalysaattorit. Kaupallisiksi tuotteiksi asti kehitettyjä laitteita on melko vähän, prototyyppiasteella on

moniakin lupaavia sovelluksia. Löydettyjen tietojen perusteella sähkösuodatinten prototyypeillä on päästy tyypillisesti 60–80 %:n suodatustehokkuuksiin, lämmönvaihtimilla noin 40 %:n tehokkuuksiin.

Tutkimustyötä on menossa liittyen pienpolton päästöjen vähentämiseen polttoteknisin ratkaisuin; ilman vaiheistettu jako on näistä ehkä suurimman kiinnostuksen kohteena, myös polttolaittevalmistajien puolelta. Ilmanjaolla ja sen hienosäädöllä päästään useiden kymmenien prosenttien vähennykseen pienhiukkaspäästöissä. Myös säätötekniikan avulla päästöjä on saatu pienennettyä.

Käyttötapoihin liittyen erinäiset yhdistykset ja muut toimijat jakavat tietoa puun poltosta ja hyvistä polttotavoista. Aihe on myös esillä mediassa.

Erialaisten uusien biomassojen käyttö polttoaineina on laajan kiinnostuksen kohteena EU:ssa johtuen tavoitteista lisätä bioenergian käyttöä. Etenkin näissä sovelluksissa seospoltto voi pienentää päästöjä merkittävästi.

3 Suodatustarpeen arviointi

Viime vuosina puun pienpolton päästöjä on tutkittu monissa tutkimushankkeissa niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa. Päästötietojen vertailua vaikeuttaa se, että pienpolton päästömittaukselle ei ole toistaiseksi määritetty standardimenetelmää, vaan eri maissa ja jopa eri tutkimuslaitoksissa käytetään hyvin erilaisia menetelmiä. Tyypillistä pienpolton päästöille on kondensoituvien hiilivetyjen suuri määrä, mistä johtuen laimentavaa näytteenottoa käyttämällä saadaan mitattua etenkin hyvin epätäydellisestä palamisesta merkittävästi suurempi massapäästö kuin kuumen kaasun näytteenotolla, jossa tiivistyvät yhdisteet jäävät hiukkasnäytteestä pois.

Raportissa esitetty, lähinnä Kuopion yliopiston mittauksiin perustuva, päästötieto on suurimmaksi osaksi mitattu käyttäen laimentavia menetelmiä. Sen sijaan esimerkiksi saksalaisen lainsäädännön raja-arvot perustuvat kuumen kaasun näytteenottoon. Tästä huolimatta voidaan sanoa, että verrattuna saksalaisiin päästörajoihin panospolttolaitteiden osalta, tällä hetkellä voimassa oleva 150 mg/m^3 alittunee osalla perinteisistäkin suomalaisista laitteista. Seuraava raja-arvo 100 mg/m^3 karsii jo monet perinteisistä laitteista, mutta arvatenkin modernit laitteet, joissa palamisilma on vaiheistettu, läpäisevät raja-arvon. Tiukin kaavailtu raja-arvo, 40 mg/m^3 , on vielä mahdollista saavuttaa parhailla polttoteknisillä keinoilla, mutta perinteisellä tekniikalla ei ilman jälkipuhdistusta. Monilla kiukailla minkään näistä raja-arvoista saavuttaminen edellyttää merkittäviä muutoksia tai puhdistimen käyttöä.

Kattiloilla tilanne on samankaltainen kuin panospolttolaitteilla, asteittainen tiukentaminen karsii osan laitteista ja polttoaineista, tiukimpaan raja-arvoon tarvittaisiin jo hiukkaspuhdistimia, etenkin jos polttoaine on jokin muu kuin pelletti.

Lähteet

Aho, M. (2007) *Reducing emissions from small-scale combustion with electronic particle separator*, Tekes seminaari, Jyväskylä.

Alakangas, E. (2000) *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 2045. Espoo, Otamedia Oy.

BImSchV-luonnos. *Entwurf. Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV)*. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bimschv1_verordnung.pdf (28.3.2009)

Hartmann, H. (2009) Sähköposti 19.1.2009.

Hartmann, H., Turowski, P. (2008) *New developments in small scale ESP technology*, IEA bioenergy task 32 meeting, Amsterdam.

Hartmann, H., Turowski, P., Rossmann, P., Ellner-Schuberth, F. (2008). Fine particle emissions and measurements from small-scale biomass combustion. Country report from Germany. Raportissa: *Biomass combustion in residential heating: particulate measurements, sampling, and physicochemical and toxicological characterization*, Hytönen K. ym., Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 1/2008, liitteessä.

Hartmann; H., Turowski, P., Rossmann, P., Ellner-Schuberth, F. (2008) State-of-the-art of small-scale biomass combustion with respect to fine particulate emissions –country report from Germany. *Proceedings of Central European Biomass Conference, Graz, Austria, January 16–19, 2008* (CD).

Hulkkonen S., Rautanen, J. (2006) *Puun pienpolton päästövaatimukset*, Motiva raportti, <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=53217>. (21.4.2009)

Hytönen K., Jokiniemi, J. (toim.) (2006) *Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion, Workshop in Kuopio on May 22–23, 2006*. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 3/2007. 77 s.

Hytönen, K., Tissari, J., Jokiniemi, J. (2008) Fine particle emissions and measurements from small-scale biomass combustion. Country report from Finland. Raportissa: *Biomass combustion in residential heating: particulate measurements, sampling, and physicochemical and toxicological characterization*, Hytönen K. ym., Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 1/2008, liitteessä.

Jansen, U. (2006) *Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) in Rahmen des Aktionsplans Feinstaub*. <http://www.holzenergie-symposium.ch/Dokumente/Referate/01%20Jansen.pdf> (18.5.2009).

Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A. (2004) Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* 38, 4183–4195.

Lamberg, H. (2008) *Pellettikattilan hiukkas- ja kaasupäästöt sekä niiden mittaaminen*. Pro gradu-tutkielma. Kuopion yliopisto, Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta. 71 + 8 s.

Lamberg, H., Sippula, O., Tissari, J., Jokiniemi, J. (2008) *Effect of operating conditions on emissions from a modern pellet boiler*. European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Abstract T12A017P.

Messerer, A., Schmatloch, V., Pöschl, U., Niessner, R. (2007) Combined particle emission reduction and heat recovery from combustion exhaust – a novel approach for small wood-fired appliances. *Biomass & Bioenergy* 31, 512–521.

Nussbaumer, T. (2005) *Recent Developments in Small Scale Combustion (SSC) Devices*, IEA workshop, Pariisi.

Ruusunen, M. (2007) Effect of automatic control technologies on emission reduction in small-scale combustion. Raportissa: Hytönen, K., Jokiniemi, J. (toim.) *Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion. Workshop in Kuopio on May 22–23, 2006*. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 3/2007. 77 s.

Sippula O. (2007) The influence of wood fuel chemical composition on particle emissions. Raportissa: Hytönen, K., Jokiniemi, J. (toim.) *Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion. Workshop in Kuopio on May 22–23, 2006*. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 3/2007. 77 s.

Sippula, O., Hytönen, K., Tissari, J., Raunemaa, T., Jokiniemi, J. (2007) Effect of Wood Fuel on the Emissions from a Top-Feed Pellet Stove. *Energy & Fuels* 21(2), 1151–1160.

Sippula, O., Lamberg, H., Tissari, J., Jokiniemi, J. (2008) *Effect of fuel quality on fine particle emissions from pellet combustion*. European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Abstract T12A0050.

Tissari, J. (2008) *Fine particle emissions from residential wood combustion*. Väitöskirja. Kuopion yliopiston julkaisu C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet 237. 63 s.

Tissari, J., Hytönen, K., Lyyränen, J., Jokiniemi, J. (2007a) A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment* 41(37), 8330–8344.

Tissari, J., Hytönen, K., Sippula, O., Jokiniemi, J. (2009) The effects of operating conditions on emissions from masonry heaters and sauna stoves. *Biomass & Bioenergy* 33, 513–520.

Tissari, J., Lyyränen, J., Hytönen, K., Sippula, O., Tapper, U., Frey, A., Saarnio, K., Pennanen, A., Hillamo, R., Salonen, R., Hirvonen, M—R., Jokiniemi, J. (2008a) Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion fired in a conventional masonry heater. *Atmospheric Environment* 42, 7862–7873.

Tissari, J., Nuutinen, J., Hytönen, K., Tuomi, S., Kouki, J., Vuorio, K., Raunemaa, T. (2004b) Fine particle and CO emissions in an underfeed pellet burner. Teoksessa: Raunemaa, Yli-Pirilä & Kajander (toim.). *1st International Symposium on Incomplete Combustion, November 9. – 11.2003, Kuopio, Finland, Abstracts*. Kuopion yliopiston julkaisu C. Luonnontieteet ja Ympäristötieteet 172. 150 s.

Tissari, J. (toim.), Raunemaa, T., Jokiniemi, J., Sippula, O., Hytönen, K., Linna, V., Oravainen, H., Pyykönen, J., Tuomi, S., Vesterinen, R., Taipale, R., Kolsi, A., Nuutinen, I., Kouki, J., Vuorio, K. (2005a) *Puun pienpolton pienhiukkaspäästöt*. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 2/2005.

Tissari, J., Salonen, R.O., Vesterinen, R. (toim.) (2007b) *Puun pienpolton päästöt, ilmanlaatu ja terveys*. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 2/2007.

Tissari, J., Sippula, O., Kouki, J., Vuorio, K., Jokiniemi, J. (2008b) Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner. *Energy & Fuels* 22, 2033–2042.

Tissari, J., Sippula, O., Yli-Pirilä, P., Raunemaa, T., Tuomi, S., Kouki, J., Vuorio, K., Jokiniemi, J. (2005b) Emissions of wood log combustion for normal and smouldering conditions. *Proceedings of the European Aerosol Conference*, s.362.

Ympäristöministeriö (2006) *D8: Puupolttoaineita käyttävien lämmityslaitteiden päästöt ja hyötysuhteet. Määräykset ja ohjeet 2008*. Luonnos 30.6.2006. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=87275&lan=FI>. (21.4.2009)