



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

POLTON PÄÄSTÖJEN VÄHENNYS JA MITTAUS

TE -

Janne Ylönen

KIJÄ/T:

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Janne Ylönen	
Työn nimi Polton päästöjen vähennys ja mittaus	
Päiväys 26.11.2018	Sivumäärä/Liitteet 74
Ohjaaja(t) Markku Huhtinen Ari Mikkonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t)	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö käsittelee kattilalaitoksilla syntyviä päästöjä alkaen päästömittauksen historiasta sekä päästöjä rajoittavien sääntöjen ja standardien kehityksestä. Työssä käydään läpi pienten ja keskisuurten polttolaitosten sekä polttotekniikat että polttolaitosten savukaasupäästöihin vaikuttavat tekijät, savukaasupäästöjen vähentämiseen vaikuttavat prosessit ja yleisimmin käytössä olevat suodatustekniikat sekä niiden toimintaperiaatteet.</p> <p>Yhä tiukkenevissa päästöjä rajoittavissa säännöksissä tulee kaikkien huolehtia myös häiriötilanteessa tapahtuvista tarpeettomista päästöistä, jolloin tulee selvittää parhaat käytössä olevat tekniikat päästöjen hallintaan. Toiminnanharjoittajan tulee huolehtia työntekijöiden opastuksesta, jotta mahdolliset virheelliset ajotavat ja häiriötilanteet olisivat mahdollisimman lyhyitä.</p> <p>Opinnäytetyöstä saatu hyöty liittyy monipuolisen energiatekniikan osaamiseen sekä mahdollisten päästöihin vaikuttavien kehitysideoiden aikaansaamiseen. Opinnäytetyön tarkoituksena on esitellä ne seikat, joista onnistunut savukaasumittaus muodostuu. Opinnäytetyötä voidaan käyttää perehdytysmateriaalina energiatekniikasta kiinnostuneille opiskelijoille</p>	
Avainsanat Päästöt, mittaaminen, kattilat, poltto, savukaasut	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author(s) Janne Ylönen			
Title of Thesis Reduction and Measurement of Combustion Emissions			
Date	26 th November2018	Pages/Appendices	74
Supervisor(s) Markku Huhtinen Ari Mikkonen			
Client Organisation /Partners			
<p>This study deals with emissions from boiler plants from the history of emission measurement and the development of rules and standards that limit emissions. The study involves small and medium-sized combustion plants, combustion techniques and factors affecting fuel gas emissions from combustion plants, processes that contribute to reducing fuel gas emissions and the most commonly used filtering techniques and their operating principles. The purpose of the thesis was to tell the facts about successful fuel gas measurement.</p> <p>In increasingly restrictive regulations, everyone should also take care of unnecessary discharges in the event of a disturbance, in which case the best available techniques for emission control should be explored. The operator must take care of the guidance of the employees in order to minimize possible malfunctions and disturbances.</p> <p>The benefits gained in the study are related to versatile know-how of energy technology and the creation of potential development ideas for emission control. The thesis can be used as an induction material for students interested in energy technology</p>			
Keywords emissions, meterring, boilers, compustion, fuel gases			

SISÄLTÖ

1	PÄÄSTÖMITTAUKSEN HISTORIA	8
2	MITTAAMINEN	13
3	MERKITTÄVÄT PÄÄSTÖT	14
4	ILMANLAATUUN VAIKUTTAVAT EPÄPUHTAUDET	15
4.1	Rikkidioksidi.....	15
4.2	Typenoksidit.....	17
4.3	Hiukkaset.....	18
4.4	Raskasmetallit ja aerosolit.....	19
4.5	Musta hiili eli nokipöly	20
5	KATTILALAITOKSET JA POLTTOTEKNIIKAT	21
5.1	Arinapoltto	21
5.1.1	Päästöjen vähennys arinapoltossa	23
5.1.2	Arinakattilan ylösajo	24
5.2	Kaasutuspolttokattila	24
5.2.1	Kaasutus sovellukset.....	26
5.2.2	Pyrolyysiöljy	26
5.3	Kerrosleijupoltto.....	28
5.3.1	Kerrosleijupolton ylösajo	30
5.4	Kiertoleijupoltto	30
5.4.1	Kiertoleijupolton ylösajo	31
5.5	Tulitorvi-tuliputkikattilat.....	32
5.5.1	Tulitorvi-tuliputkikattilan ylösajo.....	33
6	PÄÄSTÖJEN VÄHENNYS LEIJUTUSPOLTOSSA	34
6.1	Primääriset menetelmät.....	34
6.2	CFD virtausdynamiikka	34
6.3	Sekundääriset menetelmät.....	36
7	PETIMATERIAALIEN VAIKUTUS SYNTYVIIN PÄÄSTÖIHIN.....	37
8	HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO.....	39

9	SUODATUSTEKNIIKAT	40
9.1	Sähkösuodatin	41
9.2	Kuitusuodatin	42
9.3	Sykloni.....	43
9.4	Venturipesuri	44
9.5	Savukaasupesuri	45
9.6	Pienpolton suodattimet.....	46
10	PÄÄSTÖJEN VÄHENNYSMENETELMÄT OLEMASSA OLEVIIN LAITOKSIIN PÄÄSTÖLÄHTEITTÄIN ⁴⁹	
10.1	Typpipäästöt.....	49
10.2	Rikkipäästöt.....	49
10.3	Hiukkaspäästöt	49
11	HÄIRIÖTILANTEET	50
12	POLTTOAINEET	51
12.1	Lämpöarvo	51
12.2	Kosteus.....	52
12.3	Lämpöarvon määrittäminen	54
12.4	Polttoaineiden ominaisuudet	55
12.5	Käytöstä poistetun puun luokittelu.....	57
13	TUHKAT	57
13.1	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen.....	58
14	VTT:N OHJE MITTAUSPAIKASTA	60
14.1	Mittaustaso.....	61
15	TAVOITTEENA ONNISTUNUT PÄÄSTÖMITTAUS.....	62
16	SAVUKAASUMITTAUKSET TESTIYMPÄRISTÖSSÄ	63
17	TOIMINNANHARJOITTAJAN VELVOLLISUUDET.....	63
17.1	Tarkastussuunnitelma.....	63
17.2	Mittaussuunnitelma	64
17.3	Mittausraportti	67
18	EN 1065/2017	67
19	YHTEENVETO	69
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	70

Lyhenteet ja termit

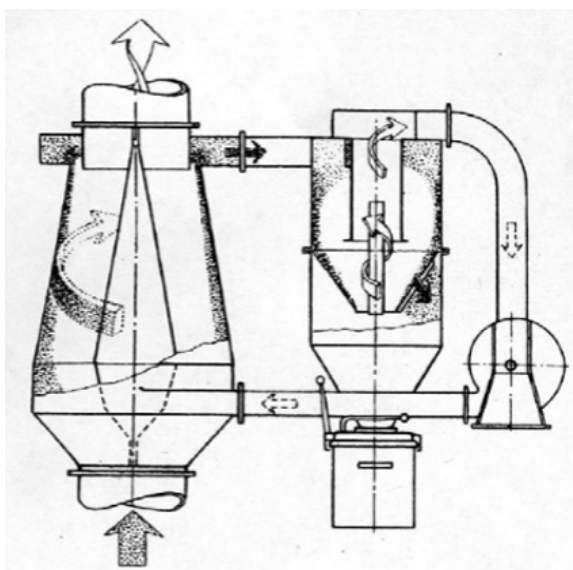
AMS	Kiinteästi asennettu jatkuvatoiminen mittauslaitteisto (Automated Measuring Systems)
AST	Mittauksille suoritettava standardin EN-14181 mukainen vuosittainen laadunvarmistus (Annual Surveillance Test)
ar	Saapumistilassa (as received)
BAT	Paras sovellettavissa oleva tekniikka (Best Available Techniques)
BFB	Kuplapetikattila (Bubbling Fluidized-Bed)
C	Hiili
Ca (OH) ₂	Kalsiumhydroksidi sammutettu kalkki
CFD	Laskennallinen virtausdynamiikka (Computational Fluid Dynamics)
CO	Hiilimonoksidi, häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
CCS	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage)
CLC	Happipolttoon perustuva hiilidioksidin talteenotto (Chemical Looping Combustion)
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
CFB	Kiertopetikattila (Circulation Fluidized-Bed)
CH ₄	Metaani
(CaMg (CO ₃) ₂	Kalsiummagnesiumkarbonaatti dolomiitti
DDT	Hyönteismyrkky diklooridifenyylitrikloorietaani
d	Kuiva-aineesta (dry)
EPA	Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluvirasto (Environmental Protection Agency)
FTIR	Infrapunaspektrofotometria (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
HCB	Heksaanikooribentseeni
HCH	Heksaklorosykloheksaani
HCl	Suolahappo
H ₂ O	Vesi, Vesihöyry
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
H ₂	Vety molekyyli
M	Kosteuspitoisuus saapumistilassa <i>Mar</i> nimike [<i>P</i> – %]
MW	Megawatti
µm	Mikrometri
mg/Nm ³	Pitoisuusyksikkö, milligrammaa per normiilmakuutiometri
mg/MJ	Pitoisuusyksikkö, milligrammaa per megajoule
m	Massa
NH ₃	Ammoniakki
NM VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (non-methane volatile organic compounds)
OC(NH ₂) ₂	Urea
Oy	Osakeyhtiö
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt

PCDD/F	Dioksiinit ja furaani
PCB	Polykloorattu bifenyyl
PM	Hiukkasen koko (Particulate Matter)
POP ppm	Pysyvät orgaaniset yhdisteet Miljoonasosa (parts per million)
S	Rikki
SO ₂	Rikkidioksidi
SO ₃	Rikkitrioksidi
SiO ₂	Piiksidi
SCR	Katalyyttinen menetelmä (Selective Catalyst Reduction)
SNCR	Eikatalyyttinen menetelmä (Selective Non Catalyst Reduction)
SRM	Referenssimittaus määrävälein tapahtuva (Standard Reference Method)
<i>Q</i>	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]
<i>Q_{net, v, m}</i>	Alempi (tehollinen) lämpöarvo (J/g) kun polttoaineen kosteus on MT
<i>Q_{gr, v}</i>	Analysoidun näytteen ylempi (kalorimetrinen) lämpöarvo (J/g)
<i>q_{p,net,d}</i>	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg] vakioaineessa
ppmv	(volume parts per million)
N ₂	Molekyylityppi
NO	Typpimonoksidi
NO ₂	Typpidioksidi
NO _x	Typenoksidi
N ₂ O	Dityppioksidi (ilokaasu), typpioksiduuli
O ₂	Happimolekyyl
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (volatile organic compounds)
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 PÄÄSTÖMITTAUKSEN HISTORIA

Ilmanlaadun ja päästömittausten historia Suomessa on varsin lyhyt johtuen osittain teollisen kehityksen ja ongelmaan havahtumisen syistä. Ensimmäinen laki, jossa varsinaisesti puututtiin haitan aiheuttamiseen oli laki eräistä naapuruussuhteista. Vuonna 1920 annettu laki ja sen 17§ määritteli ehdot kiinteistön käytölle. ”Älköön kukaan, mikäli ei jäljempänä toisi sanota, pitäkö varastoa tai käyttäkö kiinteistöä niin, että naapuri taikka muu, joka lähistöllä omistaa maan tai huoneiston tahi sellaista nautintaoikeudella hallitsee taikka jonka etuihin se muuten saattaa koskea, kärsii siitä pysyväistä kohtuutonta rasitusta, kuten kipinöiden, tuhkan, noen, savun, lämmön, löyhkän, kaasujen, höyryn, tärinän, jyskeen, taikka muun sellaisen kautta.” Lakiin on tehty korjauksia vuonna 2000 mutta henki on säilynyt edelleen hyvin samankaltaisena. (Huutoniemi, Estlander, Hahkala, Hämekoski, Kulmala, Lahdes ja Laukkanen 2006, 23.)

Ensimmäisen maailmansodan vaikutus tulee kuitenkin muistaa, jouduttiinhan silloin vähentämään tuontihien käyttöä ja huomattiin ilmanlaadun parantuneen siirryttäessä käyttämään kotimaisia polttoaineita, esimerkiksi halkoja, kiinteistöjen lämmitykseen. Lisäksi puujalostuksen tuotannon vähentyessä myös hajuhaitat vähenivät. Ensimmäisiä suodattimia käytettiin Suomessa sementtitehtailla, joissa kangassuodattimet otettiin käyttöön 1920-luvun lopulla. Sykloniperiaatteella toimivan hiukkaseroitimen havainnekuva 1950-luvulta on esitetty kuvassa 1. (Huutoniemi ym. 2006, 56.)



KUVA 1. Helsingin puhallintehtaan mainos 1950-luvulta. AXYCLON-merkkinen tomunerotin, jota suositeltiin erityisesti lämpö- ja höyrykeskuksiin. (Schönach 2008, 120).

Merkittävänä askeleena paikallisten päästöjen vähentymiselle oli kuitenkin kaukolämmityksen alkaminen vuonna 1953 ensin Helsingissä laajentuen siitä muihin kaupunkeihin.

Aikaisemmin ilmansuojelun hoitaminen oli kuntien tehtävänä, jolloin toiminnassa oli suuriakin, paikkakunta kohtaisia eroja, antoihan terveydenhoito- ja naapuruussuhdelaki oikeuden puuttua vain paikallisiin ongelmiin. Huomio siirtyi välittömään haittojen aiheuttajaan. Aikaisemmat ilmanlaatuun liittyvät mittaukset määriteltiin pitkälti terveysuojelun näkökulmasta. Kuvassa 2 nähdään ulkomittausta ja kalustoa jolloin mittaustoiminta oli työterveyslaitoksen vastuulla. Työterveyslaitokselta mittaustoiminta siirtyi vuonna 1975 ilmatieteen laitokselle. Ilmanlaadun hallintaan liittyvä yhteistyö kehittyi kuitenkin kuntien ja teollisuuden yhteistyössä jo ennen kuin sille määriteltiin ilmansuojelulaissa puitteet. (Huutoniemi ym. 2006, 16 – 66.)



KUVA 2. Ulkomittauksia 1960-luvulla (Schönach 2008, 149).

Ensimmäiset ilmansuojelututkimukset Suomessa käynnistyivät Suomessa 1970-luvulla ja keskittyivät kaasumaisten yhdisteiden vaikutusten selvittämiseen, esillä olivat metsäkuolemat ja maaperän happamoituminen, myöhemmin huomio on kiinnittynyt otsoniin ja ilmastokysymyksiin. Vuonna 1979 Helsingin Yliopistossa käynnistettiin tutkimus energiantuotannosta johtuvien epäpuhtauksien vaikutuksesta metsän tuotantokykyyn. Tutkimus yhdistettiin kokonaisvaikutusmalliin, joka osoitti metsien kasvun lisääntyneen, mutta arvioi kasvun kääntyvän laskuun maaperän happamoitumisen seurauksena 1990-luvulla. Kuvassa 3 nähdään hankasalmeista metsää, jossa puhtaan luonnon merkit eli naavaa. Onneksi eurooppalainen yhteistyö ja kotimaiset toimet johtivat siihen, että muun muassa rikkipäästöt vähenivät tehokkaasti ja happamoitumisriski jäi pääosin toteutumatta. (Huutoniemi ym. 2006, 34 – 35.)



KUVA 3. Pensasmaisia jäkäliä, naavaa ja luppoo puhtaan ilman indikaattori. (Ylönen 2018).

Ympäristönsuojelun valtionhallinnon alku sijoittuu vuosikymmenten 1960-1970 taitteeseen, jolloin Valtioneuvoston kanslian alaisuuteen nimitettiin ympäristönsuojelun neuvottelukunta, myöhemmin neuvosto, ja sille varsin vahva sihteeri. Vaikka vesiensuojeluun oli laki saatu vuonna 1962, niin ei ilmastonsuojeluun asetettu neuvosto saanut ilmansuojelulakia aikaiseksi, vaikka vuoden 1971 lopulla sisäministeriö asetti ilmastonsuojeluun liittyvän toimikunnan. Silläkin oli toki myös meluntorjunta mandaatissaan, mutta ilmansuojelu- ja meluntorjuntatoimikunnan päätehtävänä oli valmistella hyväksyttävissä oleva luonnos ilmansuojelulaiksi. Lain synty viivästyi kiistojen takia, jotka koskivat hallinnon järjestämistä ja muutamia lain keskeisiä periaatteita. (Huutoniemi ym. 2006, 37 – 42.)

Kun ilmansuojelulaki vuonna 1982 saatiin Suomeen, siirtyi ilmansuojelu politiikka valtakunnalliselle tasolle. Pystyttiin puuttumaan laaja-alaisemmin ilmansuojelun ongelmiin. Katse siirtyi ilmanlaadun parantamisesta päästöihin, sillä laissa määrättyjä tavoitteita ei voitu saavuttaa puuttumatta aiheuttajiin. Ensimmäiset merkittävät teko päästöjen hallinnassa oli savupiippujen korottaminen. Se paransihan ilmanlaatua paikallisesti, mutta sillä ei ollut vaikutusta happamoitumis- ongelmaan. Paikallisen toiminnan rinnalle nousi voimakas kansallinen talkoohenki. Laajojen valtakunnallisten toimintaohjelmien sekä tutkimus- ja kehitystyön seurauksena saatiin päästöt laskuun. (Huutoniemi ym. 2006, 17.)

Laki valtuutti valtioneuvoston antamaan päätöksiä ohjearvoista ja rajoituksista, jotka koskivat ilmanlaatua, päästöjen määrää ja polttoaineiden laatua. Ensimmäinen tehtäväalue oli ilmanlaadun ohjearvojen valmistelu, joka saatiin valtioneuvoston esittelyyn vuonna 1984. Toisena tehtäväalueena oli happamoitumisen torjunta, jossa toimittiin usealla rintamalla sekä kotimaassa että kansainvälisesti. Kotimaahan perustettiin rikkitoimikunta, jonka tehtävänä oli valmistella ehdotus rikkipäästöjen vähentämiseksi. Kolmantena tehtäväalueena oli aluehallinnon tehtävän tukeminen, koska pelättiin ilmansuojelun ilmoitusten ruuhkauttavan lääninhallitusten ympäristönsuojelutoimistot. Neljäs tehtäväalue oli liikenteen päästöjen vähentäminen. Liikenteen sääntely kuului liikenneministeriölle, joten ympäristöviranomaisten piti ensin vakuuttaa liikenneministeriö päästöjen vähentämisen tarpeesta. Viides tehtäväalue oli tutkimuksen vahvistaminen, jonka seurauksena syntyi ilmansuojelu asiantuntijaverkosto. Ilmatieteen laitos ja Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) olivat näistä parhaiten varautuneita ja kokeneita. Ilmatieteen laitos hallitsi ilmanlaadun mittaamisen ja mallintamisen, ja VTT oli kehittänyt osaamistaan teollisuuden, voimalaitosten ja autojen moottorien ilmansuojelutekniikassa sekä niiden päästöjen mittaamisessa. (Huutoniemi 2006, ym. 43 – 45.)

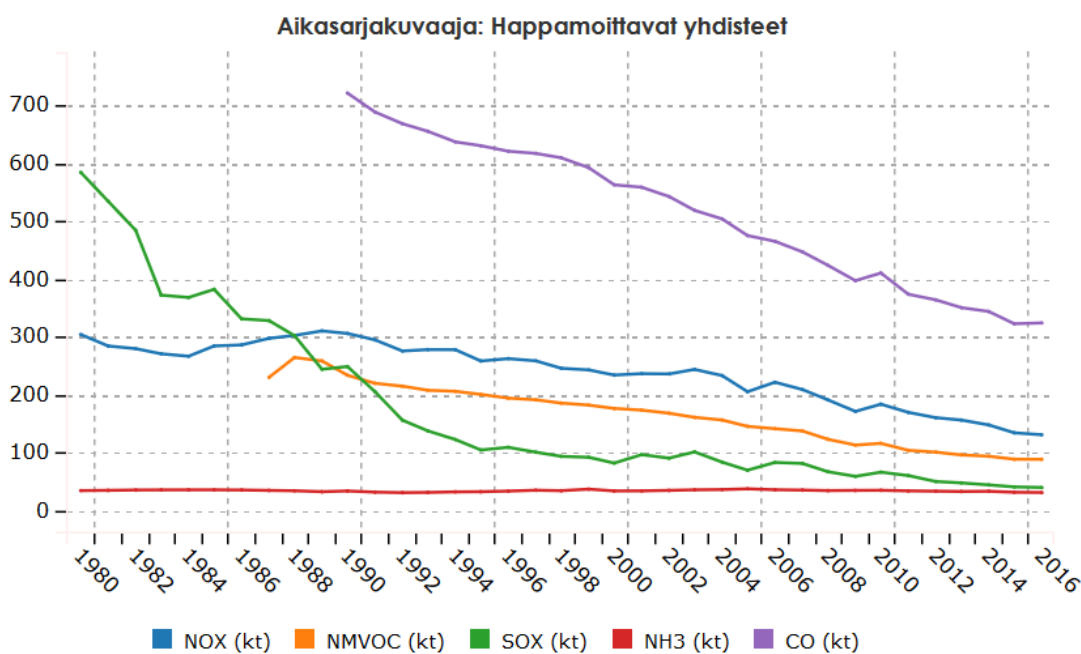
Kaukokulkeutumissopimus

Ilman epäpuhtauksien päästöjä rajoitetaan mm. YK:n Euroopan talouskomission kaukokulkeutumissopimuksessa UNECE (CLRTAP Convention on Long Range Transboundary Air Pollution) ja sen alaisissa pöytäkirjoissa, jotka koskevat typen ja rikin oksideja, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, ammoniakkaa, hiukkasia, raskasmetalleja ja hitaasti hajoavia orgaanisia yhdisteitä. Kaukokulkeutumissopimuksen alainen ns. Göteborgin pöytäkirja uusittiin vuoden 2012 lopussa, jolloin siihen lisättiin raportointivelvoite halkaisijaltaan alle 2.5 µm hiukkasille ja päästöjen rajoitusvelvoitteet vuodelle 2020 prosenttiosuuksina vuoden 2005 päästöistä. (Ympäristö.fi.)

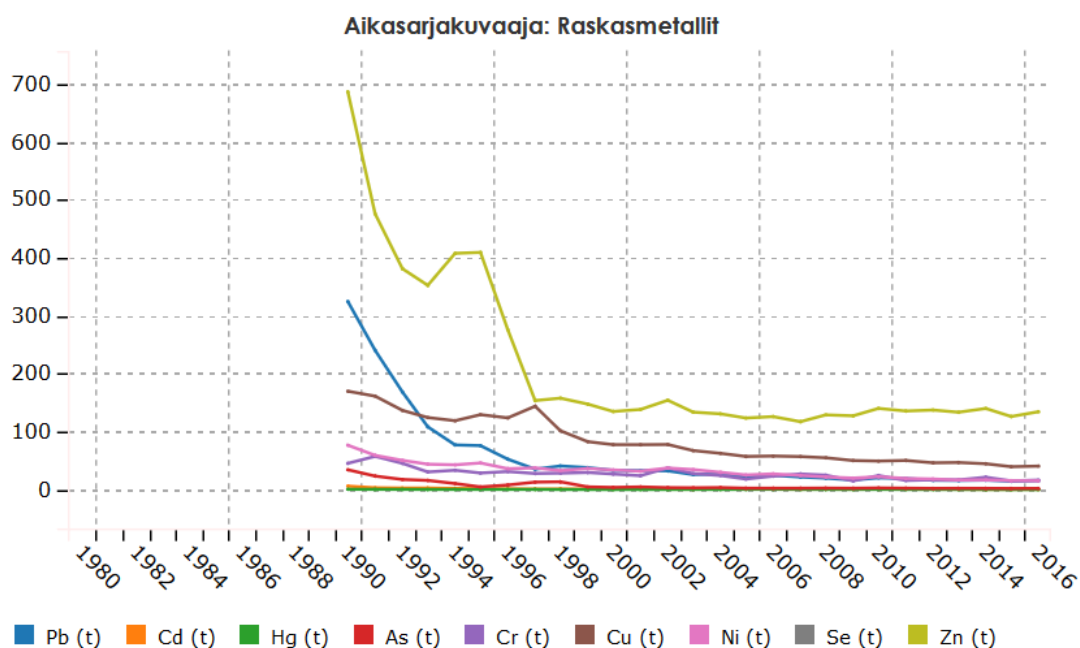
Raportointi

Suomi toimittaa tiedot ilman epäpuhtauksien päästöistä vuosittain YK:n Euroopan talouskomission kaukokulkeutumissopimuksen sihteeristölle ja Euroopan ympäristökeskukselle.

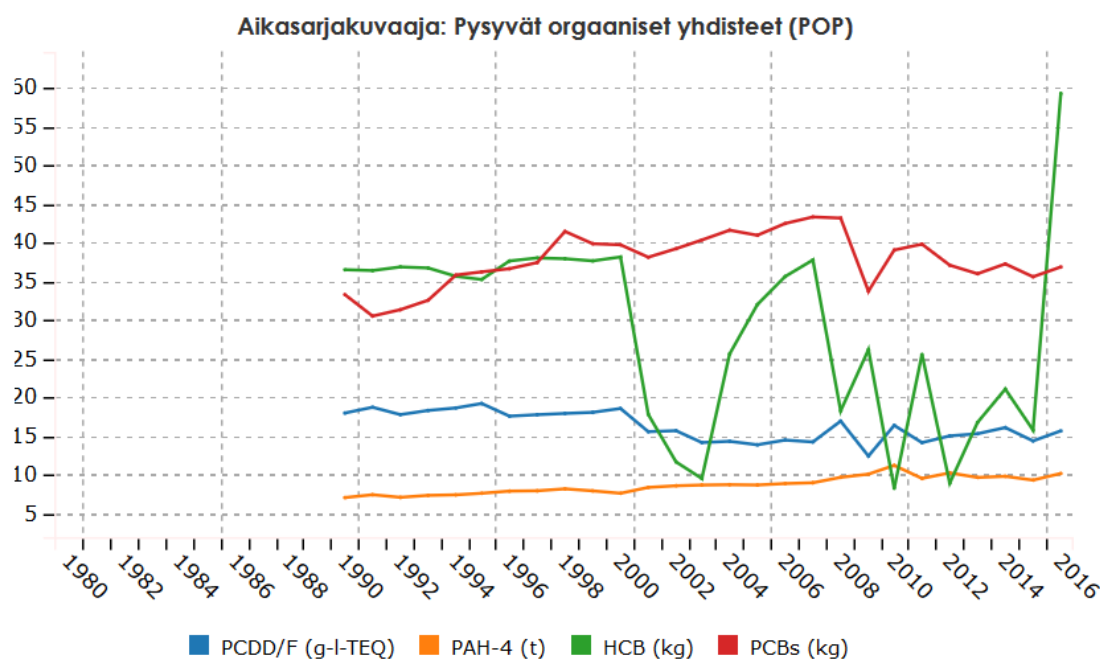
Sopimuksen raportointiohjeiden (EB.AIR/GE.1/2002/7) mukaisesti toimitetaan tiedot seuraavien ilman epäpuhtauksien päästöistä: rikki, typen oksidit, ammoniakki, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hiilimonoksidi, hiukaset, raskasmetallit (kadmium, lyijy, elohopea, sekä lisätietoina: arseeni, kromi, kupari, nikkeli, seleeni, sinkki) ja hitaasti hajoavat orgaaniset yhdisteet (aldriini, klordaani, klordekoni, DDT, dieldriini, endriini, heptakloori, heksaklooribentseeni (HCB), mirex, toksafeeni, heksaklorosykloheksaani (HCH), heksabromobigennyli, polyklooratut bifenyylit (PCB), dioksiinit/furaanit, polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH), ja lisätietoina: lyhytketjuiset klooratut parafiinit, pentakloorifenoli). Kuivissa 4, 5, ja 6 on ympäristöhallinnon ylläpitämiä aikasarjakuvaajia happamoittavista yhdisteistä, raskasmetalleista ja pysyvistä orgaanisista yhdisteistä. (Ympäristö.fi.)



KUVA 4. Aikasarjakuvaaja happamoittavat yhdisteet (Ympäristö.fi).



KUVA 5. Aikasarjakuvaaja raskasmetallit (Ympäristä.fi).



KUVA 6. Aikasarjakuvaaja pysyvät orgaaniset yhdisteet (POP) (Ympäristö.fi).

Päästökauppa

Ensimmäiset päästökaupat tehtiin 2000-luvun alkupuolella ja niiden toteuttajina olivat aktiiviset yritykset, jotka toteuttivat kaupat kahdenkeskinä kauppoina. Päästökauppa oli uusi asia ja kaupankäynnissä oli vielä paljon avoimia kysymyksiä, kuten kauppatavaran määrittelyn lainopillisesti, päästövähennemän määrittely sekä päästövähennemän omistajuus. Kauppaa käytiin määrittelemättömällä tuotteella markkinoilla, joita oikeasti ei vielä ollut. Ensimmäinen päästökauppa tehtiin vuonna 2000 Fortumin omistamalla puuta ja turvetta käyttävällä Joensuun voimalaitoksella, jolloin myytiin 50 000 tonnia päästövähennyksiä Kanadaan. Vaikka

rahallisesti kauppa Atlantin yli oli pieni, oli se tekijöilleen merkityksellinen. Palaute tehdystä kaupasta oli kuitenkin hyvin rakentavaa.

Aikaansaadun EU:n päästökauppadirektiivin tuloksena yritykset saivat yksityiskohtaiset veloitteet. Pyrkimyksenä oli tavoitella kustannustehokkaasti päästöjen vähentymistä uusine veloitteineen. Aikaisemmin markkinoilla olleiden päästövähennemien lisäksi markkinoille tulivat päästöoikeudet. Ensimmäinen eurooppalainen kauppa EU:n päästöoikeuksilla tehtiin helmikuussa 2003 jo ennen direktiivin hyväksymistä. Kaupan kohteena olivat vuoden 2005 päästöoikeudet. Vuonna 2004 kauppa käytiin jo yli miljoonalla tonnilla päästöoikeuksia. (Huutoniemi ym. 2006, 183.)

2 MITTAAMINEN

Ensimmäiset Automaattiset rikkidioksidianalysointilaitteet tuotiin Suomeen 1967. Laite oli amerikkalainen Scientific industries-mallia. Työterveyslaitos sai laitteen kokeiltavaksi. Sillä tehtiin mittauksia lähinnä työhygieenisissä kohteissa, myöhemmin laite ostettiin omaksi. Tuohon aikaan mittausten painopisteenä oli laskeumamittausten, leijuvan pölyn ja kaasumaisten epäpuhtauksien mittauksissa. Yhdysvallat on edelläkävijä kaasumaisen ilman epäpuhtauksien mittauksissa. Ensimmäiset mittaukset käynnistyivät Yhdysvalloissa 1960-luvun alussa. Yhdysvaltojen ympäristövirasto EPA ja ilmansuojelulaki noudattivat annettuja ilmanlaatonormeja ja mittauksilta vaadittiin luotettavuutta. (Huutoniemi 2006, ym. 62 – 63.)

Päästömittausten katsotaan alkaneen 1960-luvulla, jolloin mittausten tarkoituksena oli mitata savukaasujen palamisen tehokkuutta. Mittaukset suoritettiin Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluviraston EPA:n standardin mukaisella menetelmällä. Mittaukset suoritetaan ns. Orsat-laitteistolla, jolla voidaan mitata hiilidioksidipitoisuus, happipitoisuus ja tarvittaessa hiilimonoksidipitoisuus, josta pystyttiin laskemaan typpipitoisuus. Mittauksilla määriteltiin savukaasun tila ja palamisen tehokkuus. Menetelmä sisälsi myös vedenlauhduksen, joten tila voitiin määrittää myös kuivissa savukaasuissa. Orsat-laitteistolla pystyttiin mittaamaan hiilidioksidipitoisuutta silloinkin, kun happipitoisuus oli joko matala tai korkea. (Huutoniemi ym. 2006, 98.)

Vaikka tuohon aikaan ei lainsäädäntö velvoittanutkaan hiukkaspäästöjen rajoittamista hankittiin jo 1960-luvulla muun muassa kattilalaitoksiin sähkösuodattimia. Takuuehtojen täyttymisen varmistamiseksi toiminnan harjoittajat teettivät erottimen hankinnan yhteydessä hiukkaspäästöjen takuumittauksia. Suomeen syntyi mittauksia suorittavia konsultteja sekä hiukkas- ja mittaustalaitteiden valmistusta. Viranomaisilla ei riittänyt voimavaroja eikä välttämättä taitoaakaan arvioida, mitä standardoitujen menetelmien käyttö tarkoitti ja kuinka hyvin saadut mittaustulokset kuvasivat päästöjä. (Huutoniemi ym. 2006, 98.)

Laatuvaatimukset

VTT hankki mittauksilleen akkreditoinnin vuonna 1995. Samaan aikaan kehitettiin jatkuvatoimisten mittausten laadun varmistusta rinnakkaismittauksilla. Menetelmä otti huomioon myös vertailumittajaan laadun varmistuksen. Menetelmän testaus suoritettiin Ekokem Oy:n ongelmanjätteen polttolaitoksella ja sen todettiin toimivan. Samaan aikaan Euroopan standardoimisjärjestössä aloitettiin asiaa koskeva standardisointityö. Eu-

rooppalaisen mittauskäytännön mukaan vertailumittauksen epävarmuus määriteltiin nolaksi tai merkityksettömäksi. Niimpä valmistuneen standardin (EN 1418) mukaan menettely ei takaa päästömittauksen vertailukelpoisuutta, koska vertailumittauksia tekevien laboratorioden oma mittausepävarmuus ei ole nolla vaan vaihtelee laboratorioden välillä. Standardointityön kuluessa suomalaisille mittaajille tiedotettiin akkreditoinnin merkityksestä sekä jonkun ajan kuluttua tulevasta vertailumittauksia tekevien laitosten akkreditoinnin vaatimuksesta. (Huutoniemi 2006, ym. 98 – 99.)

3 MERKITTÄVÄT PÄÄSTÖT

I ilmanlaadun muutokset vaikuttavat monin tavoin ihmisiin, maaperään, vesistöihin, elolliseen luontoon ja yhteiskuntaan. Hengitystieinfektiot, maaperän happamoituminen ja rakennusmateriaalien syöpyminen ovat esimerkkejä näistä vaikutuksista. (Huutoniemi ym. 2006, 16).

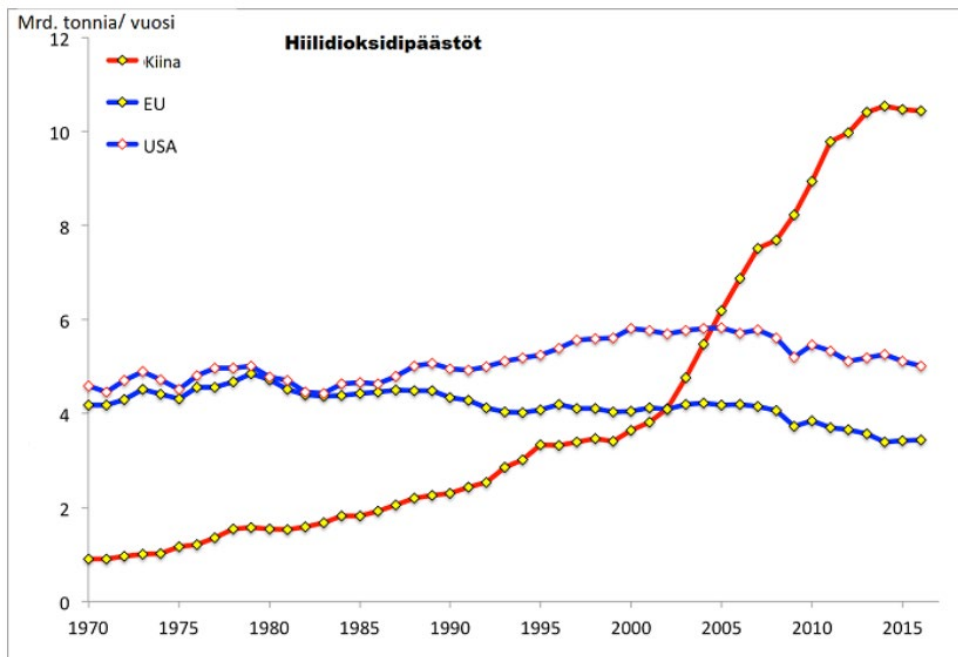
Päästöihin vaikuttava jako määritellään niiden vaikutusalueen ja kulkeutumisen perusteella, jolloin puhutaan paikallisista päästöistä, alueellisista päästöistä ja globaaleista päästöistä. Paikallisilla päästöillä tarkoitetaan päästöjä, jotka tapahtuvat välittömässä läheisyydessä päästölähteestä ja vaikutukset voivat olla hyvin voimakkaita ja vaikeasti hallittavissa. Toimenpiteinä ääritapauksissa voidaan pitää ihmisten evakuoitinta, mutta lievimmillään haitalliset kaasukomponentit voivat aiheuttaa luonnolle ja ihmisille terveydellisiä haittoja, vaikuttaa materiaalien kestävyteen sekä pilata omaisuutta. Toiminnanharjoittajalle paikallisista päästöistä useasti tuleekin suurimpana riskinä maineriski, jonka seuraukset voivat olla hyvinkin pitkiä. (Elearn.ncp.fi.)

Alueellisten päästöjen hahmottaminen onkin huomattavasti hankalampaa niiden lähteiden määrittämiseksi, jolloin aiheuttajien suuresta määrästä ei voida syyllistää pelkästään yhtä toiminnanharjoittajaa. Kokonaisuudessa on otettava mukaan myös pienpolton, liikenteen, teollisuuden ja voimalaitosten aiheuttamat päästöt. Alueellisten päästöjen kasvaessa joudutaan menemään ääritapauksissa ulkona liikkumisen rajoittamiseen sekä toiminnanharjoittajien ohjaamiseen huippukuormitusten porrastamisessa, joidenkin toimintojen kokonaan lopettamisessa ja liikenteen rajoittamisessa. Alueelliset päästöt aiheuttavat luonnolle ja ihmisille vakavia sekä pysyviä ongelmia. Alueellinen päästö aiheuttaa myöskin taloudellisesti merkittävää maineriskiä. On mahdollista että alueen vetovoimaisuus romahtaa ja ihmisten kiinteän omaisuuden arvo laskee.

Globaalit päästöt mielletäänkin mantereiden aiheuttamiksi päästöiksi, joita mitataan aiheutetulla päästötonnilla asukasta kohti. Tiukkaan asutuilla alueilla, suhdeluvun ollessa pieni suhteessa päästöihin, ihmiset joutuvat alttiiksi vakavimmille päästöille. Globaalien päästöjen vaikutus luontoon ja ihmisiin on hyvin pitkäaikainen. Globaalien päästöjen arviointi tulee ulottaa suurelle aikavälille. Kaukokulkeutuminen on globaalien päästöjen yksi mittareista, jolla voidaan arvioida mantereiden aiheuttamia päästöjä keskenään ja niiden vaikutusta alueisiin, jossa päästöjä ei juuri synny. Päästöjen vähentämiseen pystytään vaikuttamaan kansallisilla sopimuksilla, joille asetetaan usein takaraja. Riskinä globaaleille päästöille ovat niiden luontoon ja ilmastoon vaikuttavat tekijät.

Paikallisia ympäristöhaittoja ovat ilmanlaatu, juomaveden laatu, jätevesien kuormitukset, jätteiden käsittely, melu, maisema ja maankäyttö, roskaaminen ja yksittäiset onnettomuudet kuten öljyvahingot. Alueellisia ym-

päristöhaittoja ovat merien ja vesistöjen saastuminen, happamoituminen sekä ydinvoimalalla sattunut onnettomuus. Globaaleita ympäristöhaittoja ovat ilmastonmuutos, otsonikato, väestönkasvu, metsävarojen tuhoutuminen, eläin ja kasvilajien tuhoutuminen, vaikutukset jäätikköalueisiin, lentoliikenteen aiheuttamat kansalliset haitat ja maatalouden aiheuttamat haitat. (Elearn.ncp.fi 41.) Kuvassa 7 on esitetty Kiinan, USA:n ja EU:n globaalit päästöt. (Energiauutiset.fi).



KUVA 7. CO₂ -päästöt Kiinassa, USA:ssa ja EU:ssa 1970-2016 (Energiauutiset.fi).

4 ILMANLAATUUN VAIKUTTAVAT EPÄPUHTAUDET

4.1 Rikkidioksidi

Rikkidioksidi (SO₂) sekä rikkiatrioksidi (SO₃) ovat haitallisia ihmisten terveydelle. Ympäristölle terveyden haittavaikutukset korostuvat olosuhteissa, joissa haitallisten hiukkasten pitoisuus on suuri. Ympäristölle haitallisenä rikki aiheuttaa maan happamoitumisen, metalleille korroosiota ja kipsimäisille aineille rapautumista. Ihmisten aiheuttamista rikkidioksidipäästöistä suurimpana on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Rikkidioksidin sekä rikkiatrioksidin ympäristön haittavaikutukset ovat samankaltaisia. Vaikutusalue voi olla kaukanakin, jos savukaasujen rikkiatrioksidin pitoisuus on korkea. Polttolaitoksen läheisyydessä voi olla suurempiakin haittoja kuten korroosiota. Rikkioksidipäästöjen vähentäminen alkoi vuonna 1985, jolloin kaksikymmentäyksi teollisuusmaata sitoutui vähentämään rikkioksidipäästöjä 30 prosenttia. Vähennystahdin kiihtyessä otettiin käyttöön esimerkiksi Tanskassa rikkivero päästötavoitteisiin pääsemiseksi. (Raikko, Saastamoinen, Hupa ja Kurki-Suonio 2002, 343 – 344.)

Poltoissa vapautuvat rikin oksidit ovat peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä, jota polttoaineet sisältävät 0-5 %. Suurin osa rikistä vapautuu poltoissa polttotilaan, mutta pieni osa rikistä sitoutuu tuhkan seassa oleviin

alkaleihin ja maa-alkalimetalleihin. Loput rikistä muodostavaa rikin oksideja, jotka kulkeutuvat savukaasujen mukana ilmakehään, ellei laitoksella suoriteta erillistä rikinpoistoa. Suurin osa rikin oksideista on rikkidioksidi, rikkitrioksidin osuuden ollen muutamia prosentteja. Taulukossa 1 kerrotaan polttoaineen rikkipitoisuus sekä muodostuvat päästöt. (Raikko ym. 2002, 345.)

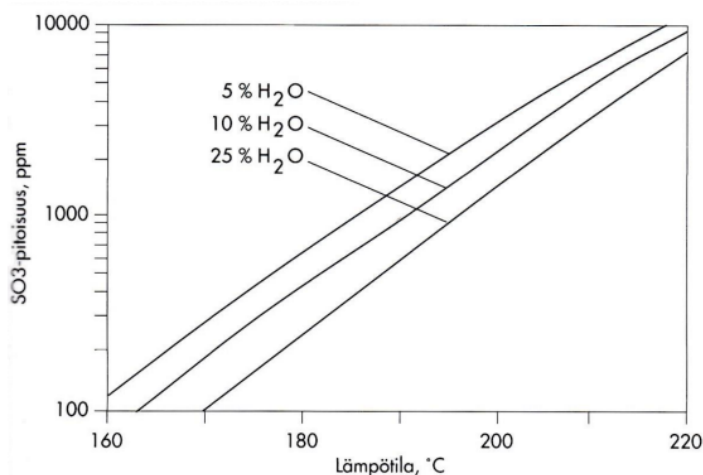
Polttoaine	Rikkipitoisuus [m-%]	Rikkipäästö [mg_{SO2}/MJ]
kivihiili	0,2 - 5	150 - 4000
puu	< 0,05	< 130
turve	0,05 - 0,5	50 - 500
maakaasu	0	0
kevyt polttoöljy	0,05 - 0,5	25 - 250
raskas polttoöljy	1 - 4	500 - 2000

TAULUKKO 1. Polttoaineiden tyypillisiä rikkipitoisuuksia sekä rikkidioksidin ominaispäästöjä (Raikko ym. 2002, 344).

Rikin vapautumisen mekanismiin poltossa vaikuttaa, mikä rikkijyhdiste on kyseessä. Kuumennettaessa rikkiatomeita osa hajoamisesta tapahtuu hyvinkin alhaisissa lämpötiloissa toisten atomien irtoamisen vaatiessa hyvinkin korkeita lämpötiloja. Rikkijyhdisteiden pilkkouduttua pieniksi molekyyleiksi ne hapettuvat nopeasti rikkidioksidiksi. (Raikko ym. 2002, 346.)

Rikkidioksidin reagoidessa edelleen muodostuu rikkitrioksidi. Laitoksen käytön kannalta rikkitrioksidi on haitallista sen erittäin korrosoivasta vaikutuksesta hyvinkin matalissa lämpötiloissa. Rikkitrioksidi on kaksi syntymekanismia sekä termisesti korkeissa lämpötiloissa (>1100°C) että katalyyttisesti matalissa lämpötiloissa (500-800°C). Katalyyttinen muodostuminen tapahtuu pääsääntöisesti tulis- tusvyöhykkeillä, missä tulistinputkien kerrostumat toimivat katalyytteina ja lämpötilojen osalta olo- suhteet ovat hyvät. Termisen muodostumisen rikkitrioksidi pitoisuus vaihtelee prosessin eri vaiheissa savukaasujen jäähtymisen vaikutuksesta, kunnes saapuessaan tulistinvyöhykkeelle sen pitoisuudet jälleen kasvavat katalyyttisen muodostumisen kautta. Muodostusmekanismiin on myös riippuvainen hapesta (O₂). Kun hapen pitoisuus on pieni (0-1 %), niin rikkitrioksidin muodostus on vähäisintä. Alhaisissa lämpötiloissa rikkitrioksidista muodostuu nopeasti kaasumaista rikkihappoa. (Raikko ym. 2002 346 – 348.)

Kaasumainen rikkihappo voi tiivistyä vesi- rikkihapposeokseksi laitoksen pinnoille, joiden lämpötila alittaa seoksen kastepisteen. Tila on riippuvainen rikkitrioksidin ja veden osapaineesta. Rikkitrioksidi pitoisuuden laskiessa kymmenenteen osaan, happokastepiste alenee noin 18°C. Kuvassa 8 on esi- tetty happokastepisteen ja rikkitrioksidin välinen logaritminen yhteys. Rikkitrioksidin vähentäminen ei logaritminen riippuvuuden vuoksi ole kannattavaa, joten paras keino välttää happokastepisteen ai- heuttamia korroosio-ongelmia on huolehtia kattilapintojen kastepisteen alittavista lämpötiloista. Al- haisen rikkipitoisuuden etuna on sen korroosiota hidastava vaikutus, jossa korroosionopeus on suo- raan verrannollinen rikkitrioksidipitoisuuteen. (Raikko ym. 2002, 348.)



KUVA 8. Happokastepisteen riippuvuus savukaasujen rikkiatrioksidipitoisuudesta (Raikko ym. 2002, 349.)

4.2 Typenoksidit

Typen oksideja (NO_x) syntyy, kun polttoaineen sisältämät orgaaniset typpiyhdisteet reagoivat hapen kanssa polttoaineen palaessa. Typen oksidien pääasiallisia lähteitä ovat liikenne, energiantuotanto ja teollisuuden prosessit. NO_x muodostuu typpimonoksidin (NO) sekä typpidioksidin (NO₂) yhdistymisestä. Laskennassa 95 % tai enemmän NO_x-päästöistä syntyy typpimonoksidista (NO) ja alle 5 % typpioksideista. Ilmakehässä typpimonoksidi (NO) hapettuu suhteellisen nopeasti ollen näin ympäristölle vaikutukseltaan samankaltaisia. Tunnetuimpia haittavaikutuksia NO_x-päästöistä ovat happamien laskeumien aiheuttamat haitat maaperälle sekä osallistuminen fotokemiallisen saastesumun ja otsonin muodostukseen tiheästi liikennöidyissä kaupungeissa. (Raikko ym. 2002, 300.)

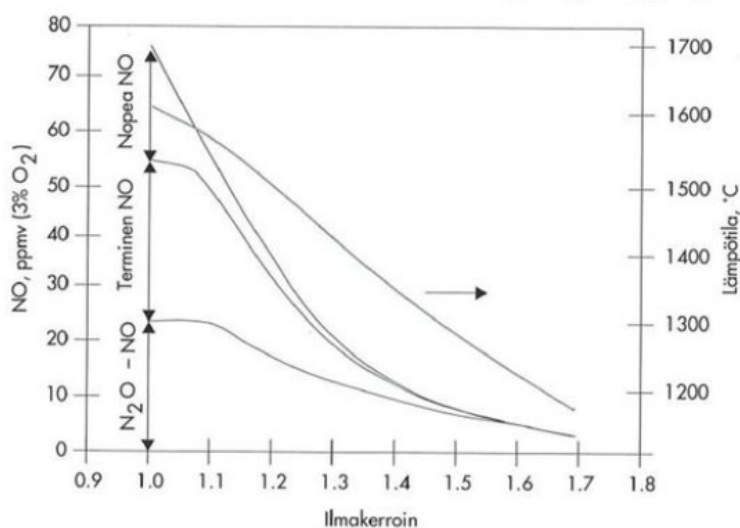
Polttoaineet sisältävät erilaisia määriä typpeä. Hiilen ja turpeen typpipitoisuus on noin muutaman prosentin ja öljy noin 0,7 %, puun typpi vaihtelee 0,1-0,5 % puun kuoren ja runkoosan välillä. Kuoressa olevan typen määrä on korkeampi. Yhdyskuntajätteen typpipitoisuus voi vaihdella suurestikin 1,0-5,0 %. Polttoilman typenmäärä on korkeampi suhteessa polttoaineen typenmäärään. Reaktiivisuuden vuoksi polttoaineen typpipäästöt ovat merkityksellisiä polttoaineen sisältämän typenmäärästä johtuen. Siksi typpeä sisältävien polttoaineiden päästöt ovat korkeampia kuin typettömistä polttoaineista aiheutuneet päästöt. (Raikko ym. 2002, 308 – 309.)

Vasta kun rikin oksidit oli saatu vähenemään, 1970-luvulla aloitettiin NO_x-päästöihin liittyvä tutkimus, johon syynä oli typen oksidien päästöjen kasvu. Dityppioksidin (N₂O) eli ilokaasuun alettiin kiinnittämään huomiota vasta vuonna 1980. Aluksi luultiin sen olevan haittavaikutuksiltaan merkityksetön. Kuitenkin ilokaasun huomattiin vaikuttavan ylemmän ilmakehän otsonituhon. Ilokaasun pitoisuus ilmakehässä on noin 0,3 % ppmv (volume parts per million) ja sen uskotaan lisääntyvän 0,2 % vuodessa. Ilokaasun eliniäksi on määritelty 150 vuotta, jonka takia sen haittavaikutuksetkin ovat pitkäkestoisia. Vanhoilla päästömittausmenetelmillä varsinkin hiilipoltossa saatujen korkeiden ilokaasupitoisuuksien syynä oli näytteen ottopussissa tapahtunut muodostuminen, kun vettä ja rikkidioksidia oli samassa tilassa. Leijupoltossa tapahtuvan typpimonoksidin (NO)

vähennyskeinoina käytettävä urean ruiskutus aiheuttaa myös ilokaasun muodostumista. (Raikko ym. 2002, 301.)

Poltossa tapahtuvaa NO-muodostusta tapahtuu kahdesta lähteestä eli molekyylyitypestä (N_2) sekä orgaanisesta tyyppistä (N), joka on sitoutuneena käytettävään polttoaineeseen. Typpimonoksidin (NO) muodostuminen molekyylyitypestä tapahtuu happiatomien ja molekyylyitypen reaktioketjun avulla, jota kutsutaan myös Zeldovichin mekanismiksi. Siinä muodostunutta typpimonoksidia kutsutaan termiseksi NO:ksi. Kun polttolämpötila pystytään pitämään alle 1400°C , termisen NO:n muodostuminen on vähäistä. Minimoimalla savukaasujen viiveaikaa voidaan termisen NO:n muodostumista vähentää. (Raikko ym. 2002, 304 – 305.)

Nopean NO:n syntymekanismi tapahtuu poltossa liekinpolttovyöhykkeellä, jossa polttoaineen palaminen on vielä kesken ja reaktiossa tarvittavia hiilivetyradikaaleja on läsnä. Tällöin reaktiossa syntyvät typpimonoksidit muodostuvat nopeasti. Nopea NO ei termiseen NO:hon verrattuna ole niin riippuvainen lämpötilasta. (Raikko ym. 2002, 306 – 307.) Kuvassa 9 on esitetty hapen O_2 ilmakertoimen ja lämpötilan vaikutus ilokaasun N_2O , typpimonoksidin NO, termisen NO:n ja nopean NO:n muodostumiseen.

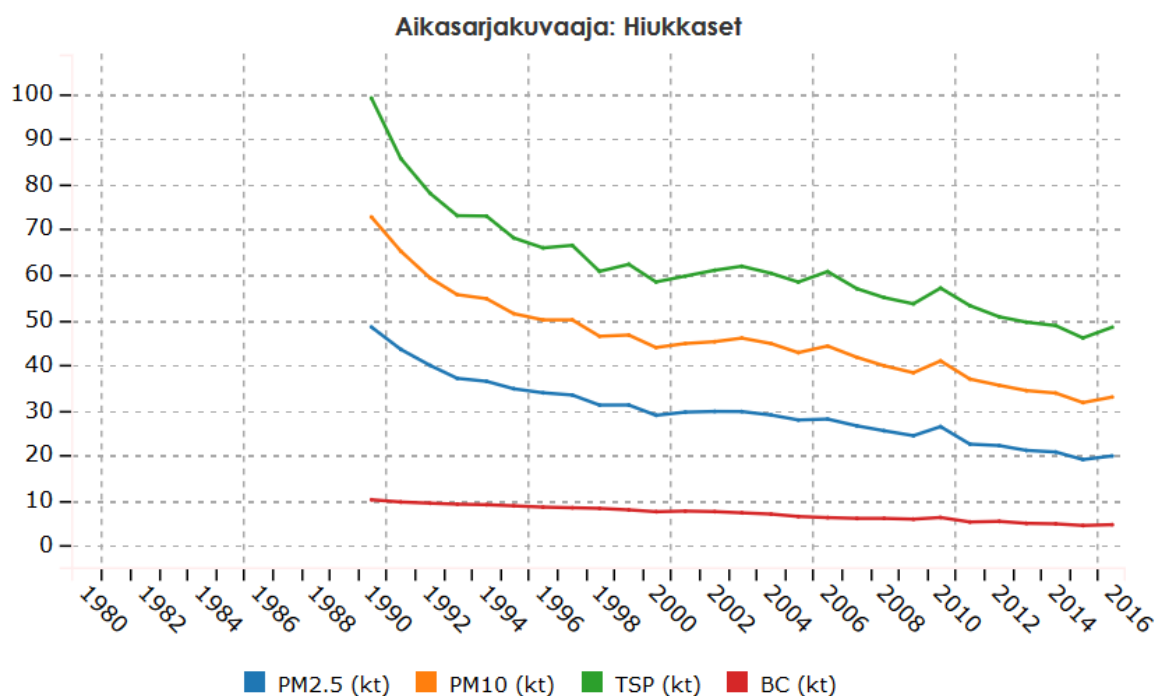


KUVA 9. Hapen O_2 , Ilmakertoimen ja lämpötilan vaikutus ilokaasun N_2O , typpimonoksidin NO, termisen NO:n ja nopean NO:n muodostumiseen. (Raikko ym. 2002, 308).

4.3 Hiukkaset

Ilmassa olevat hiukkaset ovat kaupunkiympäristössä suurelta osin peräisin liikenteestä ja hiekoitushiekasta. Ilmassa esiintyy myös teollisuus- ja voimalaitoksista peräisin olevia pöly- ja lentotuhkapäästöjä. Noin 60 % hiukkaspäästöistä on peräisin energiantuotannosta ja liikenteen osuus on noin 25 %. Liikenteen aiheuttamat hiukkaset syntyvät autojen renkaiden hiertymästä hiekoitushiekan kanssa. Varsinkin keväisin tapahtuva hiukkasten leijuminen on Suomen kokonaishiukkaspäästöistä noin 20 %. Kaikkien alle $2,5 \mu\text{m}$ ($2,5 \text{ PM}$) pienhiukkasten suurimpana aiheuttajana on puun pienpolto. Yli puolet $2,5 \text{ PM}$ päästöistä tulee juuri puun pienpoltoista. Pienhiukkaspäästöjen kehityksestä Suomessa on esitetty aikasarjakuvaaja kuvassa 10. Pienhiukkasten

terveysvaikutukset ova hyvin merkityksellisiä, koska pienhiukkasten sitomat hiilivedyt ja raskasmetallit aiheuttavat noin 1300 ennen aikaista kuolemaa ja satoja pysyviä keuhkoputkentulehduksia. (Ympäristö.fi.)



KUVA 10. Aikasarjakuvaaja hiukkaspäästöt (ympäristö.fi).

4.4 Raskasmetallit ja aerosolit

Pienen mutta merkittävän osan mittauksissa huomioon otettavista kaasukomponenteista muodostavat hiilimonoksidi (CO)-päästöt, raskasmetallipäästöt, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), dioksiinit ja furaani (PCDD/F) sekä polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH).

Tunnetuin päästötyyppi on hiilimonoksidi, joka tunnetaan ”häkänä”. Hiilimonoksidia muodostuu epätäydellisen palamisen yhteydessä happipitoisuuden ollessa alhainen. Polttoaineen palakoon ja tuhkapitoisuuden katsotaan vaikuttavan hiilimonoksidipäästöjen suuruuteen. Hiilimonoksidin katsotaan olevan myös eräänä komponenttina palamishyötysuhteen määrittämisessä. Häkä on terveydelle haitallista sen reagoitessa veren hemoglobiinin kanssa ehkäisten näin veren hapenkuljetusta. CO-päästöjen hallintaan vaikuttaa oikeanlaiset palamisolosuhteet.

Osa haitallisista kaasukomponenteissa on terveydelle vaarallisia myrkyllisyydestä ja karsinogeenisuudesta johtuen. VOC-yhdisteet sisältävät nestemäisessä muodossa tai kiinteänä yhdisteenä olevaa orgaanista hiiltä. Osan VOC-päästöistä ei katsota olevan terveydelle haitallisia. VOC-päästöt muodostuvat pääsääntöisesti liuottimista ja moottoripolttoaineista. Biopolttoaineet ja hiili sisältävät hyvin vähän VOC-yhdisteitä ja poltossa tapahtuva yhdisteiden vapautuminen onkin seurausta epätäydellisestä palamisesta.

Dioksiini ja furaani (PCDD/F)-yhdisteiden tiedetään aiheuttavan syöpää, mutaatiota ja useita muita sairauksia. PCDD/F-yhdisteiden vähennysmenetelminä käytetään erilaisia suodatustekniikoita kuten Sähkö- tai pusuodattimia ja huolehtimalla viipymääjasta. PDCC/F-yhdisteiden muodostuminen on voimakkainta lämpötilassa 250-450°C.

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH) ovat kemiallisia yhdisteitä, jotka karsinogeenisyyden takia aiheuttavat keuhkosyöpää. Biopohjaiset polttoaineet sisältävät näitä yhdisteitä hyvin vähän. PAH-yhdisteiden ehkäisymenetelminä voidaan käyttää viipymääjan lisäystä, yli-ilman käyttöä, palamisilmojen vaiheistusta ja happirikasta olosuhdetta.

Raskasmetalleilla tarkoitetaan metallialkuaineita, joiden tiheys on yli 5 g/cm³. Kaikista alkuaineista raskasmetallien osuus on noin 60 % ja ne ovat suurina määrinä myrkyllisiä. Metalliteollisuuden ja öljynpolton päästöt aiheuttavat valtaosan raskasmetallipäästöistä. Biopolttoaineiden sisältämät raskasmetallit jäävät yleensä tuhkan sekaan osan haihtuessa savukaasuihin. Raskasmetallipäästöjen haittana on niiden kiinnittyminen partikkelien pinnalle tai jääminen lentotuhkapartikkelien sisään aiheuttaen Kauko kulkeutuessaan ympäristölle ja terveydelle haittaa. (Kukkonen 2016, 42 – 45.)

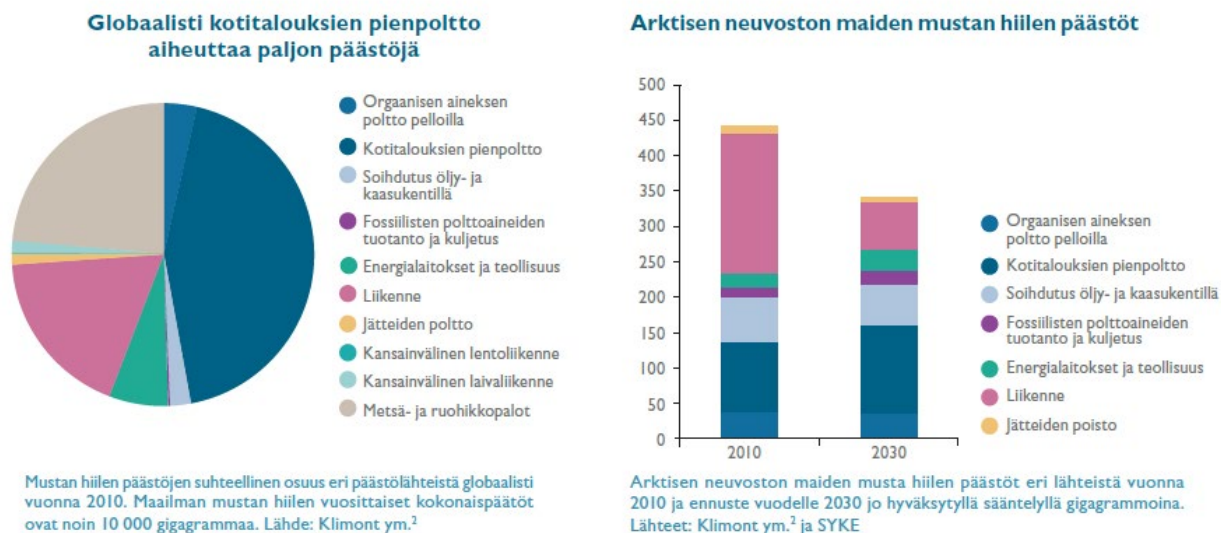
4.5 Musta hiili eli nokipöly

Mustaa hiiltä syntyy epäpuhtaan palamisen yhteydessä ja sen aiheuttajat ovat öljytuotannossa ylijäämäöljyn ja kaasun soihduttaminen, raskasta öljyä käyttävä laivaliikenne, energialaitokset sekä kiukaissa ja takoissa tapahtuva pienpoltto. Lisäksi on huomioitava metsäpalojen aiheuttamat mustan hiilen päästöt. Mustan hiilen päästöistä 60 % on peräisin Aasiasta. Pohjoismaista Suomi on pahin mustan hiilen päästäjä laskettuna henkeä kohti. Kuvassa 11 on esitetty globaalit pienpolton päästöt sekä arktisten maiden mustan hiilen päästöt. Arktinen alue lämpenee yli kaksi kertaa nopeammin kuin maapallon keskimäärin on arvioitu lämpenevän. Noin 25 prosenttia arktisen alueen lämpenemisestä johtuu mustasta hiilestä. Mustan hiilen koetaan aiheuttavan arktisten alueiden jäätiköiden sulamisen nopeutumisen. Musta hiili kulkeutuu arktisille alueille ja laskeuduttuaan jäätikön päälle nopeuttaa sulamista. Tutkimukset ovat osoittaneet myös mustan hiilen jäähtytävän vaikutuksen ilmassa ollessaan, estäen auringonvalon pääsyn sulattamaan jäätikköä. Mustan hiilen päästöjen yhteydessä ilmaan päätyy myös rikin yhdisteitä sekä orgaanista hiiltä (TOC), jotka viilentävät ilmastoa.

Viilentävät yhdisteet voivat olla haitallisia sekä ympäristölle että ihmisten terveydelle. Mustan hiilen yhtenä ympäristöä kuormittavana tekijänä voidaan pitää myös pienhiukkasiin tarttuneiden haitallisten kemikaalien kulkeutuminen luontoon. Mustan hiilen päästöjen vähentämisellä on, toisin kuin hiilidioksidilla, nopeat vaikutukset, koska musta hiili poistuu nopeasti ilmakehästä (päivistä viikkoon). Lisäksi mustan hiilen vähentämisessä on merkittävät terveyshyödyt. Arktinen neuvosto onkin asettanut tavoitteeksi vähentää mustan hiilen päästöjä vuoteen 2015 25-35 %. Maailmanpankki on tehnyt aloitteen soihduttamisen lopettamiseksi vuoteen 2030 mennessä.

Uusilla tekniikoilla on edellytyksiä vähentää mustan hiilen päästöjä. Suomessa onkin tutkittu mustan hiilen terveysvaikutuksia ja kehitetty keinoja pienpoltossa tapahtuvan mustan hiilen vähentämiseksi. Pienpoltolla tarkoitetaan kotitalouksien takkojen ja saunankiukaiden käyttöä. Tehokas keino jokaisessa taloudessa onkin

pienpolton toteuttaminen laadukkailla polttopuilla ja oikeanlaisella sytytystekniikalla. (Hilden, Kuparinen, Forsius ja Salonen 2011.)



KUVA 11. Globaalit pienpolton päästöt sekä arktisten maiden mustan hiilen päästöt (Hilden ym. 2011).

5 KATTILALAITOKSET JA POLTTOTEKNIIKAT

Toiminnanharjoittajan tulee polttotekniikkaa valittaessa olla perillä eri polttotekniikoiden vaikutuksesta syntyviin savukaasuihin. Laitoksen koon optimoinnilla on myös suuri merkitys. Oikein mitoitetulla laitoksella on helpompi pysyä määritellyissä päästöarvoissa. Valittaessa polttotekniikkaa tulee ottaa huomioon käytettävän polttoaineen ominaisuudet, saatavuus ja soveltuvuus eri polttotekniikkoihin. Seuraavaksi kuvataan eri polttotekniikat sekä kerrotaan päästöjen vähentämiseen vaikuttavista tekniikoista.

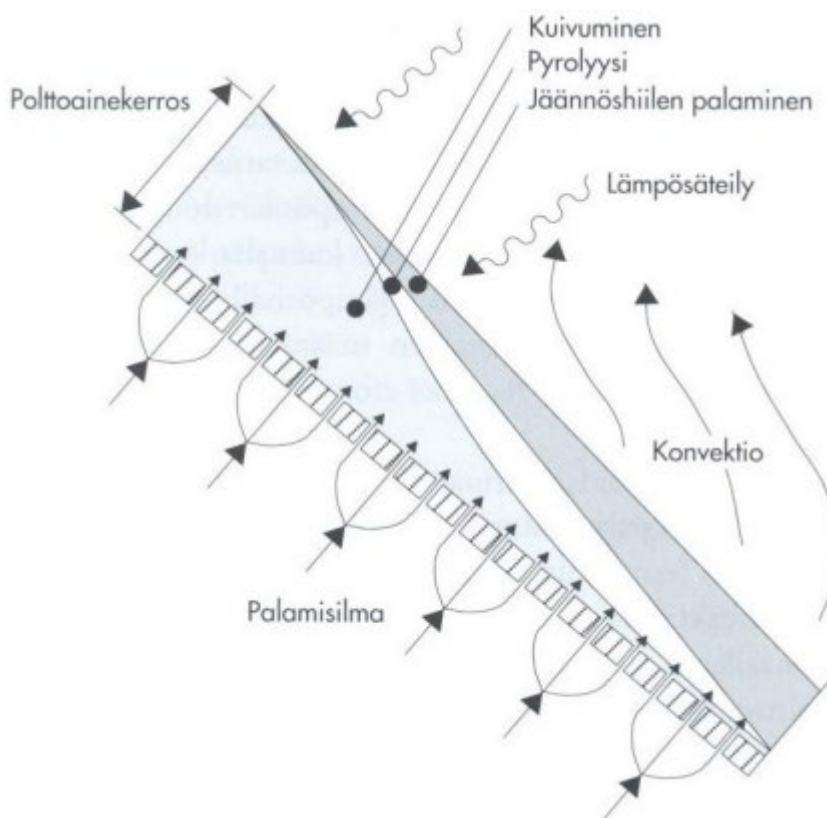
5.1 Arinapoltto

Arinatekniikka on alun perin kehitetty kivihiilen polttoa varten. Nykyään sitä sovelletaan paljon biomassan polttoon 2...30 MW tehoalueella. Alle 10 MW teholuokassa arinapoltto on edelleen yleisin puun ja palaturpeen polttomenetelmä. Arinoiden ja niihin liitettyjen tulipesien rakenteet vaihtelevat paljon kattilan koon ja polttoaineen mukaan. (Flyktman, Flyktman, Impola ja Linna ym. 2012, 16.)

Arinapoltoissa yleisesti tulipesään syötetään polttoainetta kuivatusvyöhykkeille, jossa polttoaine kuivuu arinoiden alta tulevan primääri-ilman puhalluksen ja tulipesän säteilylämmön seurauksena. Kuvassa 13. on esitetty polttoaineen palamisvaiheet arinalla sekä ilman vyöhykkeet. Liikkuvien ja kiinteiden arinoiden aikaansaaman polttoaineen liikkeen seurauksena kuivunut polttoaine siirtyy kohti paloaluetta, missä polttoainekerros on ohuin. Onnistuneen palamisen aikaansaamiseksi arinoiden viimeisellä rivistöllä pyritään pitämään ns. tuhka-valli, joka estää myös polttoaineen ryöpsähdykset tuhkanpoistoon. Polttoaine syötetään arinalle koko sen

leveydeltä tasaisena kerroksena. Tämä on ensiarvoisen tärkeää palamisen hallitsemiseksi, koska polttoaine sekoittuu leveyssuunnassa vain vähän. Kaasujen sekoittuminen on leijupolttoon verrattuna tehottomampaa, mikä lisää epätäydellisen palamisen seurauksena syntyvien päästöjen riskiä. (Flyktman ym. 2012, 16.)

Kuivatuksessa ja palamisessa syntyvien kaasujen palamista tehostetaan tarvittaessa sekundääri- ja tertiääri-ilman syötöllä tulipesän eri vaiheissa. Arinapolton vaikeudet liittyvät yleensä polttoaineen tasalaatuisuuteen ja kosteuspitoisuuksiin. Nykytekniikalla arinalla voidaan polttaa laadultaan vaihtelevia polttoaineita tehokkaasti. Erityisrakenteisilla polttimilla kosteusalue ulottuu 65 % saakka ja palakoon ylärajan määrää ensisijaisesti polttoaineen syöttötekniikka. Voimakkaiden palamisilmojen puhalluksen seurauksena konvektiopinnoille kertyneet tuhka ja pienhiukkaset aiheuttavat jatkuvaa savukaasujen lämpötilan seuranta ja riittävästä nuohouksesta huolehtimista. Puutteina ovat mm. hitaat säätöominaisuudet ja liikkuvien arinarautojen huollontarve. Käyttökelpoinen säätöalue on tavallisesti 20...100 prosenttia nimellistehosta. Arinapolttolaitokset ovat säädettävyydeltään suhteellisen yksinkertaisia. (Flyktman ym. 2012, 17.)



KUVA 13. Polttoaineen palamisvaiheet arinalla (Raikko ym. 2002, 467).

Arinoiden ja niihin liitettyjen tulipesien rakenteet vaihtelevat paljon kattilan koon ja polttoaineen mukaan. Pääjaottelu puupolttoaineille ja palaturpeelle voisi olla kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina (liikkuvat arinaraudat), mekaaninen tasoarina ja pyörivä kekoarina. Arinat ovat usein em. päätyyppien yhdistelmiä ja ne eroavat toisistaan mm. arinamateriaalien ja jäähdytystapojen osalta. Pienet arinat jäähdytetään useimmiten primääri-ilmalla ja suuret arinat kattilaan kytketyllä vesikierrolla. Kattilan omakäytösähköön tehontarve on pieni leijutuspoltttoon verrattuna. Jauhemaisista polttoaineista sopivat käytettäviksi sahanpuru ja kutterinlastu kuoren tai muun palamaisen polttoaineen seassa. Metsätähdehake, palaturve ja

laatuluokkien A ja B käytetty puu hakkeena tai murskeena sopivat rinnakkaispolttoon, pienenä energiaosuutena myös silputtu peltobiomassa. Puupellettiä voidaan käyttää tukipolttoaineena kostean pääpolttoaineen kanssa. Jyrsinturve ei sovellu käytettäväksi arinakattiloissa. Valtaosa tuhkasta poistuu arinan läpi, mistä syystä savukaasujen hiukkaspuhdistimeksi riittää useimmiten syklonierotin alle 5 MW teholuokassa.

Kuvassa 14 on esimerkki suomalaisesta kekoarinasta, jossa leveyssiuntainen sekoitus on toteutettu jakamalla arina sylinterimäisiin vyöhykkeisiin, joista joka toinen pyörii. Polttoaine syötetään syöttöruuvilla alaspäin arinan keskelle kekoon, josta polttoaine leviää ulkokehälle palamisvyöhykkeelle. Tuhkanpoisto tapahtuu ulkokehältä tuhka-arinoiden kautta. Poistunut tuhka menee arinoiden alla olevaan vesialtaaseen, jossa pyörivä kaapija kuljettaa tuhkan kolakuljettimelle. (Flyktman ym. 2012, 17.)



KUVA 14. Kosteiden polttoaineiden arinapoltin (MW Power). (Flyktman ym. 2012, 17).

5.1.1 Päästöjen vähennys arinapoltossa

Merkittävimpinä keinona arinapoltton päästöjen vähentämiseen on palamisen hallinta ja siinä poltto-olosuhteiden luominen sellaiseksi, ettei epätäydellistä palamista pääsisi syntymään. Epätäydellisen palamisen seurauksena varsinkin hiilimonoksidi CO ja hiilivetypäästöt, kuten metaani CH₄, kasvavat. Syynä epätäydelliseen palamiseen on useasti lämpötilojen erot eri palamisvyöhykkeillä ja tulipesässä. Kaasujen sekoittuminen arinapoltossa on esimerkiksi leijupolttoon verrattuna varsin tehotonta johtuen huonosta polttoaineen sekoittumisesta ja arinan tehon ollessa pienempi pinta-alayksikköä kohti. Puhtaamman palamisen aikaansaamiseksi tulipesän muodolla pyritään saamaan viipymäaika mahdollisimman pitkäksi tehostaen näin prosessia. Arinapoltton säädettävyys jatkuvatoimisilla mittauksilla on vaikeaa, jolloin säätöpiirinä usein toimiikin tehollinen ilmojen säätö.

Rikin (SO₂) hallinta arinapoltossa on ollut lähinnä arinapolttolaitoksilla, joilla polttoaineena on ollut hiiltä. Silloin päästöjen rajoittamisen keinoina on käytetty niin sanottuja sekundäärisiä menetelmiä, missä haitalliset rikkipäästöt on saatu hallintaan asennetuilla savukaasujen puhdistusmenetelmillä. Tästä syystä juuri leijupolttolaitosten yleistynyt hiilenpoltossa. Arinapoltossa rikinsidontaa on kokeiltu ketjuarinakattiloissa, joissa kalsiumhydroksidin Ca(OH)₂ injektiolla tuloksissa olosuhteiden ollessa mahdollisimman hyvät, on päästy tasolle 30...60 %, mikä useinkaan ei ole ollut riittävä. (Raikko ym. 2002 480.)

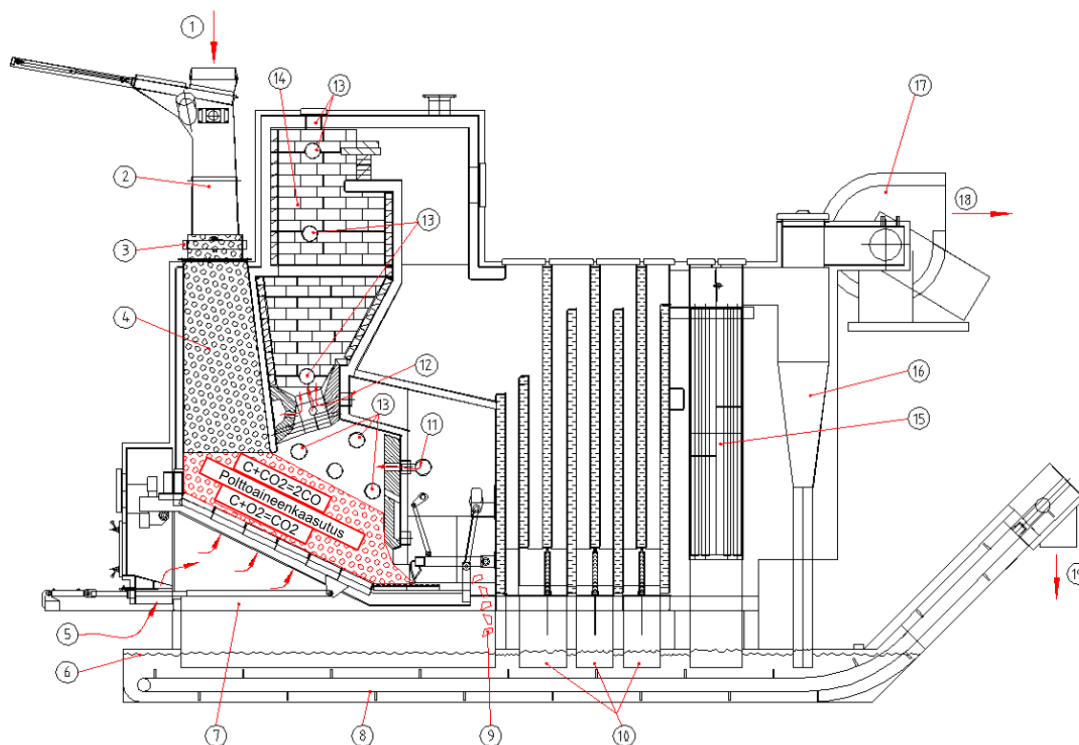
Typpioksidipäästöjen muodostuminen polttoaineen sisältämän typen ja korkeammassa lämpötilassa syntyvän palamisilman typen hallintaan pystytään parhaiten vaikuttamaan luomalla palamisolosuhteet mahdollisimman hyviksi ja huolehtimalla palamisilmojen suhteesta. (Raikko ym. 2002, 479 – 480).

5.1.2 Arinakattilan ylösajo

Arinakattilan ylösajo tapahtuu aloittamalla laitoksen koestukset. Tällöin tarkastetaan, että puhaltimet, arinat, mittaukset ja polttoaineensyöttö varmasti toimivat. Lämmitys aloitetaan tulipesän muurausten kuivatuslämmityksellä. Riittävän pitkän ja varovaisen ylösajon tarkoituksena on varmistaa muurausten hidas lämpeneminen. Jos muurauksia on esimerkiksi korjattu, tulee tasaiseen lämmönnostonopeuteen kiinnittää erityistä huomiota, mahdollisen kiteytyneen veden poistumiseksi. Lämmitys tapahtuu asettamalla ns. halkotulet. Etukäteen on kuitenkin ajettu pieni määrä kiinteää polttoainetta arinalle kuivumaan. Tässä vaiheessa eivät arinat ole vielä toiminnassa. Laitoskohtaisesti alussa saatetaan käyttää savukaasupuhallinta riittävän alipaineen saamiseksi. Kun halkotulet ovat loppuneet ja polttoaineen syöttö on aloitettu, lisätään palamisilmoja samalla seuraten tulipesän lämpötilan kehitystä. Useille kattiloille sopivana lämpötilan nostonopeutena voidaan pitää 100°C tunnissa. Vaikka erikoistilanteiden aikaiset päästöt eivät kuulu mittausten piiriin, tulee ylösajo suorittaa mahdollisimman puhtaana polttona. Siksi ylösajoon tulee varata mahdollisimman laadukasta polttoainetta.

5.2 Kaasutuspolttokattila

Arinalle syötetään kaasutuspolttossa polttoainetta, joka palaessaan muodostaa hiilikerroksen. Hiilikerros, jonka paksuus voi olla 800 mm, pysyy paikallaan vakiopaksuisena. Arinoilla ei säädetä palamista vaan arinat ikään kuin höyläävät palanutta tuhkaa polttoaineen alapinnasta. Palamisen säätö tehdään säätämällä palamisilmoja automaattisesti. Palamisen säätöalue on erittäin laaja alkaen minimiteholla noin 10 %. Polttoaineen laadun ollessa hyvä tehoa voidaan nostaa 120 - 130 %. Suuresta lämpömassasta huolimatta kattila seuraa tehontarpeen muutoksia nopeammin kuin arinapoltossa. Hiilikerroksen päällä on vielä noin 2000 mm korkea kerros polttoainetta, jolloin kattilan polttoaineen häiriöalttius pienenee. Kaasutuskattilan osat on esitetty kuvassa 15 Etuna paksulle hiilikerrokselle on myös polttoaineen kosteusvaihtelun pieni vaikutus palamiseen. Häiriötilanteessa kattila voidaan ajaa niin sanottuun tyhjäkäyntitilaan, jolloin kattila säilyy toimintavalmiina jopa 3 vuorokautta. (Laatukattila.fi.)



- | | | |
|---|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Polttoaine | 8. Tuhkakuljettimen kolat | 15. Luvo (palamisilman lämmitys) |
| 2. Polttoainesiilo | 9. Kuonan poisto arinan takaosasta | 16. Savukaasupuhdistin |
| 3. Polttoainesiilon alaosan sulkuluukut | 10. Konvektio-osan tuhkapoisto | 17. Savukaasupuhallin |
| 4. Polttoainemakasiini | 11. Toisioilma | 18. Puhdas savukaasu |
| 5. Ensiö- / kaasutusilma | 12. Tertiääri-ilma | 19. Tuhkanpoisto tuhkakonttiin |
| 6. Tuhkakuljettimen veden pinta | 13. Palamisen tarkastusikkunat | |
| 7. Tuhkanpoisto arinalta | 14. Bio-kaasun polttokammio | |

KUVA 15. Kaasutuskattilan osat. (Laatukattila.fi).

Arina ja tulipesän kaasutus on vaiheistettu kahteen vaiheeseen, joissa primääri-ilma syötetään arinan läpi alhaalta paksuun hiilikerrokseen kunnes happi on palanut. Tällöin happi on muuttunut hiilidioksidiksi



jonka jälkeen tapahtuu pelkistysreaktio, missä hiilidioksidi reagoi hiilen kanssa synnyttäen häkää



Kun palamattomat kaasut nousevat hiilikerroksesta, syötetään prosessiin sekundääri-ilmaa, jolloin palavat kaasut nousevat ns. kuristuskammioon, jossa palamisen tehostamiseksi syötetään tertiääri-ilmaa useasta suunnasta. Tässä vaiheessa kaasut ovat palaneet loppuun, jolloin kaasut menevät ns. jälkipolttotulipesään, siellä palamattomien kaasujen ja hiukkasten määrää voidaan vähentää ja viipymäaika lisätä.

Ensimmäisen palamisen aikana hiilikerros toimii suodattimena, joka suodattaa kaasuista palamisen mukaan lähtevän tuhkan, jolloin tulipesään tuhkaa tulee kaasuvirran mukana vain pieni määrä, noin 2 %. Loppu

tuhka poistuu tuhkanpoistolaitteiston kautta. Savukaasujen hiukkaspitoisuudeksi on mitattu 50 mg/nm³, minkä ansiosta nuohousväli on saatu pidemmäksi. (Laatukattila.fi.)

5.2.1 Kaasutus sovellukset

Puun kaasutustekniikoita on kehitetty liki 100 vuotta, prosessin hallinnassa on ollut kuitenkin ongelmana hallitun riittävän puhtaan kaasutusprosessin aikaansaaminen. Ongelmia ovat vähentäneet kaupallisten ratkaisujen yleistyminen. Poltossa käytettävän puun laatuvaatimukset ovat tästä syystä korkeat.

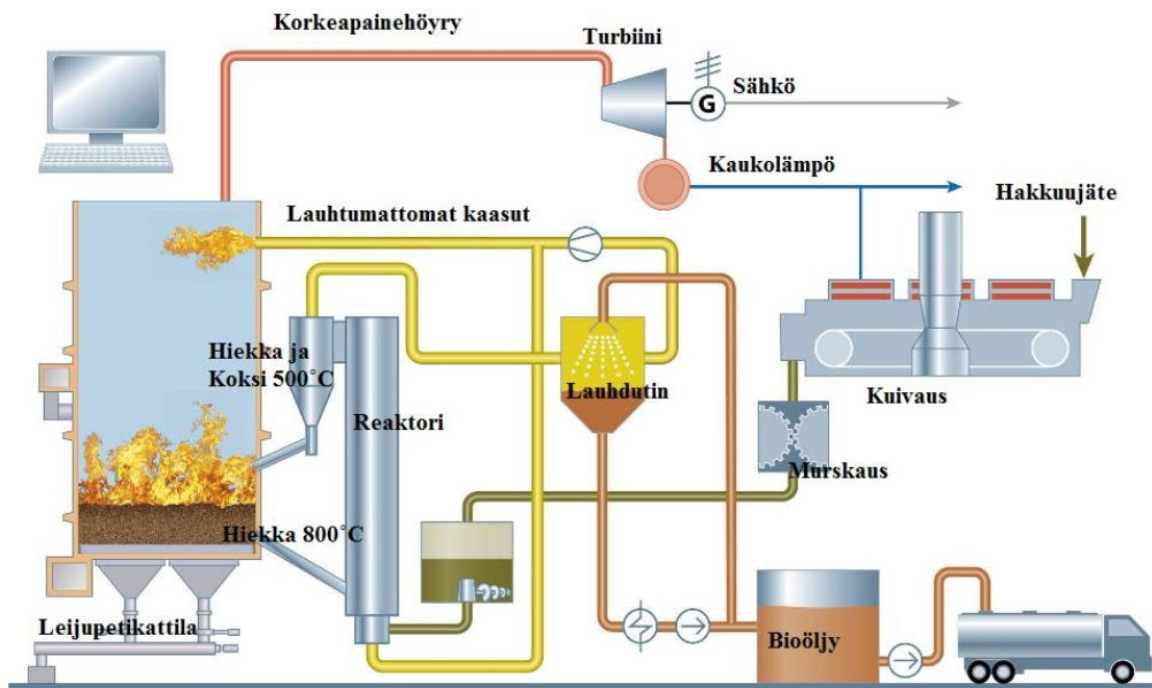
Puhtaan palamisen aikaansaamisen suurimpana ongelmana moottorien kestävyydelle on ollut pyrolyysiprosessissa syntyvä terva, jonka takia moottorit eivät ole kestäneet pitkäaikaisessa käytössä. Perinteisissä kaasutusprosesseissa käytettiin kuorittua koivupilkettä, ettei ”kuori terva” pilaisi moottoria.

Pyrolyysiprosessissa biomassaa kaasutetaan korkeassa lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Palokaasujen puhdistuksen jälkeen noesta, hiilestä sekä hiukkasista syntyvä kaasu on käytettävissä hyötysuhteeltaan tehokkaasti esimerkiksi polttomoottorissa. Laitokset, jotka hyödyntävät pyrolyysiprosessia, tuottavat tyypillisesti lämmön lisäksi sähköä (CHP eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto Combined Heat and Power). Pyrolyysiprosessissa syntyvän kaasun etuna katsotaan olevan sen puhdas palaminen, tästä syystä kehittäely tuottaa erittäin ympäristöystävällistä energiaa.

Eräs pyrolyysiprosessin teknologioista on myötävirtakaasutin, jossa kaasutettava biomassa kulkee samansuuntaisesti kuin poltossa tarvittava palamisilma. Palamisilman määrä on saatu mahdollisimman pieneksi. Prosessissa saadaan aikaisempiin tekniikkoihin verrattuna korkeampi polttolämpötila (800-1200°C), jolloin prosessissa syntyvät tervayhdisteet hajoavat kevyemmiksi jakeiksi. Hiukkaspäästöjen määrä on prosessissa saatu myöskin pieneksi. (Gasek.fi.)

5.2.2 Pyrolyysiöljy

Pyrolyysiöljyn poltosta on pyritty saamaan fossiilisten öljyjen korvaajaa ja sen kehitystyö on varsin nuorta Suomessa. Kuvassa 16 on esitetty integroidun pyrolyysiöljyn valmistusreaktorin toiminta. Kaupallisten poltto-sovellusten kehitys on vielä toistaiseksi ollut vaikeaa pyrolyysiöljyn poltossa tapahtuvan hallittavuuden takia. Öljyn terveydelliset haitat aiheuttavat myös vaikeuden prosessin tarkkailulle ja turvalliselle käytölle. Testiolosuhteissa ja suuremman luokan poltossa on kuitenkin saatu lupaavia kokemuksia. Pyrolyysiöljyn ominaisuudet poikkeavat huomattavasti esimerkiksi kevyestä polttoöljystä (Taulukko 2). Ulkoiselta olemukseltaan pyrolyysiöljy muistuttaa tervaa (Kuva 17).



KUVA 16. Joensuun laitoksen pyrolyysiprosessi (Mankonen 2014, 21).



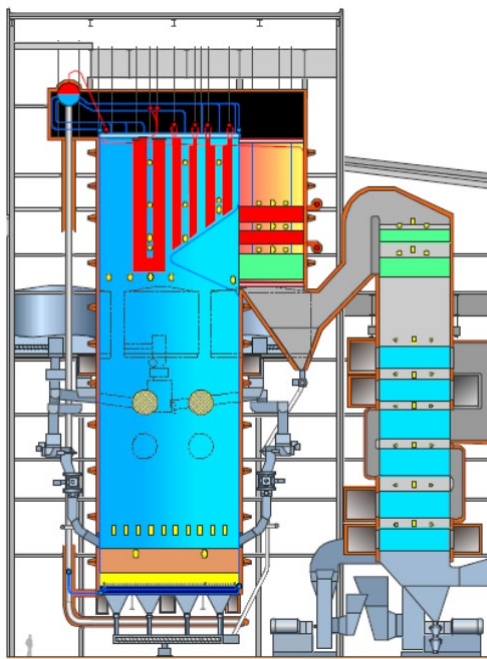
KUVA 17. Pyrolyysiöljy on olemukseltaan tervamaista (Palo 2009, 7).

Kevyt polttoöljy	Biopolttoöljy
Tislautuvuus 180-360°C välillä	Ei tislaudu kokonaisuudessaan
Alkaaneja 70%	Ligniinin hajoamistuotteita
Aromaatteja 30%	Aldehydejä
Ei vettä	Vettä 20-25%
	Karboksyylihappoja
	Hiilihydraatteja
	Ketoneja
	Fenoleja
	Alkoholeja
Ei kiintoaineita	Hiiltojäännöstä 1-3%
	Tuhkaa 0,1-0,2%
Hiili 86%	Hiili 40%
Vety 14%	Vety 8%
Happi 0%	Happi 52%
Stabiili ilmassa	Epästabiili ilmassa

TAULUKKO 2. Kevyen polttoöljyn ja biopolttoöljyn ominaisuuksien vertailu (Palo 2009, 7).

5.3 Kerrosleijupolttolaitos

Kerrosleijupolttokattilan toimintaperiaate on että kattilan tulipesän pohjalle syötetty hiekka kuumennetaan ja laitetaan leijumaan primääri-ilmapuhalluksen avulla. Tulipesän alla on ilmalaatikko, jonne primääri-ilma johdetaan. Sieltä ilma puhalletaan tattimaisten suuttimien kautta hiekkakerrokseen, jota kutsutaan hiekkapediksi. Tällöin hiekka alkaa leijua. Oikeanlaisen leijutuksen aikana hiekka kuplii aaltomaisesti muistuttaen vedenkiehumista, josta nimitys kuplapetikattila. Kuvassa 18 on havainnekuva kuplapetikattilasta. (BFB, Bubbling Fluidized-Bed). Polttoainetta syötetään pudotusputkien kautta leijuvaan hiekan sekaan, jossa palaminen tapahtuu. Palamisen tehostamiseksi tulipesässä voi olla palamisilman puhalluksia useissa kerroksissa sekundaari-ilma, tertiääri-ilma ja polttoaineen syöttöjä myöhemmissä palamisvyöhykkeissä. Tulipesän seinät toimivat yleisimmillään lämmönluovutuspinnoina ja niissä kiertää vesi. (Hanski 2018, 18.)



KUVA 18. Kuplapetikattilan (BFB) (Kukkonen 2016, 20).

Tyypillisesti kerrosleijukattilat on teholuokaltaan 10 MW:sta ylöspäin. Joitain toteutuksia on ollut myös 2 MW teholuokassa. Polttoaineena kerrosleijukattiloissa käytetään biopohjaisia polttoaineita kuten metsähaketta, kuorta, sahanpurua sekä jyrsinturvetta. Tukipolttaineina on käytetty kutterinlastua, puupellettiä, murskattua palaturvetta sekä käytöstä poistettuja rakennusjätepuuta laatuluokasta A sekä yli 20 MW laitoksissa on käytetty laatuluokan B puuta. Pellettiä käytetään huonolaatuisen polttoaineen tukipolttaineena hyvien palamisolosuhteiden aikaansaamiseksi. Samalla kattilan tehon säädettävyys paranee. Haittana pidetään pelletin aiheuttamaa lisääntyneitä sintraantumiseriskiä. Säädettävyydeltään kiertopetikattila on 20...100 % nimellistehosta. Säättöalueen alapäähän vaikuttaa hiekkapedin leijutuksen vaikeus pienillä primääri-ilma puhalluksilla. (Flyktman ym. 2012, 15 – 16.) Leijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja on esitetty taulukossa 3.

Tilavuusrasitus	0,1 – 0,5 MW/ m ³
Poikkipintarasitus	0,7 – 3,0 MW/ m ³
Petin painehäviö	6,0 – 12,0 kPa
Leijutusnopeus	0,7 – 2,0 m/s
Primääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Petin lämpötila	700 – 1000 °C
Loppulämpötila	700 – 1000 °C
Sekundääri-ilman osuus	30 – 70 %
Ilmakerroin	1,1 – 1,4
Petin tiheys	1000 – 1500 kg/ m ³

TAULUKKO 3. Leijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen, Kettunen, Nurminen ja Pekkanen 2000, 159.)

Hiekkapedin tilaa seurataan sekä paine-eromittauksilla että lämpötilamittauksilla. Pedin lämpötila riippuu käytettävästä polttoaineesta ja petimateriaalista. Polttoaineiden tuhkan käyttäytyminen on aina erilaista sekä luonnonhiekkojen että masuunikuonasta valmistettujen granulien lämpötilan kestosta johtuen. Reagointi alkaliain kanssa on riippuvainen petimateriaalin ominaisuuksista kuten niiden kvartsipitoisuudesta. Petimateriaalin sintraantumista seurataan petimateriaalin vaihdon yhteydessä sekä leijutusta ja paine-eroa seuraamalla. Liian iso polttoaineen palakoko ja hakkuutähteiden mukana kulkeentuneet kivet ja maa-ainekset aiheuttavat sintraantumiseriskistä, jolloin ainekset sitoutuvat toisiinsa ja aiheuttavat huonon leijutuksen. Seurauksena voi olla ennen aikainen alasajo ja kiintoainesten poistaminen tulipesästä. Petimateriaalin lämpötila pyritään pitämään noin 100°C tuhkansulamislämpötilaa alempana. (Hanski 2018, 20.)

Suodatustekniikkoina kerrosleijupoltossa käytetään sykloneita, sähkösuodattimia, pesureita ja letkusuodattimia. Kerrosleijupoltossa lähes kaikki kiintoaines poistuu savukaasuvirrassa, jolloin syklonin tukkeutumisen vaara on mahdollista esimerkiksi turpeen suuresta tuhkapitoisuudesta johtuen. Päästöihin vaikuttavina menetelminä käytetään kerrosleijupoltossa primäärisiä sekä sekundäärisiä menetelmiä. Näitä ovat lämpötilan ja polttoaineen vaiheistus, kiertokaasu sekä palamis-ilmojen säätö. Rikinpoistossa polttoaineen joukkoon syötetään dolomiittia ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) tai sammutettua kalkkia $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sekundäärisinä menetelminä käytetään ammoniakki (NH_3)-tai urea ($\text{OC}(\text{NH}_2)_2$)-ruiskutusta.

5.3.1 Kerrosleijupolton ylösajo

Kerrosleijupolton ylösajo tapahtuu aloittamalla petimateriaalin lämmitys starttipolttimilla, jotka voivat olla niin kaasu- kuin öljykäyttöisiä. Starttipolttimet sijaitsevat pedissä tai sen yläpuolella. Hiekkapedin lämpötilan kohoamista riittävän korkealle (500 - 600°C) voidaan varmistua hyvästä polttoaineen syttymisestä. (Hanski 2018, 19).

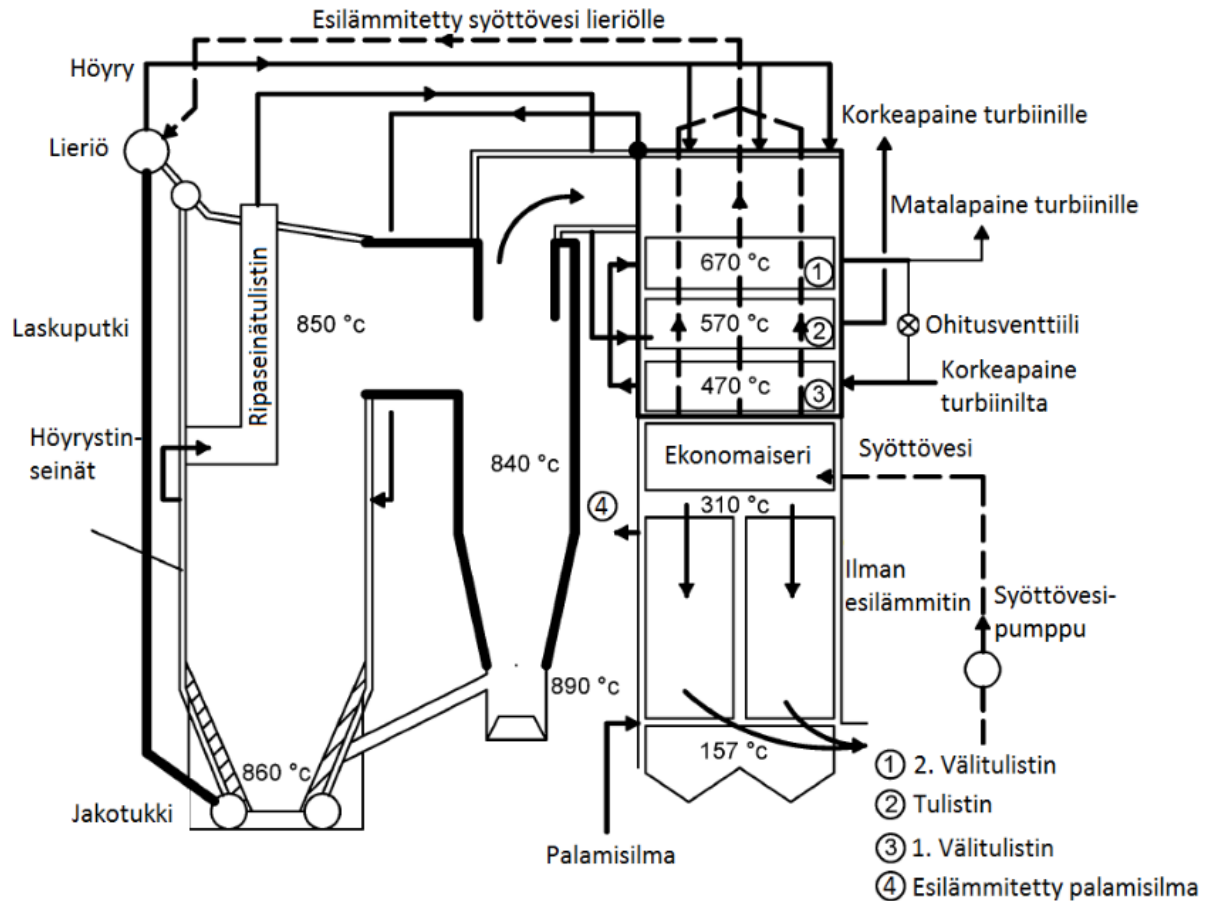
5.4 Kiertoleijupoltto

Kiertoleijupetikattila (CFB, Circulation Fluidized-Bed) on suomalainen innovaatio, jossa poiketen kerrosleijupoltosta, petimateriaali kulkeutuu palamisilmojen vaikutuksesta myöhempään palamisvyöhykkeisiin, josta petimateriaali erotetaan syklonin avulla takaisin polton alkuun. Etuna kiertoleijutuksessa on petimateriaalin jatkuva tarkkailu, jolloin mahdollinen sintraantumiseriski pienenee. Kiertoleijupedin etuna on se, että voidaan käyttää vaikeita polttoaineita esimerkiksi jätteenpoltossa, jossa kiertoleijutus on osoittautunut jätteenpoltton haasteellisuudesta huolimatta hyväksi. Kiertoleijupetikattilaan polttoaineen syöttö tapahtuu syklonista palaavan hiekan joukossa tai kattilan etuseinän kautta. Tuhka poistuu kattilan alakautta. Kevyt hienojakoinen tuhka poistetaan savukaasuvirrasta sähkösuodattimella tai letkusuodattimella. Palamista ohjataan eri korkeuksilla olevilla sekundääri- sekä tertiääri-ilmoilla.

Kiertoleijupetikattilan etuna on sen alhainen polttolämpötila, jolloin syntyvien haitallisten typenoksidien NO_x -päästöjen määrä on vähäisempää. Lisäksi palamisen viipymäaika on saatu kiertoleijupetikattilassa pitkäksi. NO_x -päästöjä voidaan lisäksi alentaa ammoniakkiruiskutuksilla. Kiertoleijupedissä rikinpoisto tapahtuu polttoon syötettävän kalkin avulla. Kalkki muuttuu kipsiksi ja poistuu tuhkan mukana. Hyötysuhdetta lisää syklonin kautta polttoon palaavat palamattomat partikkelit. (Hanski 2018, 22 – 23.)

5.4.1 Kiertoleijupolton ylösajo

Kiertopetikattilan ylösajo tapahtuu esilämmittämällä petiä öljy tai kaasu starttipolttimilla. Kuvassa 19 on esitetty kierteleijupetikattilan pääosat, prosessinkuvaus ja toimintalämpötilat.



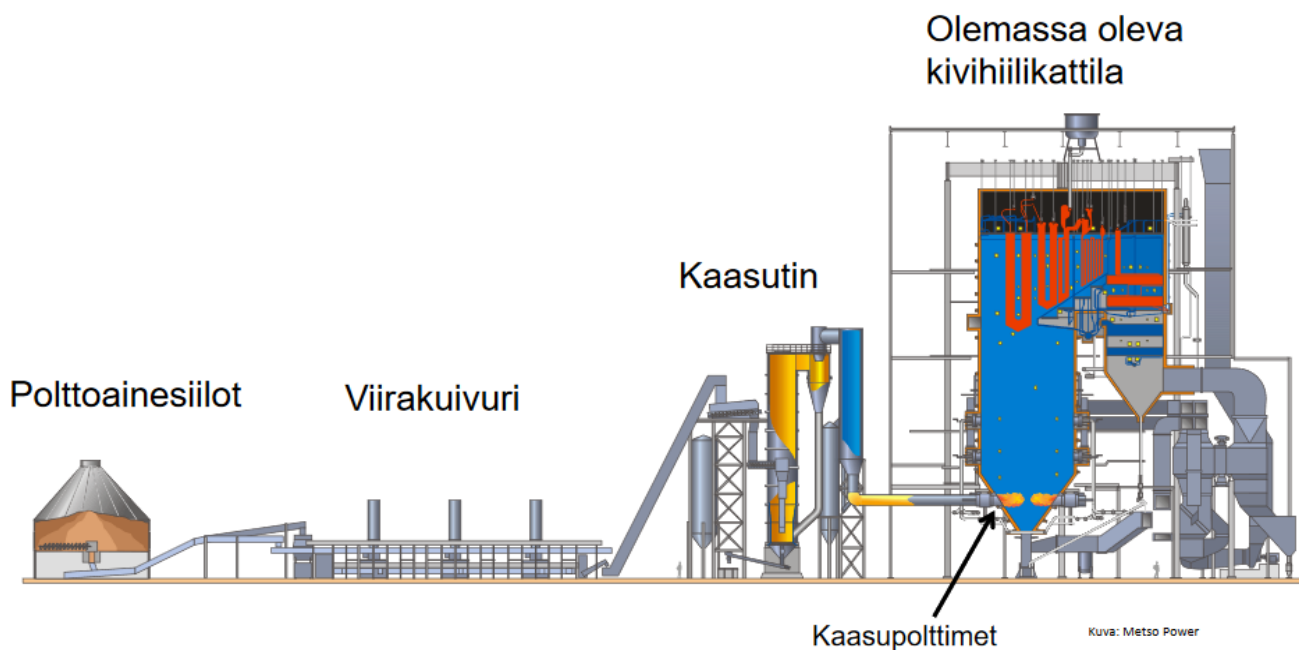
KUVA 19. Kiertoleijupetikattilan pääosat (Kukkonen 2016, 23).

Taulukossa 4 on kuvattu kierteleijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja.

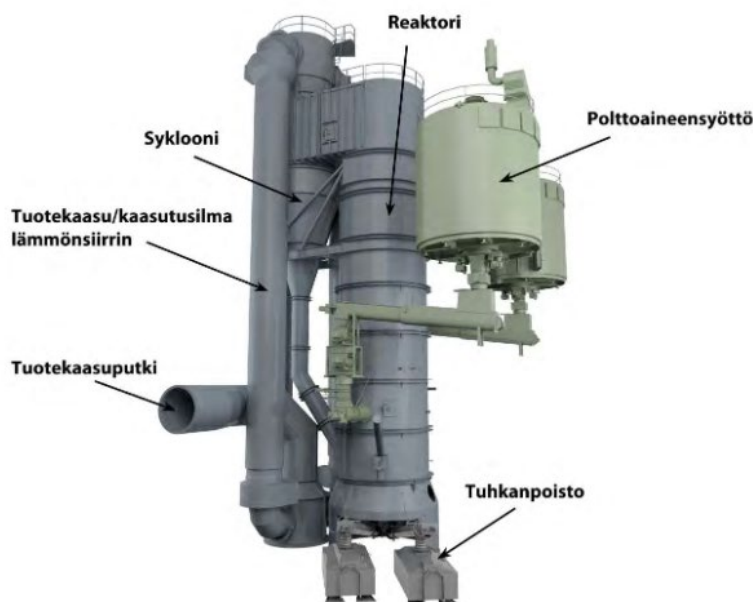
Tilavuusrasitus	0,1 – 0,3 MW/ m ³
Poikkipintarasitus	0,7 – 5,0 MW/ m ³
Petin painehäviö	10,0 – 15,0 kPa
Leijutusnopeus	3,0 – 15,0 m/s
Primääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Petin lämpötila	800 – 950 °C
Loppulämpötila	850 – 950 °C
Sekundääri-ilman osuus	25 – 65 %
Ilmakerroin	1,1 – 1,3
Petin tiheys	10 – 100 kg/ m ³

TAULUKKO 4. Kiertoleijupetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen ym. 2000, 161).

Mahdollisissa polttoaineen muutoksissa, esimerkiksi siirryttäessä kivihiilestä biomassojen käyttöön, on olemassa mm. viirakuivaimella toimiva kaasutusreaktori. Kuva 20 on havainnekuva bioöljyprosessista, jossa biomassa saadaan kuivatuksen jälkeen kaasutettua olemassa olevaan laitokseen. Kuvassa 21 on kiertoleijupeti-kaasutin, jonka toiminta perustuu kiertoleijutukseen.



KUVA 20. Kaasutuslaitoksen prosessikytkentä (Koskiniemi 2014).

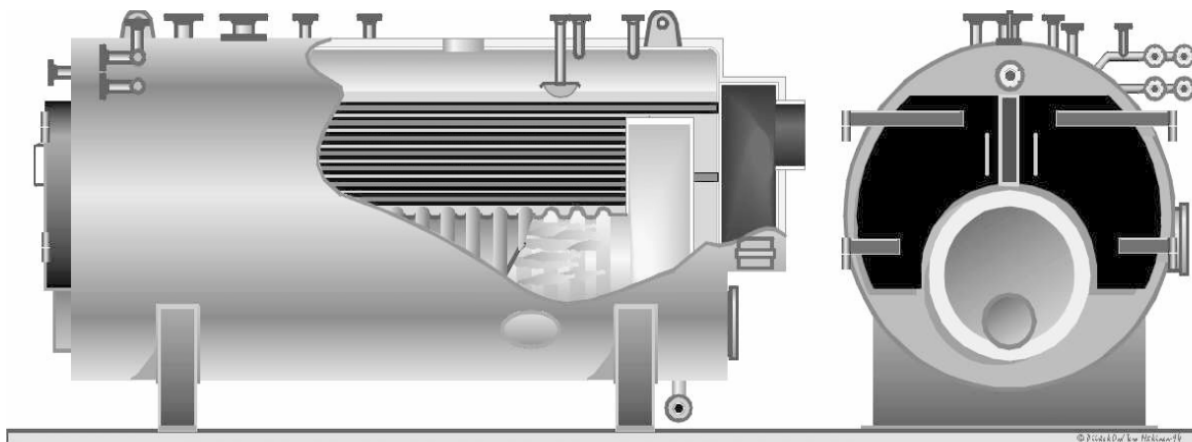


KUVA 21. Kiertopetikaasutin (Koskiniemi 2014).

5.5 Tulitorvi-tuliputkikattilat

Tulitorvi-tuliputkikattiloiden suosio säilyy ennallaan niiden helpon käytettävyyden kannalta. Yleisesti tuliputkikattiloiden polttimissa käytetään polttoaineena kevyttä polttoöljyä, raskasta polttoöljyä, kaasua sekä yhdis-

telmäpolttimia kaasulle, kevyelle ja raskaalle polttoöljylle. Kevyen polttoöljyn etuina ovat sen helppo käytettävyys, hyvä toimitusverkko eikä erillistä lämmitystä öljysäiliölle tarvita. Kuvassa 22 on tulitorvi- tuliputkikattilan havainnekuva.



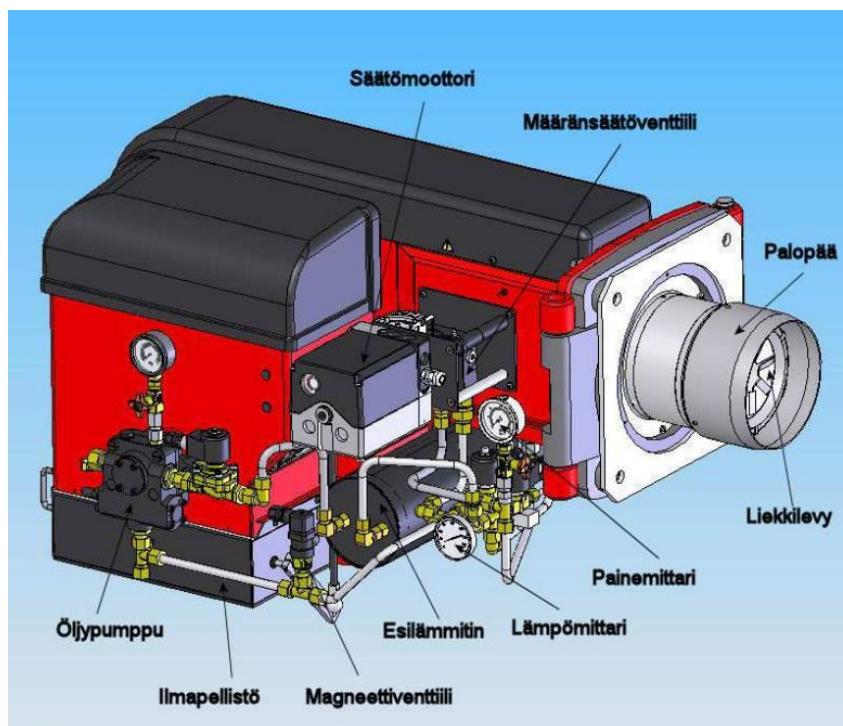
KUVA 22. Tulitorvi-tuliputkikattila (Jalovaara ym. 2003, 23).

Raskaan polttoöljyn polton haasteellisuus tuleekin sen fysikaalisista ominaisuuksista. Varsinkin kylmissä olosuhteissa, tarvitaan erillinen lämmitys säiliölle ja öljyputkistoille. Säiliössä lämmitys tapahtuu yleisesti öljyn imukohdan lähettyvillä, josta öljy pumpataan suodatus- ja esilämmitysyksikölle. Polttimella tapahtuu lopullinen lämpötilan nosto, josta öljy pumpataan korkeapainepumpulla suuttimille. Palamisilmapuhallin huolehtii tulipesän riittävästä huuhtelusta ennen sytytystä, joka tapahtuu sähköisesti. Sääto hoidetaan useimmiten lähtevän vedenlämpötilan mukaan, jossa lähtevän veden lämpötila säättää automaattisesti palamista. Toinen säätötapa on tehoon perustuva säätö, jossa esimerkiksi poltin käy puoliteholla tai täydellä teholla. Huollon tarvetta aiheuttaa yleisimmillään huonolaatuinen polttoaine, joka saattaa tukkia suodattimet, tai jaksoittaisen käytön aiheuttama nokeentuminen. Lämmönluovutuspinnoilla pienikin nokikerros huonontaa merkittävästi lämmönjohtavuutta vesitilaan.

5.5.1 Tulitorvi-tuliputkikattilan ylösajo

Kattilan ylösajossa lämpötilaa nostetaan lyhyillä ajojaksoilla, kunnes lämpö on tasaantunut ja ollaan lähellä käyttölämpötilaa. Ylösajo voi kattilan koosta riippuen kestää useita tunteja.

Tulitorvi-tuliputkikattiloissa käytetään useimmiten kaasua- tai öljypolttimia (kuva 23). Polttimien varustelu riippuu käytettävästä polttoaineesta ja teholuokasta.



KUVA 23. Öljypolttimen pää osat polttimien tehoalueet 390-1370 kW kuvan poltin on moduloiva raskasöljypoltin malli Oilon RP-130M (Pal 2009, 9).

6 PÄÄSTÖJEN VÄHENNYS LEIJUTUSPOLTOSSA

6.1 Primääriset menetelmät

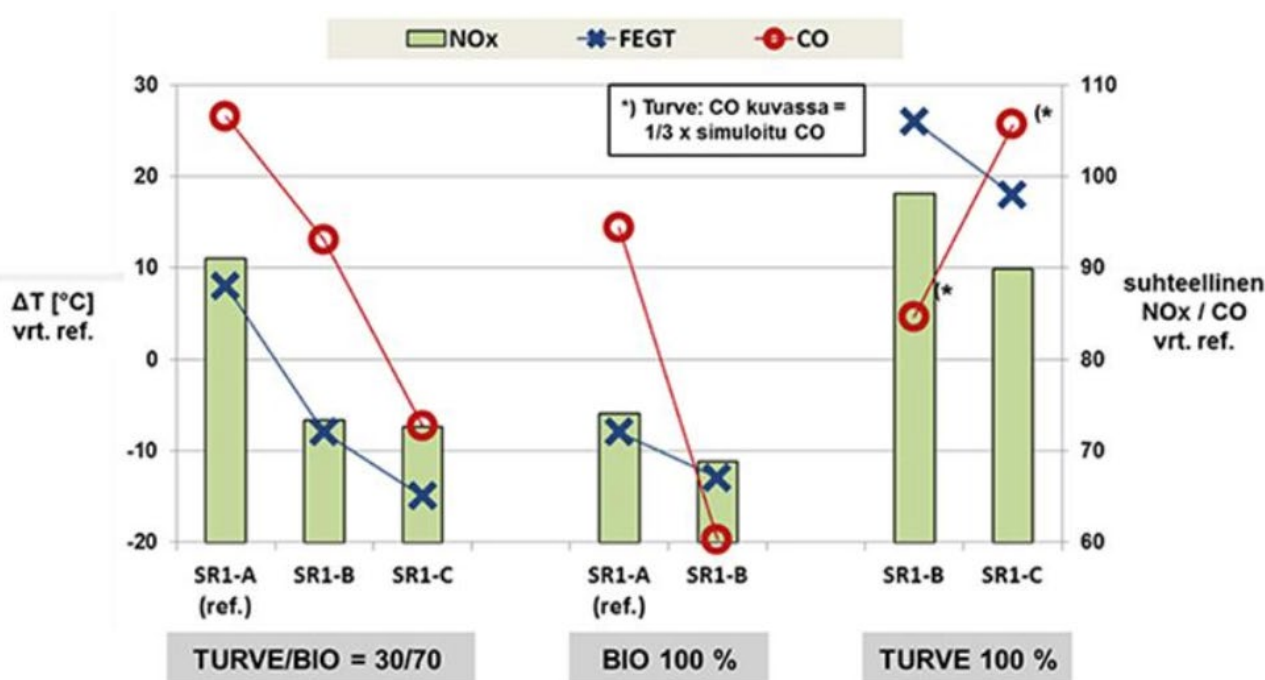
Kerrosleijupolton ja kiertoleijupoltossa syntyviä haitallisia päästöjä pyritään vähentämään useilla menetelmillä. Kaikkia menetelmiä käytettäessä vaaditaan hyvää prosessin tuntemista, koska päästöjen vähennyskeinoilla on vaikutusta palamisen hallintaan ja laitoksen elinkaareen. Lisäksi oikeanlaiset materiaalit, esimerkiksi lämmönluovutuspinnoilla, saattavat käyttäiltään vaihdella hyvinkin suuresti. Tästä syystä syntyvien savukaasujen sisältämien yhdisteiden tuntemus ja lämpötilan hallinta, auttaa ymmärtämään myös materiaalin kestävyteen vaikuttavia tekijöitä. Kustannustehokkaampana menetelmänä pidetään polton hallintaa, tällöin puhutaan vaiheistetusta palamisesta, jossa polttoaineen palaminen pyritään jakamaan useisiin vyöhykkeisiin. Kun tiedetään joidenkin kaasujen syntyprosessi, oikeanlaisella palamisilmojen ja lämpötilan säädöillä voidaan hallita haitallisten yhdisteiden syntyä. Esimerkiksi NO_x -päästöihin pystytään vaikuttamaan hyvinkin tehokkaasti. Tulipesän lämpötilan vaikutus korkeissa lämpötiloissa syntyvään termiseen NO_x :een on merkittävä. Terminen NO_x lisääntyy voimakkaasti lämpötilan kohotessa. Palamisilmojen lämpötiloihin pystytään vaikuttamaan leijutuspoltoissa savukaasujen kierrätyksellä, jälkipoltolla sekä kiertokaasu toiminnoilla, jossa palamiseen osallistunut savukaasu syötetään takaisin tulipesään jäähdyttämällä näin voimakkaasti polttoainetta. Jälkipoltossa tulipesään syötetään vähätyyppistä polttoainetta, mikä vähentää päästöjen syntyä. (Kukkonen 2016, 40.)

6.2 CFD virtausdynamiikka

Oikeanlaisen palamisilmojen sekoittumisen löytymiseen ilmiötä voidaan tutkia myös simulaation avulla. Tällöin kalliiden muutostöiden riskit voidaan minimoida ja mahdolliset ongelmatilanteet tulevat huomioiduksi.

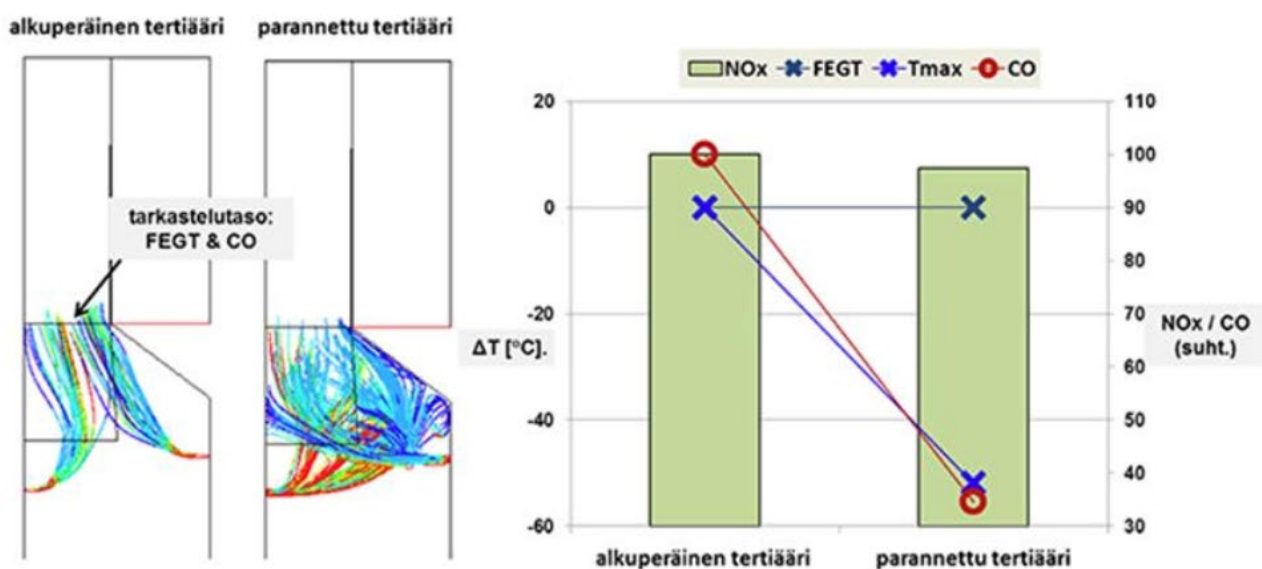
VTT on mallintanut jo lähes 30 vuotta kerrosleijukattiloiden, soodakattiloiden, poltinpolton sekä arinakattiloiden palamisilmiöitä laskennallisen virtausdynamiikan avulla (Computational Fluid Dynamics CFD). CFD-mallinnuksen avulla on pystytty vaikuttamaan jo olemassa olevien sekä uusien kattiloiden palamishyötysuhteeseen sekä niiden päästöihin. CFD-menetelmällä pystytään mallintamaan tuhkapartikkelien sekä kaasukomponenttien virtaukset, viipymäajat tulipesässä, palamisen ja päästöjen reaktion kulku, sekä lämpötilojen ja kaasupitoisuuksien jakaumat. Lisäksi CFD-menetelmällä pystytään mallintamaan lämmönsiirto-pinnoille syntyvien lämpötehojen jakaumat.

Alla olevissa mallinnusesimerkeissä kuva 25 on käytetty kiertopetikattilan ilmanjakoperiaatteen mallinnusta, jossa polttoaineena on käytetty kosteaa biomassaa, kierrätyspolttoainetta, lietettä tai turvetta. Palakooltaan suuremmat polttoaineet palavat hiekkapedissä, mutta kevyt polttoaine nousee palamisilman vaikutuksesta hiekkapedin yläpuolelle ja palaa kaasutilassa. Simuloitavassa kattilassa sintraantumisriskin välttämiseksi hiekkapedin lämpötila pidetään 800-855°C. Kattilassa palamisilmojen sekoittumisesta huolehditaan pystysuunnassa kolmella vyöhykkeellä ja niiden sekoitussuhdetta muuttamalla, huomioiden petihiekan lämpötila, saadaan NO_x-päästöjä pienennettyä. (Kjälman, Lehto, Jukola, Lappalainen, Pättikangas, Niemistö ja Karhela, 2014.)



KUVA 25. Vyöhykkeen vaikutus, stoikiometrian vaikutus kerrosleijukattilan mallinnustuloksiin seospoltossa ja pelkän biomassan tai turpeenpoltossa I-vyöhykkeen ilmakerroin SR1-A < SR1-b < SR1-C. FEGT on tulipesän loppulämpötila. (Kjälman ym. 2014)

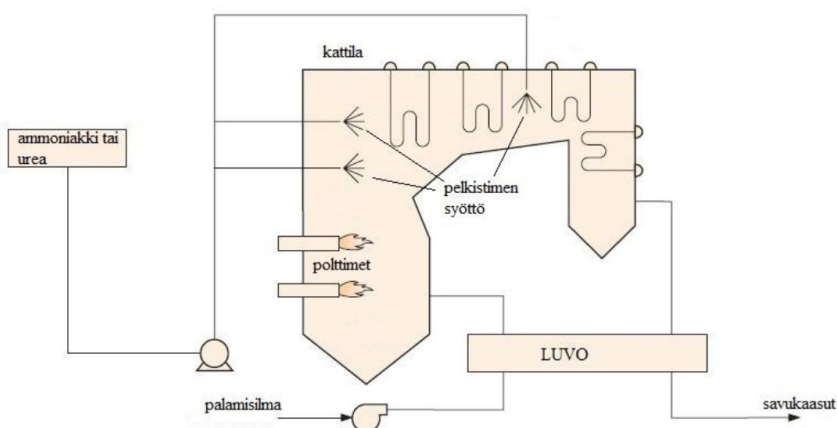
Turpeen ja kevyiden polttoaineiden palamisessa on otettava huomioon niiden palaminen kaasutilassa, jolloin niiden viipymäaika on lyhyempi ja hiilimonoksidi CO-pitoisuus lisääntyy. Hiilimonoksidi CO-päästöihin voidaan vaikuttaa paremmin tulipesään tunkeutuvalla ja hyvin sekoittuneella tertiääri-ilmalla. Kuvassa 26 on esitetty tertiääri-ilman syötön vaikutus palamisilmojen sekoittumiseen. (Kjälman ym. 2014)



KUVA 26. Tertiääri-ilman syötön vaikutus sekoittumiseen ja CO:n palamiseen kerrosleijupetikattilan tulipesän loppuosassa. (Kjälman ym. 2014)

6.3 Sekundääriset menetelmät

Sekundäärisissä menetelmissä (Selective Non-catalytic NOx Reduction SNCR) ammoniakilla tai urealla pelkistetään typpimonoksidi typeksi ruiskuttamalla ammoniakkia tai ureaa savukaasuihin. Menetelmää kutsutaan myös selektiiviseksi ei-katalyyttiseksi NO pelkistykseksi. Menetelmässä lopputuotteena syntyy vettä. Kuvassa 27 on havainnekuva ammoniakin tai urean ruiskutuspaikoista.

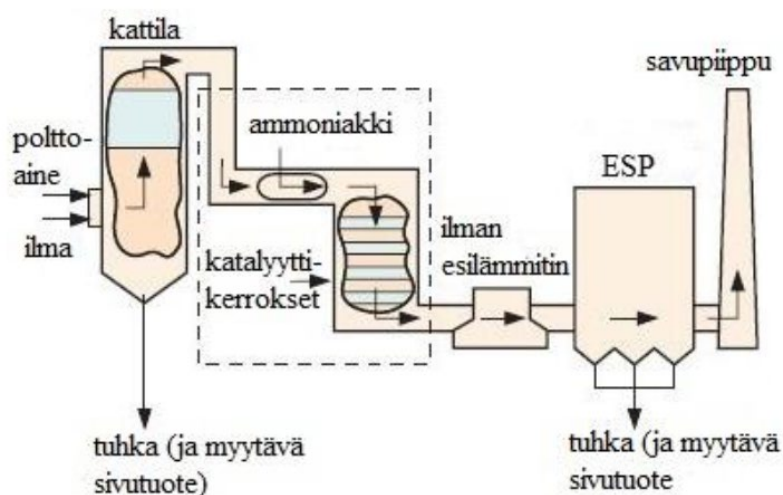


KUVA 27. Ammoniakin tai urean ruiskutus kattilaan (Pessa 2016, 26).

Vaikka reaktio tapahtuukin tulipesässä, niin kyseessä ei ole primäärinen menetelmä, sillä pelkistys tapahtuu savukaasuissa eikä erillistä reaktiota tulipesän jälkeen tarvita, eikä menetelmässä lisätä kemikaalia itse polttoaineeseen. Menetelmän ongelmana pidetään sen kapeaa lämpötila-alueetta 850 - 1000°C. Koska pelkistysreaktio tapahtuu kyseisellä lämpötila-alueella, korkeissa lämpötiloissa ammoniakki NH_3 reagoi typpimonoksidiksi ja matalissa lämpötiloissa, ammoniakin NH_3 hajoamisen hidastumisesta johtuen, haitalliset ammoniakkipäästöt lisääntyvät. Päästöjen vähennystehokkuudessa päästään tyypillisesti 30 - 50 % erotusasteeseen

mutta optimaalisessa tilanteessa kiertoleijupoltossa on saavutettu jopa 90 % erotustehokkuus johtuen kattilan geometriasta ja poltto-olosuhteista. Menetelmän etuna pidetään sen helppoa toteutettavuutta sekä halpaa hintaa. (Pessa 2016, 23 – 25.)

Selektiivisessä ja katalyyttisessä menetelmässä (Selective Catalytic NO_x Reduction SCR) ammoniakkia lisätään savukaasuvirtaan, jolloin typen oksidit pelkistyvät molekyylytypeksi ja reaktiossa syntyy vettä. Lämpötila-alue pelkistysreaktiolle on 250-500°C, joka on riittävä reaktionopeuden aikaansaamiseksi. Menetelmä vaatii katalyytin läsnäolon. Parhaiten menetelmä soveltuu polttoaineille, joiden rikki- ja pitoisuus on alle 2 %. Syynä tälle on katalyytin aikaansaama hapetusreaktio, jossa rikki hapettuu rikki-trioksidiksi SO₃ aiheuttaen samalla mahdollista korroosiovaaraa muuttessaan rikkihapoksi. Menetelmässä syntyvät ammoniumsulfaattiyhdisteet aiheuttavat likaantumista ja korroosioriskin. SCR-menetelmällä on päästy korkeisiin erotusasteisiin (jopa 95 %), jolloin menetelmä on ollut tehokkain tapa poistaa NO_x:t savukaasuista. Kuvassa 28 on havainnekuva katalyyttisestä NO_x-päästöjen vähennysmenetelmästä. (Pessa 2016, 23 – 26.)



KUVA 28. SCR-menetelmän toimintaperiaate (Pessa 2016, 24).

7 PETIMATERIAALIEN VAIKUTUS SYNTYVIIN PÄÄSTÖIHIN

Kerrosleijupoltossa ja kiertoleijupoltossa käytettävät petimateriaalit vaikuttavat osaltaan syntyviin päästöihin myös välillisesti. Tutkimusten valossa on osoitettu, että perinteisen luonnonhiekan vaihtotarve on suurempi verrattuna masuunikuonasta valmistettuihin ilmajähdytettyyn granuliin tai vesijähdytettyyn granuliin. Syynä vaihtotarpeen vähenemiseen, verrattuna petihiekkaan, on se, että alkalireaktiossa tapahtuvaa partikkelien yhteenliimautumista (agglomeraatiota) ei tapahdu niin voimakkaasti.

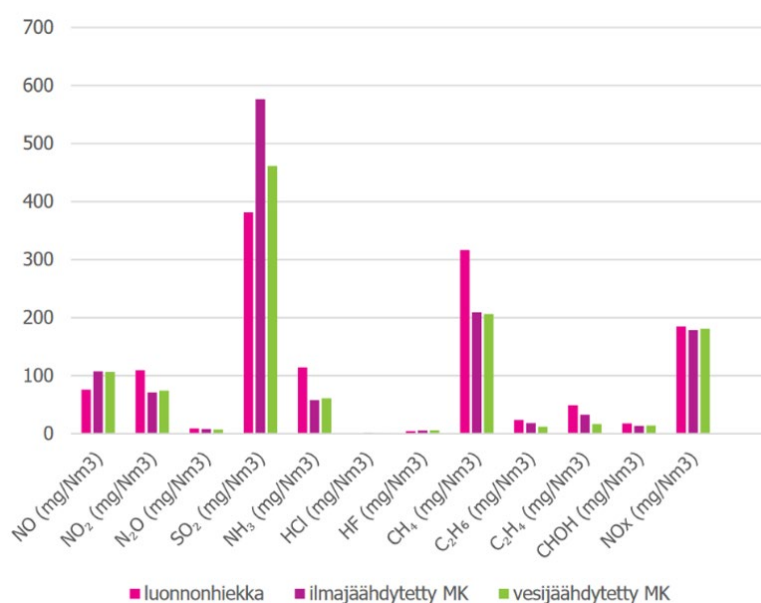
Petiin polttoaineen mukana kulkeutunut hiekka (kvartsi) aiheuttaa kuitenkin alkaliin kanssa petimateriaalin yhteenliimautumista, jolloin se joudutaan seulomaan suurempien ongelmien ehkäisemiseksi. (Feskon.fi)

Alkaliin aiheuttamaa agglomeraatiota tapahtuu kahdella tavalla, ensimmäisessä tavassa petimateriaalien partikkelien pintaan syntyy alkalipitoinen tuhkakeros. Riittävän kerroksen muodostuttua kerros reagoi kvartsin kanssa muodostaen partikkelin pintaan nestemäisen kerroksen. Toisessa tavassa polttoaineen mukana kulkeutunut pioksidi (SiO_2) reagoi alkaliin kanssa muodostaen nestemäisiä yhdisteitä. Tuhkan ollessa nestemäisessä muodossa se tarttuu petimateriaalin pintaan, jolloin tapahtuu agglomeroituminen.

Agglomeroitumista voidaan tulipesässä vähentää oikeanlaisella polttoaineella esimerkiksi korvaamalla osa polttoaineesta sahoilta saatavalla kalsiumia sisältävällä kuorella, sekä tulipesään tapahtuvalla kalkkilisäyksellä, missä kvartsi reagoi kalsiumin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattia, joka on kattilolosuhteissa kiinteää estäen siten alkaliin reaktion kvartsin kanssa. Siksi kalsiumin on todettu vähentävän agglomeroitumista. (Pitkänen 2018, 10 – 12.)

Lisäksi suoraan päästöihin vaikuttava tekijä on granulien korkeampi lämpötilan kestävyys 1300°C , tällöin saadaan aikaan parempi palaminen, joka vähentää palamisessa muodostuvia päästöjä. Petimateriaalin vaihtotarve myös vähenee. Korkeampi lämpötilan kesto auttaa paremmin hallitsemaan tuhkansulamisen johtuvia ongelmia. Vesijähdytetyn granulien terminen käyttäytyminen ylösajovaiheessa tulee huomioida siirryttäessä vesijähdytetyn granulien käyttöön, siinä amorfisessa muodossa oleva masuunikuona kiteytyy ja nostaa pedin lämpötilaa hetkellisesti. Reaktio tapahtuu vain kerran, Kiteytymislämpötila on noin 850°C . (Feskon.fi.)

Vaikka kokonaispäästöihin ei huomioidakaan ylösajon ja häiriötilanteiden aiheuttamia korkeita päästöjä, haitallisia päästöjä syntyy huomattavasti vähemmän, kun ylösajon ja häiriötilanteiden määrä vähenee. Kuvassa 24 on esitetty petimateriaalien luonnonhiekan, ilmajähdytetyn massunikuonan ja vesijähdytetyn massunikuonan vaikutus syntyviin päästöihin kuivissa savukaasuissa 6 % jäännöshapteen redusointina.



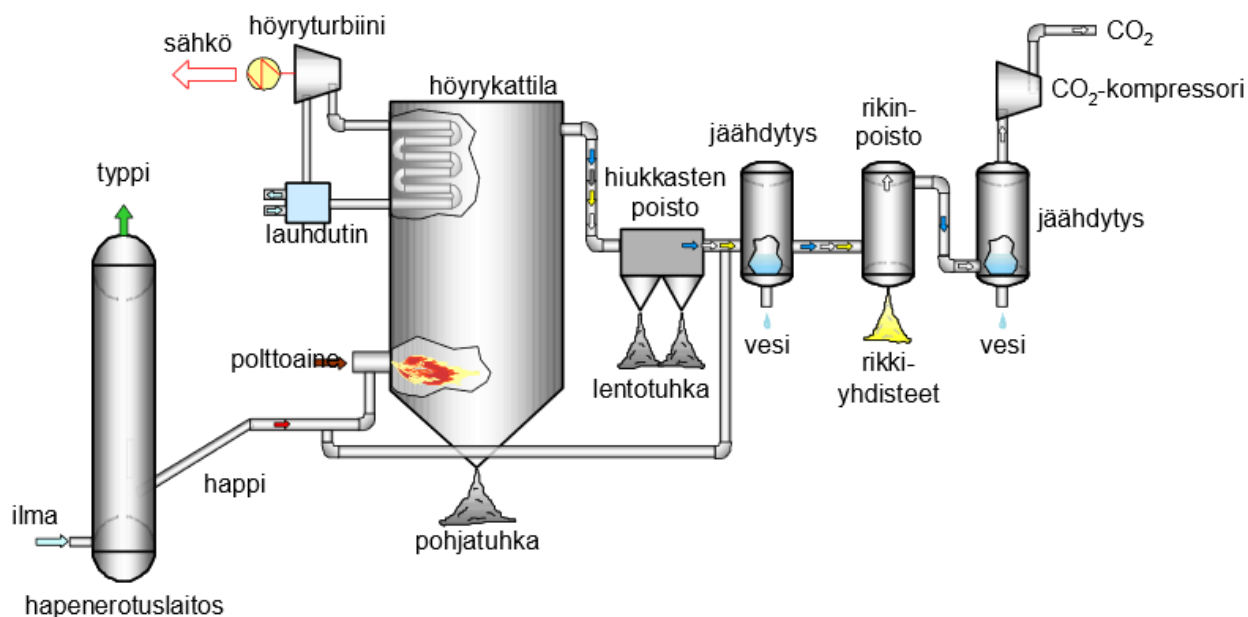
KUVA 24. Petimateriaalin vaikutus syntyviin päästöihin (happi O₂ redusointi 6 prosenttia) (Pitkänen 2018, 28).

8 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO

Hiilidioksidin talteenotto on jo usean vuoden ajan ollut yhtenä vaihtoehtona ilmakehässä olevan liiallisen hiilidioksidin vähentämiseksi. Ongelmana on ollut useasti järjestelmien kalleus ja prosessin monimutkaisuus. Talteenotto vaatii paljon energiaa, jonka takia polttoaineen kulutus voi lisääntyä 10-40 prosenttia, mikä osaltaan lisää tuotantokustannuksia. Nykytekniikalla hiilidioksidia voidaan erottaa prosessista kolmella eri tavalla. Voimalaitossovelluksissa hiilidioksidin erottaminen voi tapahtua talteenottona savukaasuista. Talteenotto voi tapahtua ennen polttoa, happipolton avulla tai polton jälkeen. Nämä tavat perustuvat pitkälti kemianteollisuudessa käytettäviin tekniikkoihin. CCS (Carbon Capture and Storage) eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointimenetelmät ovat yleisnimitys käytettävistä talteenottomenetelmistä, joissa voidaan ottaa huomioon syntyvän hiilidioksidin varastointi. (Teir, Pikkarainen, Kujanpää, Tsupari, Kärki ja Arasto ym. 2011.)

Uusimpana tutkimuksen kohteena Suomessa on ollut CLC (Chemical Looping Combustion) menetelmä. Menetelmässä hiilidioksidin talteenotto perustuu happipolttoon, jossa kantaja-aineen, esimerkiksi kiinteän metallioksidin avulla, polttoon tuodaan pelkkää happea, jolloin normaalin palamisilman sisältämää ei toivottua tyyppiä pääse prosessiin. Poltossa happi irtoaa kantaja-aineesta ja kantaja-aine (metallioksidi) pystyy sitomaan itseensä poltossa olevan hapen. Tämän jälkeen kantajaainetta voidaan käyttää uudestaan poltossa. Menetelmän etuna on sen pienempi energian kulutus. (Energiauutiset.fi.)

Hiilidioksidin varastointimahdollisuuksia on useita ja niiden toteutukset perustuvatkin osittain olemassa olevien järjestelmien hyödyntämiseen. Parhaimpana vaihtoehtona tällä hetkellä pidetään varastointia öljy- ja kaasuesiintymien yhteydessä syvälle maaperään, missä hiilidioksidi pysyy nestemäisessä muodossa vallitsevan paineen ja lämpötilan ansiosta. Muita vaihtoehtoja varastoinnille ovat varastointi geologisiin suolaisiin pohjavesikerrostumiin merenpohjassa, varastointi hiiliesiintymään injektoimalla sekä sitomalla kemiallisen reaktion avulla kiinteiksi mineraaleiksi (mineralisaatio). (Ilmasto-opas.fi.) Kuvassa 12 esimerkkinä hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla, missä puhdistettu happi poltetaan kierrätetyn savukaasun ja puhdistetun hapen seoksessa. Prosessissa saadaan savukaasujen CO₂-taso nousemaan korkeaksi, jolloin hiilidioksidin erottamisesta tulee helpompaa. (Teir ym. 2011.)



KUVA 12. Hiilidioksidin CO₂ talteenotto happipolton avulla. (Teir ym. 2011).

9 SUODATUSTEKNIIKAT

Valittaessa suodatustekniikkaa tulee ottaa huomioon syntyvien savukaasujen määrä ja haitallisista kaasukomponenteista, hiukkasista ja päästörajoituksista johtuvat tekijät. Tiukentuvassa päästöjen hallinnassa uusien tekniikoiden ja prosessien kehittäminen on hyvinkin ajankohtaista. Olemassa olevien laitteistojen kunnosta on huolehdittava parhaan erotteluasteen aikaansaamiseen. Uusien suodatuslaitosten investointikustannukset vaikuttavat myöskin käytettävään tekniikkaan. Lisäksi syntyvän tuhkan ja lentotuuhkan jälleenhyödyntämiselle tulee keksiä keinoja tiukentuvien loppusijoitussääntöjen vuoksi. Taulukossa 5 kerrotaan yleisimpien käytössä olevien savukaasujen suodatusmenetelmien erotteluasteista. Suodattimien aiheuttamasta painehäviöstä johtuen soveltuvuus luonnonvetosiin laitoksiin on huono.

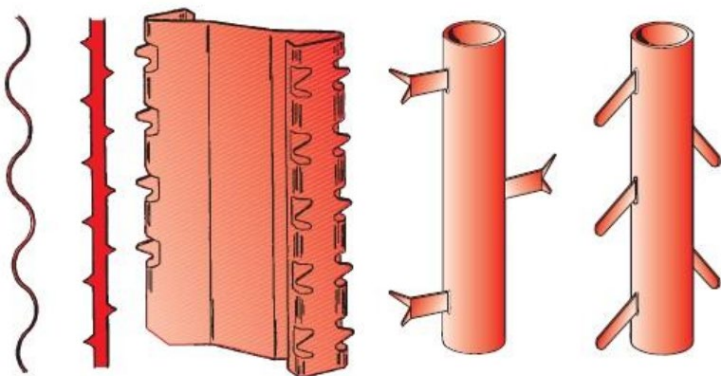
Puhdistin	hiukkaskoko 0,5 µm	hiukkaskoko yli 0,5 µm
Sykloni	alle 40 %	50-97 %
Multisykloni	alle 60 %	75-100 %
Sähkösuodatin	70 %	97-100 %
Pesuri	90 %	98-100 %
Letkusuodatin	99,5 %	100 %

TAULUKKO 5. Yleisimmät suodatustekniikat hiukkaskoon 0,5 µm ja yli 0,5 µm erotteluaste prosentteina (Huhtinen, Kettunen, Nurminen ja Pakkanen 1994, 237).

9.1 Sähkösuodatin

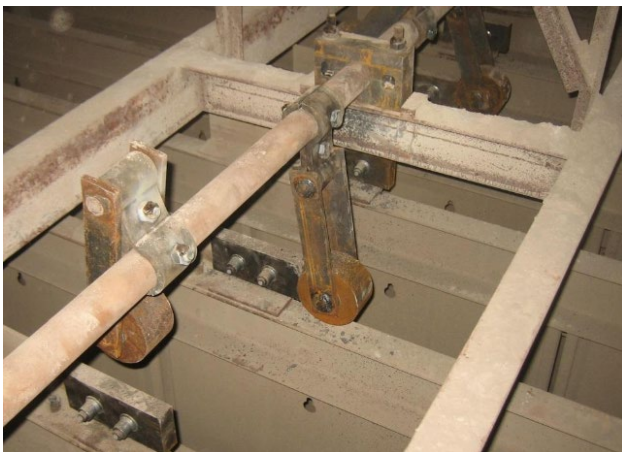
Sähkösuodatin on yleisin käytetty suodatin kiinteitä polttoaineita käyttävissä polttolaitoksissa. Sähkösuodattimet jaotellaan kahteen ryhmään. Valintaan vaikuttavana tekijänä on savukaasujen lämpötila. Kylmän puolen suodatin sijaitsee savukanavan loppupäässä kattilassa olevan luvon eli palamisilman esilämmittimen jälkeen, jolloin savukaasujen lämpötila on laskenut 120°C - 150°C :een. Kuuman puolen suodatin sijaitsee lähellä kattilaa, jossa savukaasujen lämpötila on 320°C - 400°C. Sähkösuodattimia on rakenteellisesti kahta tyyppiä, putkimallisia ja levyrakenteeseen perustuvia.

Suodattimen toiminta perustuu koronailmiöön, jossa savukaasuissa olevat hiukkaset varataan sähkökentässä, minkä seurauksena hiukkaset erottuvat keräyselektrodeille. Negatiivisella tasavirtajännitteellä varautuneet emissioelektrodit purkautuvat koronapurkauksessa, jolloin negatiivisen elektronin irtoaminen saa aikaan sähkövirran. Kuvassa 29 on erilaisia emissioelektrodeja. Elektronit törmäävät savukaasumolekyyleihin ja varaaavat savukaasuhiukkaset negatiivisella varauksella. Tästä syystä savukaasumolekyylit hakeutuvat positiiviselle keräyselektrodille. (Niemi 2016, 18 – 19.)



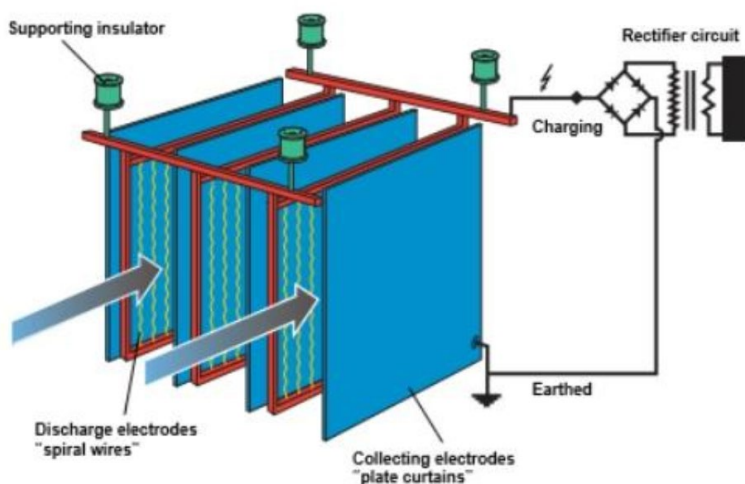
KUVA 29. Erilaisia emissioelektrodeja (Seppä 2014, 19).

Hiukkasten poisto tapahtuu vesihuuhtelun tai erilaisten mekaanisten paineilmakäyttöisten tai sähkötoimisten ravistimien tai vasaroiden avulla. Kuvassa 30 näkyy sähkösuodattimen sisällä olevat vasarat. (Niemi 2016, 18 – 19.)



KUVA 30. sähkösuodattimen vasarat (Seppä 2014, 22).

Sähkösuodattimen erotteluaste on suhteellisen korkea. Sähkösuodatin suodattaa $0,1 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$ hiukkasia, ollen letkusuoletttimeen verrattuna hiukan tehottomampi. Palamattomien hiukkasten joutuminen kylmäpuolisuoletttimeen voi aiheuttaa tuhkan palamisen, jolloin keräyskontin lämpötila nousee. Erottelukykyä heikentävänä tekijänä onkin palamattomien hiukkasten osuus sekä vety-, typpi-, ja hiilidioksidipitoisuus. Vesihöyryllä ja rikkidioksidimäärällä on erottelukykyä parantava vaikutus. Ongelmana kylmäpuolen sähkösuodattimella on sen toiminnan käynnistyminen vasta riittävän lämpötilan saavutettua noin 100°C . Etuina suodatustekniikalle on suhteellisen alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset sekä pitkä käyttöikä. Etuna on myös suhteellisen alhainen painehäviö. Kuvassa 31 on levyrakenteisen sähkösuodattimen havainnekuva. (Niemi 2016, 19.)



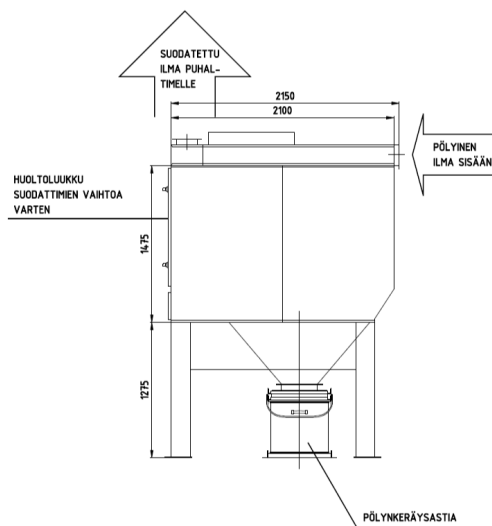
KUVA 31. Sähkösuodatin (Seppä 2014, 14).

9.2 Kuitusuodatin

Erotteluasteeltaan tehokkain hiukkasten oleva suodatustekniikka on kuitusuodatus. Kuitusuodatuksen toimintaperiaate perustuu savukaasujen kulkeutumiseen läpi villasta, nylonista, lasikuidusta tai polyesteristä valmistetuista kuitukerroksista, jolloin hiukkaset takertuvat kuitukerroksiin. Kuitusuodatuksen erottelukyky hiukkasten koon mukaan on hyvin laaja $0,1 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$. Kuitusuodatin kykenee suodattamaan $0,1 \mu\text{m}$ kokoiset hiukkaset jopa 100 % tehokkuudella. Suodattimen kerrospaksuus on $0,15 \text{ mm}$ - $0,5 \text{ mm}$, minkä ansiosta painehäviö on saatu pidettyä pienenä. Ongelmana pidetään savukaasujen lämpötilaa. Esimerkiksi

lasikuidusta valmistettujen kuitusuodattimien lämpötilan kesto on noin 290°C. Rikkiä sisältävien polttoaineiden poltto on myös haitallista kuitusuodattimelle. Ongelmia aiheuttavat kuluminen sekä savukaasuista tarttuvat partikkelit. (Niemi 2016, 17 – 18.)

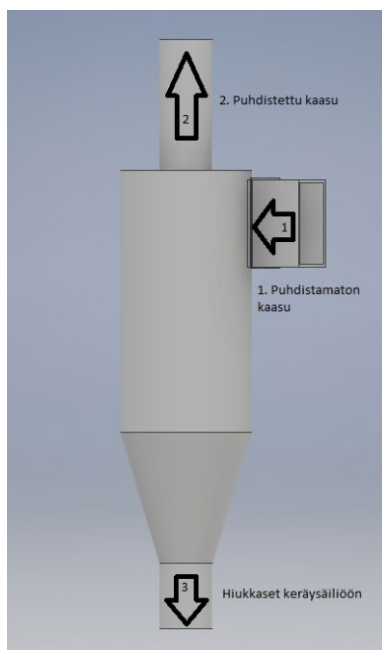
Yleisin suodatustyyppi on letkusuodatin, missä letkujen määrällä pystytään vaikuttamaan suodatustarpeeseen. Letkuihin kertyneet hiukkaset irrotetaan suodatuspinnoilta mekaanisesti, ravistelemalla, paineilman avulla tai ultraäänen avulla. Kuvassa 32 on letkusuodattimen havainnekuva sekä savukaasujen virtaus-suunta. (Niemi 2016, 17.)



KUVA 32. Letkusuodattimen toimintaperiaate (Ylönen 2018).

9.3 Sykloni

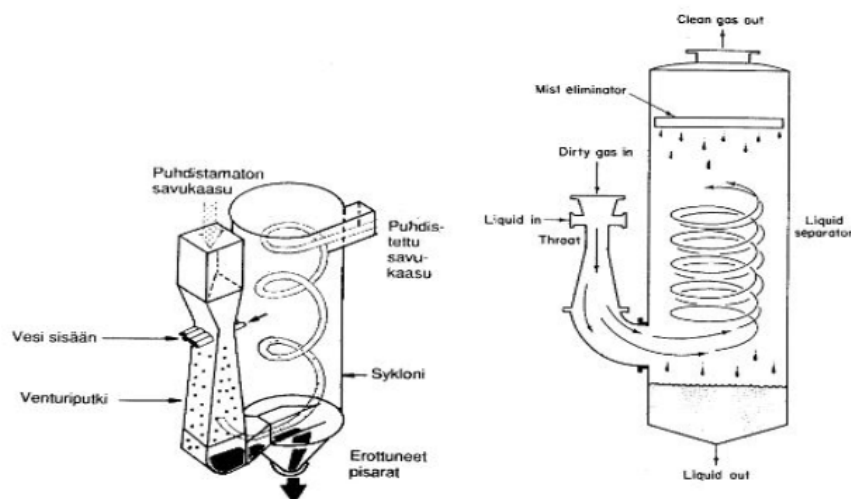
Sykloni on yleisimmin käytetty suodatusmenetelmä, jossa hyödynnetään virtauksen aiheuttamaa liikettä. Siinä inertian (hitauden) takia pyörivässä liikkeessä olevat hiukkaset ajautuvat syklonin ulkokehälle ja valuvat sieltä pohja-aukon kautta ilmatiiviiseen säiliöön. Sykloneita on tyypiltään vastavirtasykloneita että läpivirtaus-sykloneita. Toteutuksissa voidaan käyttää myös useiden syklonien yhdistelmiä (multisykloni). Syklonin erotteluaste paranee hiukkasten koon kasvaessa 10 µm kokoluokkaan. Silloin hiukkasilla erotusaste voi olla jopa 90 %. Erotteluasteen mitoituksessa lasketaan, kuinka monta täyttä kerrosta virtauksen tulee kiertää haluttuun erotteluasteeseen pääsemiseen. Valmistuskustannuksiltaan sykloni on varsin edullinen. Haittoina pidetään sen huonoa erottelukykä pienhiukkasten osalta sekä rakenteen aiheuttamaa suhteellisen suurta painehäviötä. Kuvassa 33 on havainnekuva vastavirtasyklonista. (Visakova 2015, 27 – 29.)



KUVA 33. Syklonin toimintaperiaate (Ylönen 2018).

9.4 Venturipesuri

Märkäerottelun periaatteena on nesteen, tavallisimmin veden, käyttäminen hiukkasten erottamiseksi kaasu-
virrasta ja hiukkasten saaminen nestepisaroiden kanssa nopeuseroon. Kuvassa 34 on esitetty veden ja savu-
kaasujen virtaus venturipesurissa.



KUVA 34. Venturipesurin havainnekuva (Visakova 2015, 28).

Törmäysvaikutuksen aikaansaamiseksi matalapaineinen vesi johdetaan venturin kurkkuun, jossa ilman nopeus on suuri, jopa 50 m/s - 150 m/s. Nopea virtaus saa veden pisaroitumaan, jolloin saadaan voimakas törmäysvaikutus kaasun ja veden kanssa. Lopullinen erottelu toteutetaan pisanerottimessa, jonka toiminta perustuu sykloniin. Venturipesurilla voidaan erotella kaasumaisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Venturipesuri soveltuu myös poistokaasujen ja höyryjen jäähdytykseen. Pesurilla voidaan kerätä ja neutraloida muitakin haitallisia kaasukomponentteja kuten korrodoivia kaasuja ja sumuja sekä käsitellä räjähdysherkkiä pölyjä.

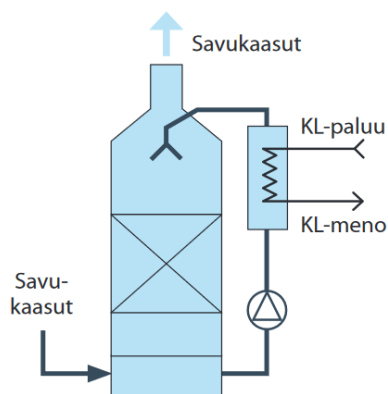
Kompaktin koon ansiosta pesurit eivät vaadi suurta tilaa. Ongelmia aiheuttavat syntyvät jätevedet, jäätymisvaara sekä korrodoivat yhdisteet. Kerättyjä hiukkasia on vaikea kierrättää ja ne voivat aiheuttaa maaperän saastumisen. Taulukossa 6 vertaillaan eri suodatusmenetelmiä. (Virtual.vtt.fi.)

Pölynerotin	Käyttökohteet	Edut	Haitat	Tyypillinen kuormitus (g/m ³)	Paineero (Pa)	Hankinta-/ käyttö-kustannus
Kammiot, syklonit	Murskaus, hionta, työstö, hakkeen- ja purunkuljettimet, pneumaattiset kuljetusjärjestelmät	Yksinkertainen ja huoltovapaa rakenne	Pölyn aiheuttama kuluminen, alhainen erotuskyky pienille hiukkasille, laskeutumiskammio vaatii paljon tilaa	0,1 - 100	500 - 1500	Alhainen / Kohtuullinen
Kuitusuodattimet	kaikki kuiva pöly	Korkea erotuskyky pienillekin hiukkasille	Korkea painehäviö, rajoitukset korkeissa lämpötiloissa, ei sovellu tahmeille pölyille	0,1 - 20	750 - 1500	Kohtuullinen / Kohtuullinen
Sähkösuodatin -yksiasteinen -kaksiportainen	Lentotuhka Hitsausuurut	Alhainen painehäviö ja energiankulutus, korkea erotuskyky pienillekin hiukkasille	Ei sovellu kaikille pölyille, kunnossapito vaatii asiantuntemusta	0,1 - 2 < 1	100 - 250 100 - 250	Korkea / Alhainen Kohtuullinen / Alhainen
Venturipesuri	kemialliset ja metallurgiset huuрут	Erottavat myös tahmeita pölyjä, voidaan käsitellä myös syttyviä pölyjä, korrodoivat kaasut ja pölyt voidaan neutraloida	Korkea painehäviö, pesuneste käsiteltävä, jätevesilaitos usein tarpeen, laitteessa voi esiintyä korroosiota, laitteisto suojattava jäätymiseltä	0,1 - 100	500 - 4000	Alhainen / Korkea

TAULUKKO 6. Suodatusmenetelmien vertailua (Virtual.vtt.fi).

9.5 Savukaasupesuri

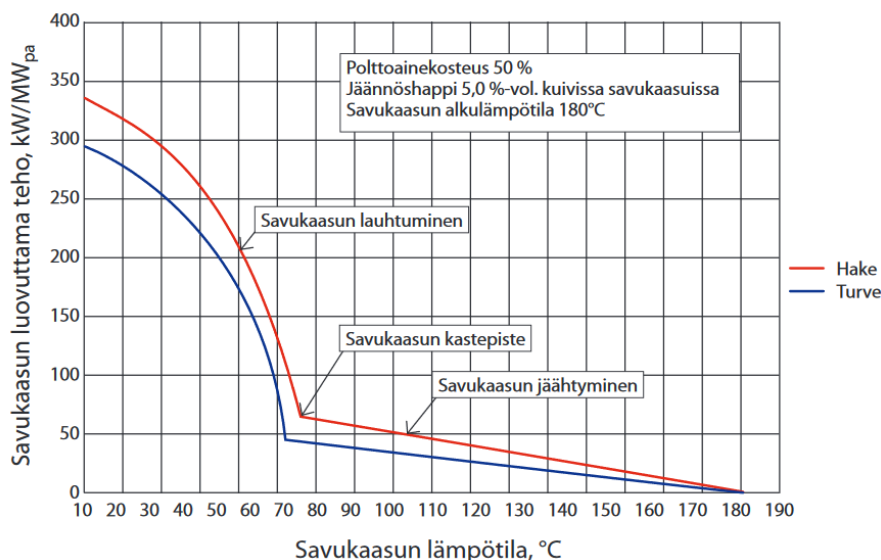
Toiminta perustuu savukaasujen sisältämien hiukkasten erotteluun ja hukkaenergian talteenottoon. Perinteisesti savukaasupesurin toiminnassa savukaasut johdetaan kaksivaiheisesti pesuriin. Ensimmäisessä vaiheessa valtaosa hiukkasista poistuu savukaasuista ja savukaasut jäädytetään märkälämpötilaan, noin 60 - 70°C. Kuvassa 35 on yksinkertaistettu kuva savukaasupesurin toiminnasta.



KUVA 35. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Järvenreuna ja Nummila).

Toisessa vaiheessa savukaasut luovuttavat lämpöenergiansa lauhduttimessa olevaan vastavirtaveteen. Lauhtuminen tapahtuu savukaasupesurin täytekappalekerroksissa, joita tyypillisesti on yksi tai kaksi. Kiertoveteen sitoutunut energia pumpataan siirtimelle, jossa se hyödynnetään kaukolämpöveden lämmitykseen. Savukaasupesurin tehokas toiminta edellyttää oikean kastepistelämpötilan, jos jäädään kastepistelämpötilan yläpuolelle, energian siirtyminen heikkenee. Savukaasupesuri toimii haihduttimena ja pesurissa oleva vesi sitoutuu savukaasuihin. (Järvenreuna ja Nummila.)

Vaikka savukaasupesuri on investointina kallis, sen kaksoishyöty taloudellisessa mielessä on merkittävä ja mahdollinen takaisinmaksuaika pienenee syntyneen myytävän lisäenergian myötä. Savukaasupesurin päästöjen vähennys tapahtuu voimakkaan suihkutuksen avulla, jolloin kiintoaine, raskasmetallit, rikkidioksidi SO_2 ja suolahappo HCl poistuvat lietteenä jatkokäsittelyyn. Kuvassa 36 on esitetty savukaasujen lämpötilan suhde savukaasujen luovuttamaan tehoon. (Ehox tuote.fi.)

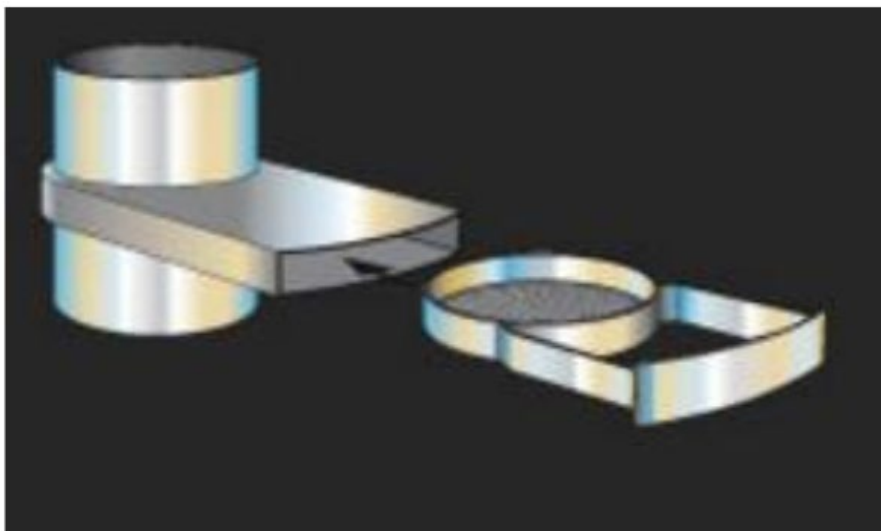


KUVA 36. Savukaasujen lämpötilan suhde savukaasujen luovuttamaan tehoon. (Järvenreuna ja Nummila.)

9.6 Pienpolton suodattimet

Katalysaattorin tarkoituksena on suodattaa häkä, typpioksidit sekä hiilivedyt jalometalli-katalyytin avulla. Katalyytteinä käytetään usein platinaa, palladiumia tai rhodiumia. Katalyyttien toiminta perustuu hapetuspelkistysreaktioon, jossa platina ja palladium toimivat hapetuskatalyytteinä ja rhodium pelkistyskatalyyttinä. (Niemi 2016, 20.)

Katalysaattorit eivät vielä ole yleistyneet pienpolton yhteydessä. Tiukkenevat päästönormit sekä pienpolton aiheuttamat mustan hiilen eli nokipölyn ympäristöhaitat ovat edistäneet pienpoltoon suunniteltujen suodatusmenetelmien kehitystä. Ongelmana kehitykselle on ollut pienpolton tyypillinen luonnonveto, jolloin piippuun asennettavien suodattimien toiminta on epävarmaa. Kuvassa 37 on NVI-piippukatalysaattori, jonka toiminta-ajaksi on ilmoitettu 40-60 tuntia ja erotteluasteeksi kerrotaan 60 - 80 % hiilimonoksidia lämpötilan ollessa 200 - 450°C.



KUVA 37. NVI-piippukatalysaattori (Nvi2000.se).

Kuvassa 38 on savukanavan päähän asennettava sähkösuodatin.

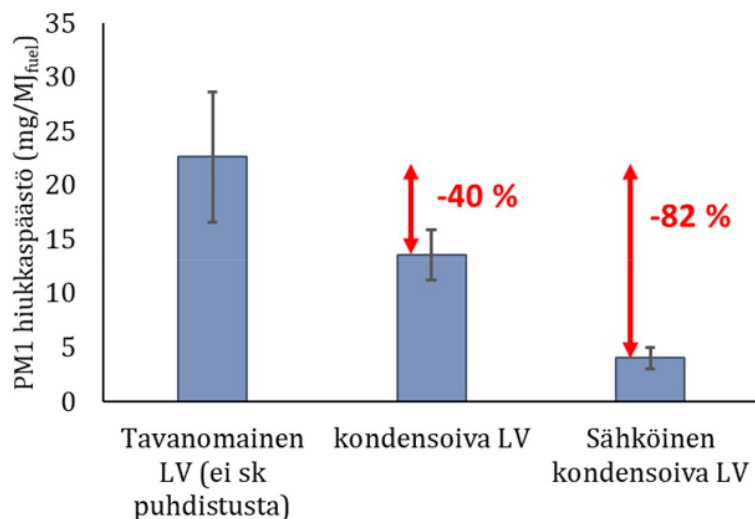


KUVA 38. Oekotube sähkösuodatin (Oekosolve.ch).

Pienkattilakäytössä katalysaattorien käyttö ei ole kovinkaan yleistä niiden jatkuvan huoltotarpeen vuoksi ja puhtaanakin aiheuttaman painehäviön takia. Poltinpoltossa ja dieselkäytössä katalysaattorit kuitenkin puoltavat paikkaansa alhaisemmista hiukkaspäästöistä johtuen. Siksi niitä on asennettu esimerkiksi laivoihin. Laivojen katalysaattorit ovat kokoluokaltaan huomattavasti suurempia. (Niemi 2016, 21.)

Savukaasukanavaan asennettavien sähkösuodattimien tai katalysaattorien yleistyminen Suomessa on ollut vielä varsin vähäistä, koska Suomessa pienpolton haittoja ei olla riittävästi tiedostettu. Maaston tasaisuuden takia takkojen ja kiukaiden savukaasut kulkeutuvat riittävän etäälle syntykohteesta, eivätkä näin aiheuta terveydelle välitöntä haittaa. Keski-Euroopan vuoristoisilla seuduilla ongelmaan on havahduttu, koska

laaksoissa olevien kylien ilmanlaadussa on pienpoltosta johtuen havaittu suurtakin heikentymää. Laaksoista mustan hiilen päästöt eivät kulkeudu etäälle ja ihmiset altistuvat välittömästi haitallisille pienhiukkasille. Pienpolton päästöille ei ole vielä asetettu päästörajoja ja niitä ohjaava Ecodesign-direktiivi astuu voimaan vasta 2022. Suomessa viimeaikaiset tutkimukset ovat keskittyneet esimerkiksi kondensoivan lämmönsiirtimen ja sähkösuodattimen vertailuun sekä niiden yhdistelmään. Kuvassa 39 on vertailtu eri vaihtoehtojen vaikutusta PM1 (halkaisijaltaan alle 1 μm) hiukkaspäästöihin. (Sippula 2018.)



KUVA 39. Lämmönvaihdin vertailu (Sippula 2018).

Kuvassa 40 on Itä- Suomen Yliopiston kehittämä kondensoiva lämmönsiirrin kosteille polttoaineille. (Sippula 2018).



KUVA 40. Kondensoiva lämmönsiirrin (Sippula 2018).

10 PÄÄSTÖJEN VÄHENNYSMENETELMÄT OLEMASSA OLEVIIN LAITOKSIIN PÄÄSTÖLÄHTEITTÄIN

10.1 Typpipäästöt

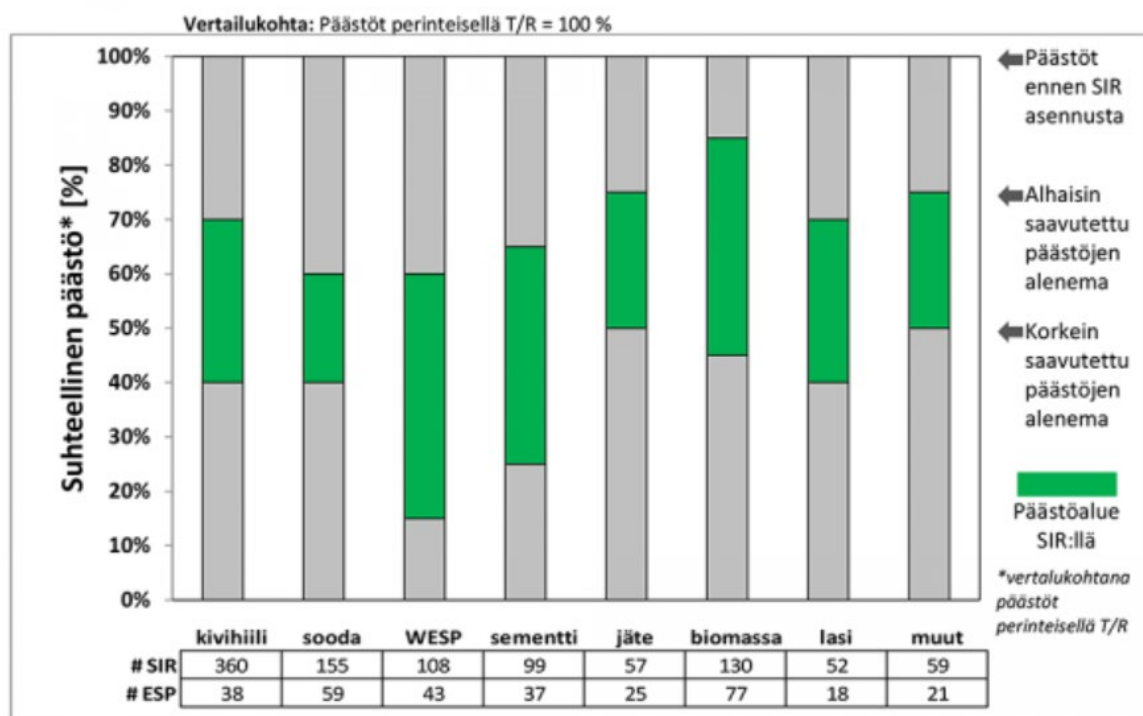
Voimalaitoksilla tapahtuvaa typenoksidien NO_x vähentämisen keinot ovat joko primäärisiä tai sekundäärisiä. Primäärisissä keinoissa keskitytään laitoksen prosessiin ja toimintaan vaikuttamalla palamisilmojen hallintaan. Sekundääriset menetelmät ovat menetelmiä, josisa typen oksidit muutetaan, katalyytin avulla tai ilman, typeksi. SNCR-menetelmässä (Selective Non Catalyst Reduction) ruiskutetaan ammoniakkia tai ureaa oikeaan lämpötila-alueeseen. Konvektiokyky tällä järjestelmällä on noin 50 prosenttia. SCR-menetelmässä (Selective Catalyst Reduction) konvertioasteeksi on saatu jopa 95 prosenttia, jossa typen oksidit saadaan hajotettua typeksi. Kaikkiin laitoksiin ei kuitenkaan pystytä soveltamaan näitä järjestelmiä johtuen kattilan geometriasta tai ilmanjaon tai polttoaineensyötön vaikutuksista. Huomioon on myös otettava mahdollinen laitoksen käytöikä. (Sjöholm 2015.)

10.2 Rikkipäästöt

Polttoaineen sisältämä rikki määrittelee päästöjen vähentämiskeinojen tason, jolloin laitteiston alkuperäisen mitoituksen vaikutus tulee myös tietää. Ensisijaisesti tulee tarkastaa olisiko olemassa olevien laitteistojen säädöllä mahdollista tehostaa päästöjen vähentämistä tai korvaamalla polttoaine vähempirikkisellä polttoaineella. Vaihtoehtoisesti päästöjen syntyyn voidaan vaikuttaa kondenssipesurilla polttoainemuutoksen yhteydessä. Lisäksi savukaasulämmönsiirtimellä saadaan alennettua päästöjä. Näillä muutoksilla saadaan myös syntyvästä lisäenergiasta kustannustukea. Jätteenpolttolaitoksille ja öljylaitoksille on myös kehitetty niin sanottu puolikuivamenetelmä, jossa mikserissä lisätään vettä savukaasupölyyn lämpötilojen säätämiseksi. Lisäksi yksikössä voidaan syöttää poltettua kalkkia prosessiin. Laitteen liitettävyyks voi tapahtua letkusuodattimeen tai sähkösuodattimeen. (Sjöholm 2015.) Polttoaineiden lisäaineilla on myös pystytty alentamaan haitallisia rikkipäästöjä.

10.3 Hiukkaspäästöt

Hiukkaspäästöjen pienentämiseksi tehostamiskeinoina ovat sähkösuodattimen muutokset, joissa vanhat tasisuuntaimet tai osa niistä voidaan korvata SIR-korkeataajuussuuntaimella. Edellytyksenä muutostyölle tulee selvittää laitteiston ja rakenteiden moitteeton kunto. Lisäksi erotteluastetta voidaan tehostaa teknisillä ratkaisuilla lisäämällä uusi kenttä tai korottamalla suodattimen kenttiä. Mahdollinen letkusuodattimen asennus hiukkaserottimeksi antaa lisämahdollisuuden kaasumaisten komponenttien hallintaan. Kuvassa 41 on esitetty korkeataajuustasasuuntaimen asennuksen vaikutus hiukkaspäästöjen vähenemiseen. (Sjöholm 2015.)



KUVA 41. Korkeataajuusuntaimen asennuksen vaikutus hiukkaspäästöihin. (Sjöholm 2015).

11 HÄIRIÖTILANTEET

Häiriötilanne on prosessissa tapahtuva tilanne, jolloin normaalin ajotilanteen päästö- ja pitoisuus raja-arvot ylittyvät. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi prosessien käynnistykset ja pysäytykset, prosessien ohitustilanteet, huoltoseisokit ja suodatinlaitosten häiriöt. Häiriötilanteet vaikuttavat merkittävimmin rikki- ja hiukkaspäästöjen määrään. Polttoprosessin käynnistys voi kestää jopa vuorokauden ja häiriötilanteen päästöt ovat tuona aikana poikkeuksellisen suuria. Taulukossa 7 on kuvattu tyypillisiä normaaliajon sekä häiriötilanteiden savukaasuaroja.

Savukaasut ²⁾	Pitoisuudet			
	Meesauuni	Soodakattila	Kuorikattila	Hajukaasukattila
vesihöyry, %	28 ... 30	20 ... 30	15 ... 25	15 ... 30
happi piipussa, %	5 ... 7	5 ... 9	7 ... 12	4 ... 14
hiilidioksidi, %	18 ... 21	10 ... 14	6 ... 7	4 ... 10
hiilimonoksidi, ppm	alle 100	alle 200	0 ... 1 000	
typen oksidit, ppm	100 ... 200	50 ... 100	50 ... 200	200
rikkidioksidi, ppm				
- pesurin jälkeen	40	0 ... 10	0 ... 10	0 ... 50
- ennen pesuria	400 ... 4000	100 ... 300		500 ... 4000
hajukaasut, ppm	0 ... 20	0 ... 10		10 normaaliajo
	20 ... 100	10 ... 100		< 50 000 ohitus
hiukkaset, mg/m ³ n				
- ennen sähkösuodatinta	30 000	15000... 20000	3 000... 6 000	
- sähkösuodattimen jälkeen	50	50	50	

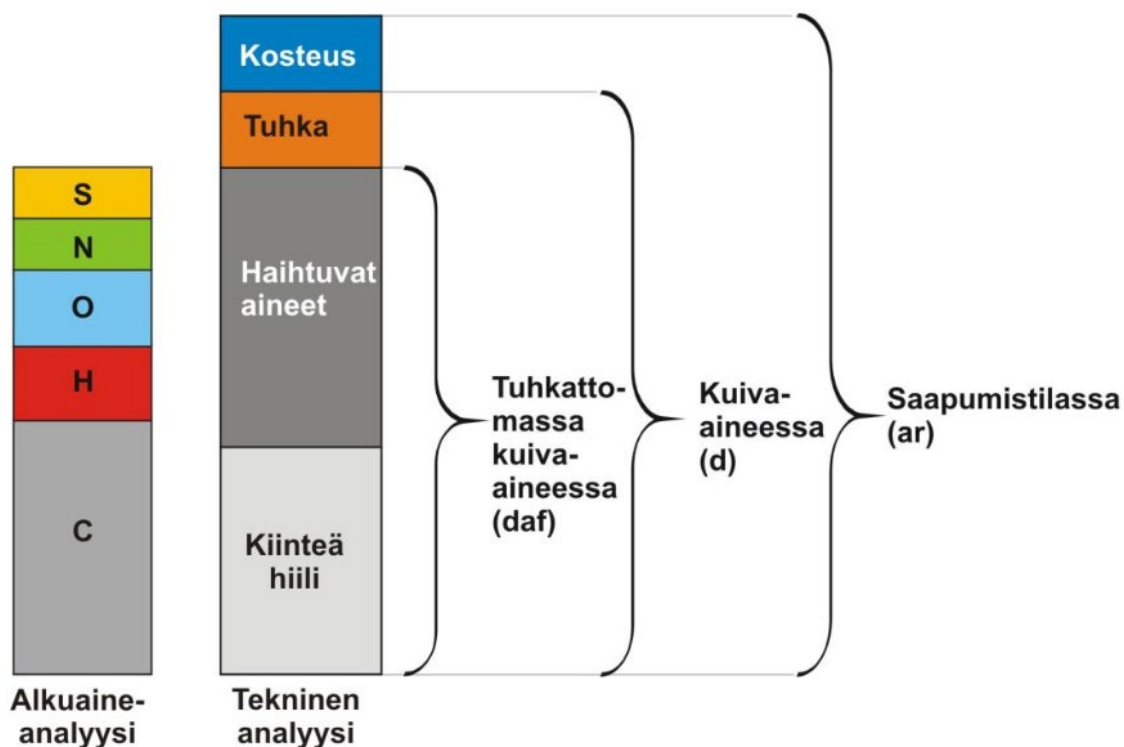
TAULUKKO 7. Tyypillisiä normaaliajon sekä häiriötilanteiden savukaasuaroja meesauunille, soodakattilalle, kuorikattilalle ja hajukaasukattilalle. (Ympäristömittaukset 2 – 7.)

Toiminnanharjoittajan tulee viranomaisten velvoittamana seurata syntyviä päästöjä prosessista riippuen tunti, vuorokausi, vuosikeskiarvoja sekä syntyviä huippuarvoja. Lisäksi tulee seurata asetettujen raja-arvojen ylityksiä ja ylityksen kestoa. Mikäli laitoksella ei ole jatkuvatoimista seurantaan, voidaan syntyvät päästöt määrittää laskemalla. Laskennassa tarvittavia prosessitietoja ja päästökertoimia, joita ovat tuotantotiedot, laitoksen käynti- ja häiriöaika, polttoaineen kulutus, puhdistusmenetelmien erotusaste ja toiminta. Tarvittavat arvot saadaan laitoksen toimittajan lähtötiedoista ja referenssimittausten sekä päästömittausten tuloksista. Menetelmä sopii parhaiten normaaliajon häiriötilanteiden ylitysten seurantaan ja päästöraja-arvojen ylityksen seurantaan. (Ympäristömittaukset 2 – 7.)

12 POLTTOAINEET

12.1 Lämpöarvo

Polttoaineen lämpöarvo kuvaa polttoaineen täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpöenergian määrää. Yleisesti lämpöarvon mittayksikkönä käytetään MJ/kg, joka tarkoittaa kuinka paljon polttoaineessa on energiaa massayksikköä kohden. Tehollisen lämpöarvon määritelmä onkin yleensä juuri lämpöarvo, joka on sama kuin alempi lämpöarvo, jossa kaikki polttoaineeseen sitoutunut vesi oletetaan höyrystyvän polton yhteydessä. Ylempi lämpöarvo ei ota huomioon veden höyrystymiseen vaadittavaa energiamäärää, vaan oletuksena on, että kaikki vesi on nesteinä polton jälkeen. Kuvassa 42 on esitetty polttoaineiden määrittäysperusteet. Puuaineksen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on useimmiten välillä 5,1–5,6 kWh/kg (18,3–20,0 MJ/kg). (Kokkonen ja Lappalainen 2005, 29.)



KUVA 42. Eri määrittäisperusteet polttoaineille (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luhtama ja Korhonen 2016, 24).

12.2 Kosteus

Kosteuden vaikutus palamisen hyvytyteen on yksi merkityksellisimpiä tekijöitä ja siksi kosteuden määrittämisellä voidaan laskennallisesti selvittää saatava energiamäärä käytettävästä polttoaineesta. Energiamäärällä voidaan määrittellä polttoaineen hinta. Kosteuden määrittämiseen on kehitetty laitoskohtaisiakin mittausten menetelmiä, joissa esimerkiksi robotti ottaa saapuvasta polttoaine-erästä näytteet ja kuljettaa ne automaattiseen kosteudenmäärittäslaitteeseen. Näin tiedetään reaaliaikaisesti käytettävän polttoaineen laatu. Perinteisin menetelmä perustuu polttoaineen kuivatukseen ja siitä vapautuneen kosteuden vaikutukseen polttoaineen painoon. Kuivatus suoritetaan standardin EN ISO 18134-2:2017 mukaan, jossa polttoainetta kuivataan siihen tarkoitettussa uunissa 105°C lämpötilassa. Kuivatusta seurataan välipunnituksilla, jolloin todetaan näytteen kuivuminen. Tavoitteena on, ettei paino muuttuisi ja näytteestä saataisiin ”rutikuiva”. Menetelmän onnistumisen edellytyksenä on, että näyte on termisesti stabiilia ainetta eikä hajoa lämmönvaikutuksesta. Termisesti epästabiliin näytteen kosteuden määrittäminen tapahtuu aineen lämmittämällä typpikaasuvirrassa ja punnitsemalla kuivausaineen ja veden painonmuutos. (Raikko ym. 2002, 121 – 122.)

Taulukossa 8 vertaillaan kosteuden vaikutusta teholliseen lämpöarvoon saapumistilassa yksiköissä MJ/kg ja kWh/kg.

Polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa %	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa kWh/kg
55	7,48	2,08
50	8,58	2,38
45	9,68	2,69
40	10,78	3,00
35	11,89	3,30
30	12,99	3,61
25	14,09	3,91
20	15,19	4,22
15	16,29	4,53
10	17,40	4,83
5	18,50	5,14
0	19,60	5,44

TAULUKKO 8. Hakkeen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eri kosteusprosentteilla (1 kWh/kg=3,6 MJ/kg). Laskennassa kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on käytetty arvoa 19,6 MJ/kg (Hakonen ja Laurila 2011, 12.)

Kuivauksen jälkeen kokonaiskosteus saapumistilassa lasketaan seuraavalla kaavalla: (Kokkonen 2005, 73)

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (3)$$

missä:

M_{ar} = Polttoaineen kokonaiskosteus saapumistilassa massaprosentteina.

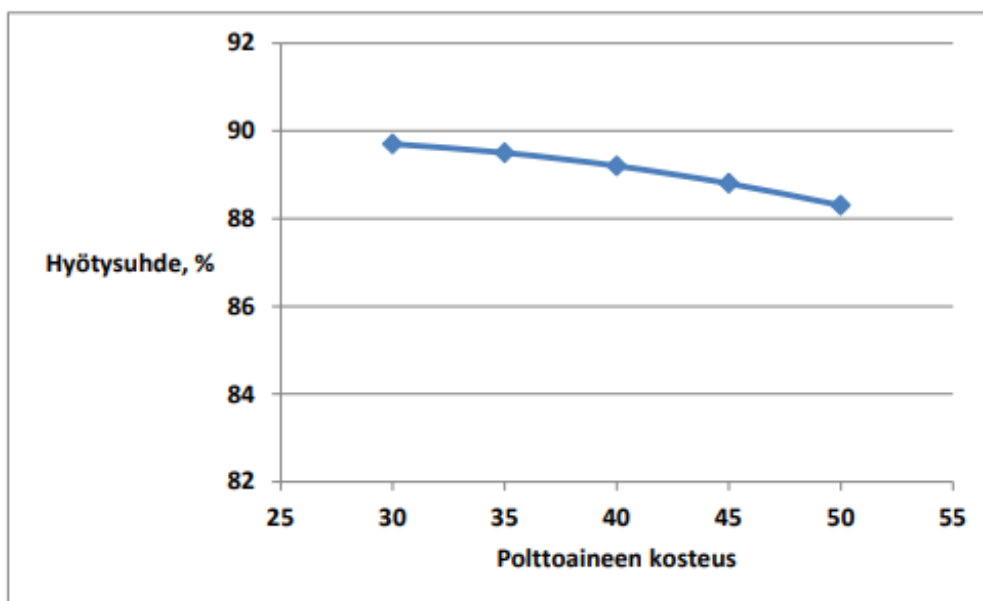
m_1 = Tyhjän kuivatusastian massa grammoina.

m_2 = Kuivatusastian ja näytteen massa grammoina ennen kuivatusta.

m_3 = Kuivatusastian ja näytteen massa grammoina kuivatuksen jälkeen.

m_4 = Pakkaukseen liittynyt kosteuden massa grammoina.

Kuvassa 43 esitetään polttoaineen kosteuden vaikutus kattilan hyötysuhteeseen. Arviossa ei ole otettu huomioon kosteuden vaikutusta palamisen laatuun.



KUVA 43. Polttoaineen kosteuden vaikutus hyötysuhteeseen. (Flyktman ym. 2012, 35).

12.3 Lämpöarvon määrittäminen

Pienemmillä biolaitoksilla ei useimmiten ole käytössään kalorimetristä laskentaa. Tällöin kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan seuraavan yhtälön mukaisesti: (Kokkonen 2005, 73)

$$Q_{p, \text{net}, ar} = Q_{p, \text{net}, d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0.02443 * M_{ar} \quad (4)$$

missä:

$Q_{p, \text{net}, ar}$ = Saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{p, \text{net}, d}$ = Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) käyttäen keskimääräisiä kuiva-aineen lämpöarvoja

M_{ar} = Polttoaineen kokonaiskosteus saapumistilassa massaprosentteina

0,02443 = Veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (+25 °C) (MJ/kg)

Kalorimetrinen lämpöarvon määrittäminen tapahtuu tasapainokosteudessa olevaa tai kuivattua polttoainetta polttamalla happiatmosfäärissä (puhdashappi) ja mittaamalla poltossa vapautuva energiamäärä. Standardin mukaisessa menetelmässä teräksiseen paineastiaan asetetaan panos (1 g pelletti), joka sytytetään sytytyslangalla palamaan. Näin vapautuva energia siirtyy ympärillä olevaan vesihauteeseen ja nostaa kalorimetrisysteemin lämpötilaa. Saadusta kalorimetrisestä tuloksesta (ylempi lämpöarvo) voidaan laskennallisesti määrittää polttoaineen tehollinen lämpöarvo. (Raikko ym. 2002, 123)

Standardin ISO 1928 mukainen yhtälö tehollisen lämpöarvon määrittämiseen on: (Raikko ym. 2002, 123.)

$$Q_{net, v, m} = (Q_{gr, v} - 206[H] * \frac{100 - M_t}{100 - M}) - 23M_t \quad (5)$$

missä:

$Q_{net, v, m}$ = Alempi (tehollinen) lämpöarvo (J/g) kun polttoaineen kosteus on MT

$Q_{gr, v}$ = Analysoidun näytteen ylempi (kalorimetrinen) lämpöarvo (J/g)

[H] = Analysoidun näytteen vetypitoisuus painoprosentteina sisältäen myös näytteen kosteuden sisältämän vedyn

M_t = Polttoaineen kosteusprosentti painoprosentteina, jolle lämpöarvo lasketaan; kuivalle polttoaineelle

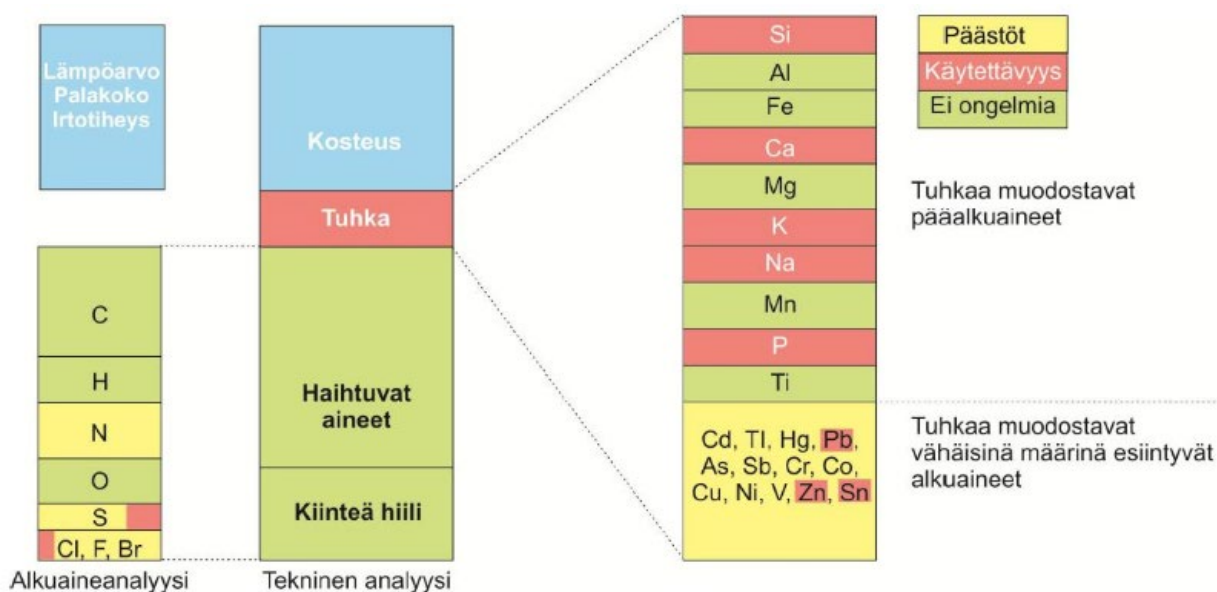
$M_t = 0$, analyysikostealla näytteelle

$M_t = M$; Käyttökosteudessa olevalle polttoaineelle.

$M_t = M$ = Kokonaiskosteus ja M analysoidun näytteen kosteus (analyysikosteus) painoprosentteina.

12.4 Polttoaineiden ominaisuudet

Tiedettäessä polttoaineiden ominaisuudet pystytään jäljittämään polton yhteydessä vapautuvat haihtuvat aineet ja määrittämään syntyvät ongelmat. Poltossa vapautuvasta polttoaineen tyyppistä N_2 suurin osa muuttuu alkuainetyypeksi aiheuttaen typen oksidipäästöjä NO_x . Rikin oksidien SO_x muodostuminen on merkityksellinen niin päästöjen, tuhkakemian sekä korroosiota aiheuttavien ilmiöiden kannalta. Kloori aiheuttaa rikin kanssa samankaltaisia ongelmia kuumakorrosion muodossa, ollen huonontavana tekijänä laitojen käyttöä kannalta. Alkalimetallit kalium ja natrium vaikuttavat agglomeraatioon tuhkan käyttäytymisessä sekä kattilapintojen likaantumiseen yhdessä kloorin kanssa. Raskasmetallien sitoutuminen vaikuttaa tuhkan hyötykäyttöön, syntyviin savukaasupäästöihin sekä korroosiota aiheuttaviin mekanismeihin. Tutkittaessa polttoaineiden ominaisuuksia on myös tärkeä tietää polttolämpötila ongelmakohtien paikantamiseksi. Kuvassa 44 on esitetty polttoaineen sisältämien alkuaineiden vaikutus syntyneisiin päästöihin, alkuaineiden käytettävyyteen sekä ei-ongelmia aiheuttaviin komponentteihin. (Alakangas ym. 2016, 198 – 199.)



KUVA 44. Polttoaineanalyysin tulosten yhteys polttoon. (Alakangas ym. 2016, 198.)

Taulukossa 9. vertaillaan eri polttoaineiden tuhkapitoisuutta, lämpöarvoja, kosteuksia ja irtotiheyksiä. (Alakangas ym. 2016, 205.)

Polttoaine	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo $q_{p,net,d}$, MJ/kg	Kosteus M_{ar} , p-%	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa $q_{p,net,ar}$, MJ/kg	Irtotiheys BD, kg/irto- m^3	Energiatiheys $E_{ar,3}$, MWh/irto- m^3	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa A_d , p-%
Kivihili	27,0–28,8	8–14	24,3–25,1	-	-	4,4–17,0
Raskas polttoöljy	40,5–41,5	< 0,1	40,5–41,5	985–1 020	-	0,02–0,05
Kevyt polttoöljy	35,2–35,9 MJ/litra	0,01–0,02	35,2–35,9 MJ/litra	820–840	-	< 0,001
Pyrolyysiöljy	18,4–20,1	20–30	13,0–18,0	1100–1300		0,01–0,1
Jyrsinturve (keskiarvo)	20,6	47	9,8	330	0,91	6,3
Palaturve (keskiarvo)	21,3	35	11,9	385	1,30	3,5
Turvopelletti	19,7–21,0	14–18	15,1–18,7	680–750	3,0–3,7	2,0–6,0
Sahanpuru	19,0–19,2	45–60	2,2–10,0	250–350	0,45–0,70	0,4–0,5
Koivunkuori	21,0–23,0	45–55	8,0–11,0	300–400	0,60–0,90	1,0–3,0
Havupuun kuori	18,5–20,0	50–65	5,0–9,0	250–350	0,50–0,70	1,0–3,0
Vanerimurske	19,0–19,2	5–15	16,0–18,0	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8
Puupelletit	18,9–19,5	6–9	7,0–18,2	600–650	2,8–3,3	0,1–0,5
Rankahake	18,5–20,0	40–55	7,0–11,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2,0
Polttopuu	18,5–19,0	20–25	13,4–14,5	240–320	1,35–1,70 MWh/pino- m^3	0,5–1,2
Hakkuutähdehake	18,5–20,0	50–60	6,0–9,0	250–400	0,7–0,9	1,0–3,0
Kokopuuhake	18,5–20,0	45–55	7,0–10,0	250–350	0,7–0,9	1,0–2,0
Kantomurske	17,2–20,9	12–45	6,8–15,5	250–300	0,7–1,2	0,5–20,0 (keskimäärin 4,0)
Pajuhake	18,6	51–53	8,1–8,5	300–440	0,3–0,4	0,4–1,1
Ruokohelpi (kevätkorj.)	17,3–18,7	10–25	12,6–16,6	60–80	0,3	1,0–8,0
Energiajyvä	17,3	11	15,5	600	2,6	2,0
Olki, silputtu	17,4	17–25	12,4–14,0	80	0,3–0,4	5,0
Kierrätyspolttoaine, SRF	17,0–37,0	15–35	13,0–35,0	150–250	0,7–1,0	3,0–7,0
Kotitalouden kuivajäte	18,5–23,4	25–36	11,7–16,9	150–200	0,7–1,0	5,3–16,1

Taulukko 9. Polttoaineiden tuhkapitoisuuden, lämpöarvon, kosteuden ja irtotiheyden vertailu (Alakangas ym. 2016, 205).

Taulukossa 10. vertaillaan polttoaineiden kemiallisia ominaisuuksia (p-% kuiva-aineessa) (Alakangas ym. 2016, 206.)

Polttoaine	Hiili, C	Vety, H	Rikki, S	Typpi, N	Kloori, Cl	Natrium, Na	Kalium, K
Kivihiili	66–74	3,5–5,0	< 0,7	1,2–2,1	< 0,005	< 0,010	< 0,003
Raskas polttoöljy	88,4	10,1	0,8–0,95	0,3–0,4	-	< 0,0004	-
Kevyt polttoöljy	86,2	13,7	0,1	0,01–0,03	-	-	-
Pyrolyysiöljy	50–60	7,0–8,0	< 0,05	< 0,4	0,07	< 0,008	< 0,001
Polttoturve	52–56	5,0–6,5	0,05–0,3	1,0–3,0	0,02–0,06	0,007	0,02
Sahanpuru	48–52	6,2–6,4	< 0,05	0,3–0,4	0,01–0,03	0,001–0,005	0,02–0,15
Kuori	48–52	6,2–6,8	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,05	0,007–0,020	0,1–0,5
Vanerimurske	48–52	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5	< 0,05	0,25–0,50	0,7
Puupelletit	49–50	6,0–6,1	< 0,007	< 0,16	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Polttopuu	48–52	6,0–6,5	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Rankahake	48–52	5,4–6,0	< 0,06	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Hakkuutähdehake	48–52	6,0–6,2	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,04	0,075–0,0300	0,1–0,4
Kokopuuhake	48–52	5,0–6,0	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Kantomurske	47–54	5,6–6,5	< 0,05*	0,1–1,1*	ei saatavilla	ei saatavilla	ei saatavilla
Pajuhake	47–48	6,1	< 0,025	0,2	< 0,04	< 0,005	0,2
Ruokohelpi (kevatkorjattu)	45–50	5,4–6,2	0,04–0,17	0,3–2,0	0,01–0,09	< 0,002–0,04	< 0,08–0,6
Energiajyvä	45	6,5	0,14	2,0	0,04	0,002–0,005	0,4–1,0
Oilki, silputtu	45–47	5,8–6,0	0,01–0,13	0,4–0,6	0,14–0,97	0,01–0,6	0,69–1,30
Kierrätyspolttoaine (SRF)	45–56	5–9	0,05–0,20	0,2–0,9	0,1–0,9	0,001–0,005	0,001–0,002
Kotitalouden kuivajäte	47,1–53,5	6,1–7,2	0,08–0,22	0,67–1,07	0,2–1,5	0,001–0,005	0,001–0,004

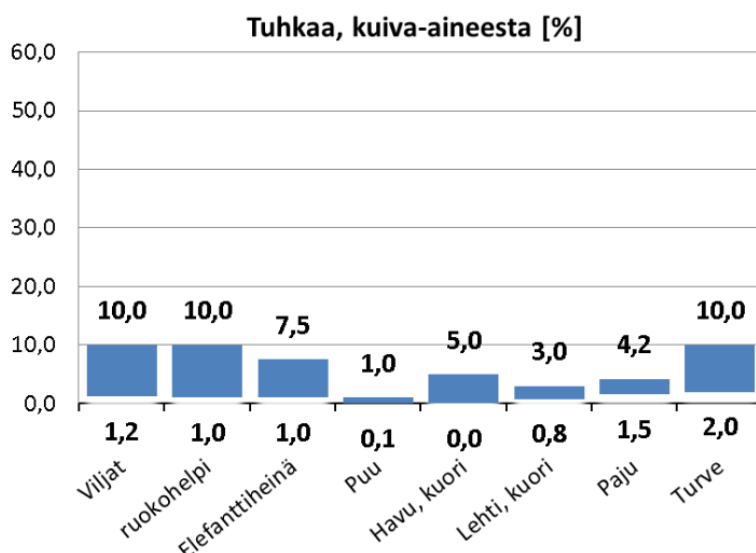
Taulukko 10. Polttoaineiden kemiallisten ominaisuuksien vertailu (p-% kuiva-aineessa). *Maa-aines nostaa tasoa (Alakangas ym. 2016, 206).

12.5 Käytöstä poistetun puun luokittelu

Käytöstä poistettu puu luokitellaan luokkiin A, B, C ja D. Kiinteät biopolttoaineet on jaettu kahteen luokkaan: A ja B ja ne kuuluvat standardin SFS EN ISO 17225-1 piiriin eikä niihin sovelleta jätteenpoltoasetusta. Luokkaan C kuuluu puutähde, joka sisältää orgaanisia yhdisteitä ja rakennusmetalleja enemmän kuin luonnonpuu, mutta ei sisällä puunkyllästysaineita (paineekyllästetty puu). Puujäte kuuluu kierrätyspolttoaineisiin (SFS EN 15359) ja siihen sovelletaan jätteenpoltoasetuksen normeja. Luokka D on puunkyllästysaineella käsiteltyä puuta, joka on vaarallista jätettä. (Alakangas ym. 2016, 198.)

13 TUHKAT

Suurin syy ennakoimattomiin alasajoihin on tuhkasta aiheutuvat ongelmat. Tämä palamaton epäorgaaninen jäännös aiheuttaa prosessissa ongelmia esimerkiksi polttoaineen syöttöön, vapautuvien kaasukomponenttien muodostumiseen ja erotteluasteen riittävyteen. Kuvassa 45 on kasvibiomassan ja turpeen tuhkapitoisuuden vertailu.

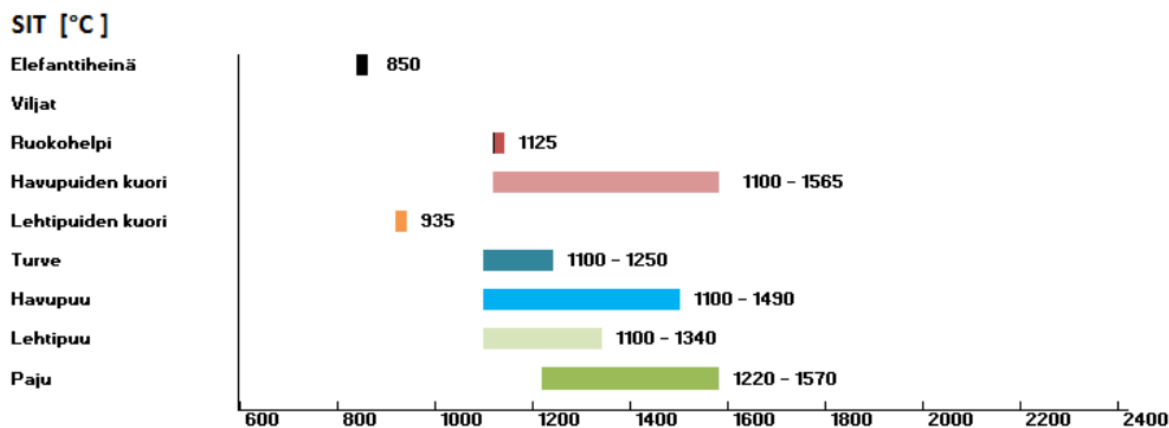


KUVA 45. Kasvibiomassan ja turpeen tuhkapitoisuuden vertailu (Kuittinen 2012, 31.)

Tuhkan aiheuttamia likaantumisen ongelmia kutsutaan englanninkielisillä nimityksillä "slagging" (kuonaantuminen) ja "fouling" (likaantuminen). Kuonaantuminen on tyypillisimmillään tulipesän säteilypintojen alueella, likaantuminen tapahtuu pääsääntöisesti kattilan konvektio-osissa. Tuhkan kerrostumisen mekanismeja on kaksi. Mekanismin syntyyn vaikuttaa hiukkasten koko ja polttolämpötila. (Raikko ym. 2002, 269 – 273.)

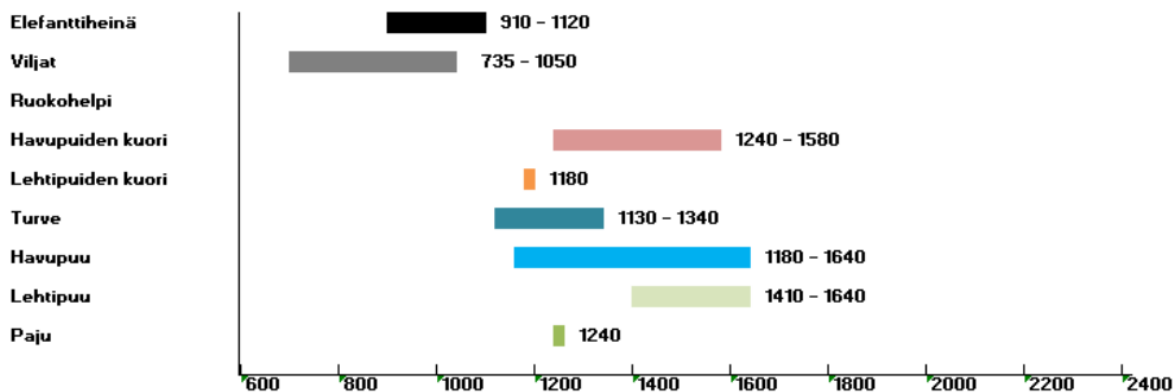
13.1 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

Lämpötiloilla on suuri merkitys tuhkan sulamisen käyttäytymiseen. Jos poltossa on puuta, niin tuhkan sulamislämpötila on suhteellisen korkea (1400°C). Tästä syystä sulamisongelmia ei ilmene kovinkaan usein arinapoltoissa. Puun tuhkan vaikutus sulaessaan tulipesän muurauksiin on kuitenkin erittäin merkittävää syövyttämällä muurauksia. Kuivan palaturpeen arinapoltoissa esiintyy ongelmia sen alhaisemman tuhkan sulamislämpötilan takia. Sulaminen alkaa tasolla 1050...1150°C, jolloin arinapolton ongelmia on pystytty vähentämään mekaanisilla vesijähdytetyillä arinoilla. Loppuunpalamisvyöhykkeelle voidaan lisäksi puhalttaa esilämmittämätöntä palamisilmaa tai savukaasukanavasta otettavaa kiertokaasua ongelman pienentämiseksi. Kuvissa 46, 47, 48 ja 49 on esitetty elefantiheinän, viljan, ruokohelmin, havu- ja lehtipuiden kuoren, turpeen, havupuun, lehtipuun ja pajun tuhkan sulamiskäyttäytymislämpötilat.



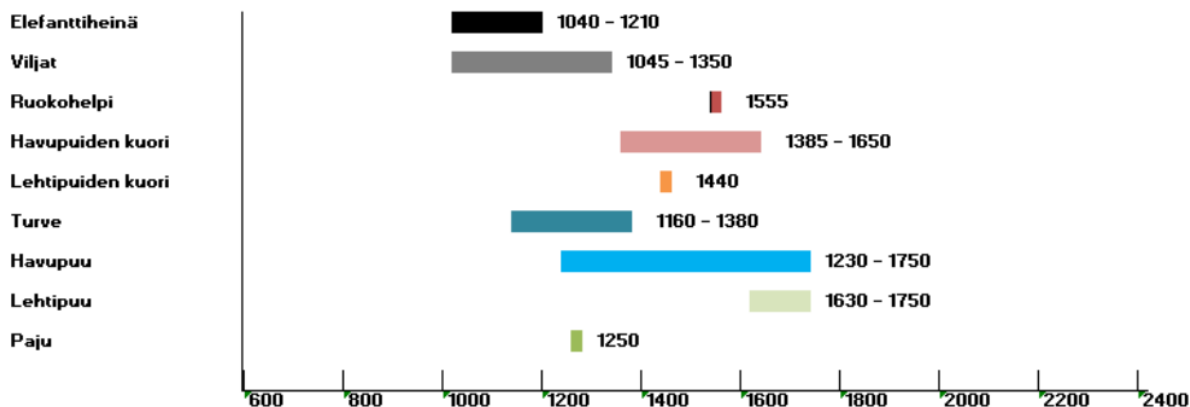
KUVA 46. Tuhkan sulamislämpötilojen vertailu (Kuittinen 2012, 34).

SOT [°C]



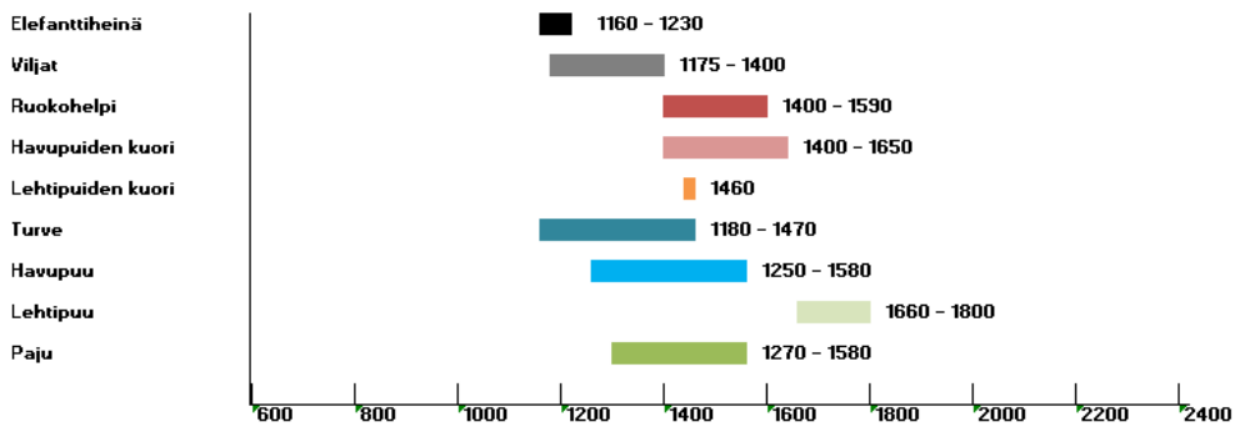
KUVA 47. Tuhkan sulamislämpötilojen vertailu (Kuittinen 2012, 34).

HT [°C]



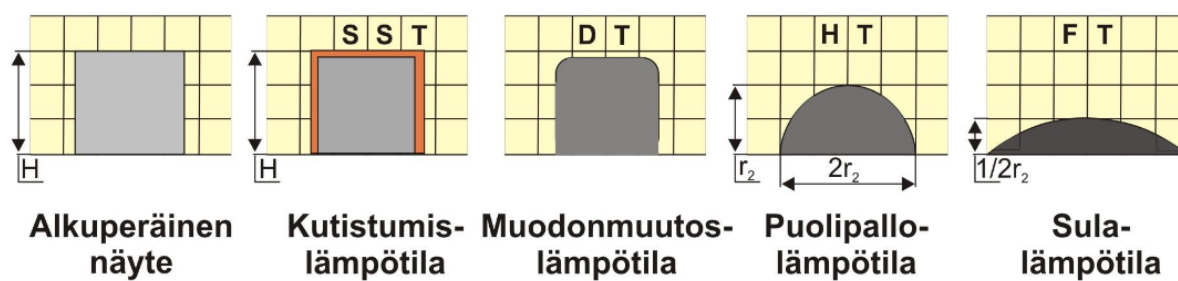
KUVA 48. Tuhkan sulamislämpötilojen vertailu (Kuittinen 2012, 34).

FT [°C]



KUVA 49. Tuhkan sulamislämpötilojen vertailu (Kuittinen 2012, 34).

Tuhkan sulamiskäyttäytyminen määritellään kiinteille biopolttoaineille standardin CNT/TS 15370-1:2006 ja kivihieille sekä turpeelle ISO 540:2008 mukaan, missä sulamisen käyttäytymistä kuvataan sylinterimäisen näytteen muodonmuutoksella. Erona ovat biopolttoaineen, kivihieilen ja turpeen tuhkauslämpötilat, jotka ovat biopolttoaineilla 550°C ja kivihieillä ja turpeella 815°C. Eron syynä on karbonaattien hajoaminen hiilidioksidiksi korkeammassa lämpötilassa. Kun edellä mainitut lämpötilat on saavutettu, nostetaan lämpötilaa 3-10°C minuutissa ja tarkkaillaan näytteen sulamisen käyttäytymistä. Alla olevassa kuvassa 50 sulamiskäyttäytymistä kuvataan neljän eri päävaiheen mukaan, ne ovat muodonmuutospiste, pehmenemispiste, puolipallo-piste ja juoksevuuspiste muodonmuutoslämpötila (Beginning of Softening SOT Deformation Temperature DT), puolipallolämpötila (Hemisphere Temperature HT), ja juoksevuuslämpötila/sulamislämpötila (Flow Temperature FT). Kutistumisen alkamisen lämpötila on (Beginning of Sintering SIT Shrinkage Starting Temperature SST). (Alakangas ym. 2016, 37.)



KUVA 50. Tuhkan sulamiskäyttäytyminen biopolttoaineilla (Alakanga ym. 2016, 37).

14 VTT:N OHJE MITTAUSPAIKASTA

Ilmansuojeluyhdistys ry. ja VTT Prosessit tekivät keväällä 2002 ympäristöministeriölle aloitteen hankkeesta, jossa harmonisoidaan päästömittauskäytäntöjä kansallisella tasolla. Hanke toteutettiin vuosien 2002 ja 2003 aikana ympäristöministeriön, VTT Prosessien ja hankkeessa mukana olleiden yritysten rahoittamana. Hankkeen tuloksena valmistui Päästömittausten käsikirja, jonka laatimisesta on vastannut VTT Prosessit. Hankkeen koordinoinnista vastasi Ilmansuojeluyhdistys ry. ja valvonnasta Uudenmaan Ympäristökeskus.

VTT on laatinut ohjeen VTT-R11101-08 15.12.2008 toiminnanharjoittajille, suunnittelijoille ja polttolaitoksille päästömittausten laadun varmistamiseksi. Päästömittaustaikaa ja -mittaustason on täytettävä kaikki vaatimukset, jotka niille on asetettu, jotta voidaan taata mittaustulosten edustavuus ja vertailukelpoisuus asetettuihin velvoitteisiin nähden. (Puustinen ja Pellikka 2008, 4.)

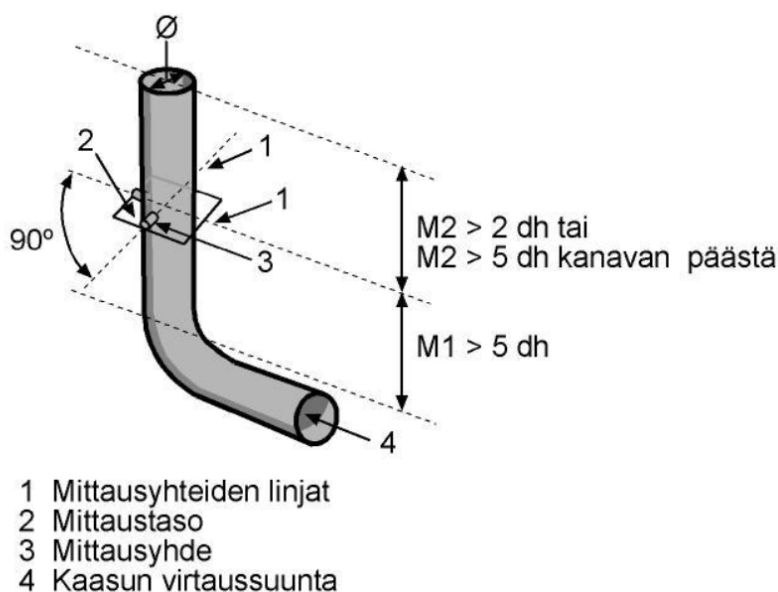
Ohjeessa käydään läpi vaatimukset mittaustaikalle kuten tason valintaa, liikkuminen päästömittaustaikalle, tarvittavia varusteita, mittausyhteet, unohtamatta työturvallisuuden liittyviä seikkoja. Ohjeessa huomioidaan myös eurooppalaisten standardien vaatimukset päästömittaustaikalle sekä kiinteille päästömittalaitteistoille huomioitavia seikkoja. Ohjetta voidaan hyödyntää suunnittelussa, rakennettaessa uusia päästömittaustaikakoja uusiin polttolaitoksiin sekä olemassa olevien polttolaitosten mittausten parantamista asentamalla uusia

mittaustasoja. Tavoitteena on, että Suomeen saadaan toimivat, turvalliset mittauspaikat, joiden avulla toiminnanharjoittajien, päästömittaajien, mittalaittevalmistajien että viranomaisten työ päästömittauksiin liittyen helpottuu. (Puustinen ja Pellikka 2008, 5)

Yleisohjeissa mittaustaikan vaatimuksina on mittaustaikan laadukkaan suunnittelun ja käytönaikaisten tarkastusten luominen. Mittaustaikalle pääsyn tulee olla mahdollisimman helppoa, onhan päästömittauksissa käytettävät laitteistot kalliita ja niiden laahaaminen mittapaikalle saattaa aiheuttaa tapaturmariskin. Lisäksi mittaukselle tulee olla rakennettu riittävät suojatilat ja varusteet hätätilanteiden varalle. Putoavien kappaleiden mahdollisuus tulee estää, jottei alemmilla kerroksilla työskentelevät joutuisi vaaraan.

14.1 Mittaustaso

Päästömittaustason tulee olla suunniteltu mittausten kannalta laadukkaaseen paikkaan, jossa savukaasujen virtaus on tasoittunut ja joka on homogeeninen mitattavien komponenttien suhteen. Tällä varmistetaan edustavan näytteen toteutuminen. Jos edellä mainitut kriteerit eivät kuitenkaan täyty, niin mittaukset tulee suorittaa ja mittauseraportissa arvioida mahdollisten mittaustaikasta aiheutuneiden häiriötekijöiden vaikutus mittaustuloksiin. Kuvassa 51 on mittaustason mitoitus.



KUVA 51. Mittaustason sijainti kanavassa (Päästömittausten käsikirja 2007, 7).

Uusia laitoksia suunnitellessa tulee muistaa päästömittausten edellyttämät vaatimukset, jotta turhilta muutosten- ja korjaustoimilta vältyttäisiin. Tikkaiden ja irtotelineiden käyttöä pääsyssä mittaustaikalle ja mittausten aikana tulee välttää. Mittalaitteiden kuljettaminen mittaustaikalle tulisi toteuttaa mahdollisimman vaivattomasti nostokoria tai hissiä apuna käyttäen. Jos kuitenkin laitteisto joudutaan kantamaan mittaustaikalle, niin on otettava kiinteiden rakenteiden ja mahdollisten nostoköysien kiinnityspisteiden kunto huomioon. Lisäksi on muistettava myös portaissa, että kuljettu aika on pois mittauksien tarkkailusta. Mahdollisten sairastapauksien varalta piipusta nopealla poispäisyllä olisi potilaan selviytymisen kannalta suuri vaikutus. Tästä syystä

onkin korkeisiin piipuihin rakennettu erilaisia hissiratkaisuita esimerkiksi piipun ulkopuolelle, jolloin nopea ja turvallinen liikkuminen varmistetaan.

Kiinteästi asennetuille (AMS Automated Measuring Systems) päästömittauslaitteistoille on olemassa laadunvarmistus standardi (EN14181), joka määrittelee toiminnanharjoittajalle vaatimukset referenssimittauksista (SRM Standard Reference Method) sekä vuosittain tehtävistä valvonnasta (AST Annual Surveillance Test). Standardin tarkoituksena on vertailumittausten avulla varmistaa kiinteästi asennettujen päästömittauslaitteistojen toimintaa direktiivien ja asetusten mukaisesti sekä mittausten välillä tapahtuvaa laadunvarmistusta. Toiminnanharjoittajalla on vastuu, laitteiston laadukkaasta toiminnasta ja velvollisuus osoittaa tämä viranomaisille. Jatkuvatoimisten päästömittauslaitteistojen tarkastuksessa tulee testata nolla- ja kalibrointipisteet säännöllisin väliajoin. Tehtävän suositukseksi on viikoittainen tarkastus, edellyttäen laitteiston luona käyntiä. Mittauspaikan ja -tason valinnassa käytetään standardia E15259, jossa lähtökohtaisesti mittauspaikaksi valitaan kanavan pystyosa. Mittaustaso on kanavan poikkileikkauksen pinta-ala, josta näyte mitataan. Savukaasuvirtaukseen vaikuttavat häiriötekijät tulee olla mahdollisimman kaukana mittaustasosta. Häiriötekijöinä ovat mahdolliset mutkien aiheuttamat virtausmuutokset sekä puhaltimien ja venttiilien aiheuttamat häiriöt savukaasuvirtaan.

Yleensä virtauskriteerien täyttymiseksi riittää, kun häiriöttömän virtauksen etäisyys on ennen mittaustasoa viisi kertaa hydraulinen halkaisija ja kaksi kertaa hydraulinen halkaisija mittaustason jälkeen. Piipun päähän tarvitaan kuitenkin häiriötöntä virtausetäisyyttä viisi kertaa hydraulinen halkaisija.

Virtauksen suunnalle on asetettu myöskin vaatimus, jonka poikkeamalle on asetettu 15 asteen raja. Tämän selvittämiseksi apuna voidaan käyttää pitot-putkea. Negatiivista virtausta ei mittaustasolla sallita ja virtauksen dynaamisen paineen tulee olla suurempi kuin 5 Pa. Lisäksi kaasuvirtojen nopeussuhteen tulee olla pienempi kuin 1:3. Näiden toimien tarkoituksena on saada mahdollisimman edustavat näytteet.

Kiinteiden mittauslaitteiden asentamisesta tulee sopia laitevalmistajan kanssa mahdollisimman hyvän mittaustason löytymiseksi. Lisäksi on huomioitava mahdolliset vertailumittaukset ja niille asennettavat mittausyhteet. (Puustinen ja Pellikka 2008, 5 – 10.)

15 TAVOITTEENA ONNISTUNUT PÄÄSTÖMITTAUS

Päästömittauksen onnistumisen kannalta laitoksen käyttäjien tulee valmistautua mittauspäivään/ päiviin selvittämällä mahdollisuudet kuormavaihteluihin ja mahdolliset muut häiriötä aiheuttavat tekijät kuten polttoaineen epätasalaatuisuus, riittävyys ja mahdolliset mekaaniset häiriön aiheuttajat. Mittaustasojen savukaasujen lämpötilat pitää ottaa huomioon mittalaitteiden kuumuuden keston takia. Esimerkiksi Gasmeter FTIR (Fourier Transform Infrared) -laitteiston näytelinjastojen lämpötila ei saa ylittää 250°C.

Kun kattilalaitos menee häiriötilaan, joudutaan mittaus käynnistämään uudelleen ja tarvittaessa mittauslinjastot huuhtelemaan. Tällöin mittaamisesta muodostuu lisäkuluja. Lisäksi olisi hyvä ennalta kokeilla esimerkiksi pienellä kuormalla ajoa, mikäli se on käytännössä mahdollista normaalina käyntiaikana. Näin saadaan kokemusta erilaisten prosessiarvojen hallinnasta sekä mittausten jaksottamisesta ajankohtaan, jolloin sen toteuttaminen prosessiarvoihin on helpompaa.

Laitoksen käyttäjien on hyvä olla perillä varolaitteiden (paineenrajoittimet, yllämpötermostaatit, kuivakiehuntasuojat) toiminta-arvoista ja varolaitteiden sijainnista, kun korkean kuorman mittauksessa liikutaan lähellä hälytyksien raja-arvoja. Kuvassa 52 on kuivakiehuntasuoja hälytystilassa.



KUVA 52. kuivakiehuntasuoja (Ylönen 2018).

16 SAVUKAASUMITTAUKSET TESTIYMPÄRISTÖSSÄ

Savukaasumittausten hyödyntäminen polttoaineiden, petimateriaalien ja palamisilmojen määrittelyssä laitoksen toimivuuden kannalta on osoittautunut hyväksi apukeinoksi varmistaa oikeanlaisten säätöjen ja laitoksen kannalta parhaan polttoaineen sekä polttoaineen ja palamisilmojen seoksen löytymisen. Lisäksi päästöjä liissäviin ajotapoihin voidaan vaikuttaa savukaasumittausten avulla. Savukaasumittauksista on apua puhtaan palamisen löytymiseen esimerkiksi jäännöshapen ja häkäpitoisuuden perusteella. Tutkimusmittauksissa pysytään toteamaan polttoaineiden sopivuus käytetylle polttoprosessille. Etuna testiympäristön hyödyntämiselle edellä mainittuihin kokeiluihin on mahdollisten virheiden pois sulkeminen. Testiympäristössä suoritettut kokeilut jäävät laajamittaisia kokeiluja edullisemmaksi.

17 TOIMINNANHARJOITTAJAN VELVOLLISUUDET

17.1 Tarkastussuunnitelma

Toiminnanharjoittajan on laadittava polttolaitoksen tarkkailusta suunnitelma, joka toimitetaan ympäristölupahakemuksen yhteydessä lupaviranomaiselle tai, jätettäessä rekisteröitymisilmoitusta, kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle. Muutoksia tarkkailusuunnitelmaan tehdään kunnan ympäristönsuojeluviranomaisen tai valtion valvontaviranomaisen hyväksymällä tavalla. Tarkkailusuunnitelma on pidettävä ajan tasalla. (1065/2017 17§) Tarkkailun tavoitteena on tuottaa tarvittavaa tietoa valvontaviranomaiselle laitoksen lupa-

määräysten tai rekisteröintiedellytysten noudattamisen valvomiseksi. Valvontaviranomainen arvioi vaatimusten noudattamista tarkkailutietojen ja vuosiraportoinnin pohjalta. Vuosiraportointi tehdään erillisellä lomakkeella, jonka jättöpäivä on helmikuun loppuun mennessä. tarkastussuunnitelman sisältö on Esimerkiksi polttoteholtaan vähintään 5 MW laitoksen tarkastussuunnitelman sisältö.

Tarkkailusuunnitelman sisällössä on kerrottava laitoksen tietojen lisäksi käytettävät polttoaineet ja niiden varastoinnin sekä laadunseuranta ja palamisolosuhteiden seuranta, päästömittaukset ja niiden seuranta, sekä onko mittaus jatkuvatoimista, jaksottaista vai kertaluontoista. Lisäksi tulee varmistaa päästömittausten laadunvarmennus. (EN 1065/2017 liite 3.)

Toimivuuden seurannassa tarkkaillaan laitoksen suodattimien ja käytön kannalta olennaisten laitteiden kunnonvalvontaa. Huollosta on oltava suunnitelma ja kuinka usein toimet toteutetaan. Jätteiden ja tuhkan hyötykäytön tarkkailussa seurataan lentotuhkan ja pohjatuhkan laatua, hyötykäyttökelpoisuutta ja kaatopaikkakelpoisuutta. Jätteiden synnystä ja laadusta on pidettävä kirjaa ja tarvittavat luovutusasiakirjat tulee tallentaa. Jätevesien tarkkailussa tulee huomioida lauhdeiden, peittauksessa ja nuohouksessa syntyneiden jätevesien sekä kattilan elvytyksessä tulleiden vesien seuranta, joiden seurantaparametreina pidetään seuraavia (lauhteet) määrä, lämpötila, pH, sulfaattipitoisuus, kokonaisfosforipitoisuus, kokonaistyyppipitoisuus, biologinen hapenkulutus, kiintoainepitoisuus sekä raskasmetallit. Syntyvien jätevesien käsittelyyn liittyvät toimet joita ovat jätevesien purku- ja näytteenottoa paikkojen sijainti, joka voi olla merkattuna liitteenä olevaan karttaan, näytteenotto tiheys ja -menettelyt sekä analysoitavat parametrit. Öljynerottimien kunnosta on huolehdittava määrävällein. Laitoksen toiminnasta aiheutuvan melutason mittaukset suoritetaan lähimmän altistuvan kohteen kuten asuintalon, koulun tai päiväkodin mukaan. Melua päästölähteittäin tulee myös seurata. (EN 1065/2017 liite 3.)

Poikkeuksellisten tilanteiden varalle tulee laatia suunnitelma, jossa huomioidaan häiriö- ja poikkeustilanteet sekä maaperän pilaantuneisuuden tarkkailu. Ympäristön vaikutusten tarkkailussa määritellään menettely laitoksen ilmanlaadun, bioindikaattoriseurannan sekä melun yhteistarkkailun suorittamisesta. (EN 1065/2017 liite 3.)

17.2 Mittaussuunnitelma

Kaikkien mittaustoimintaa harjoittavien yritysten tulee laatia ennen päästömittausten aloittamista mittaussuunnitelma (VNA 1065/2017), jonka sisällöstä vastaa mittausten toiminnanharjoittaja Toimivaltaisella valvontaviranomaisella on oikeus saada mittaussuunnitelma pyynnöstä tarkastettavakseen ennen mittausten suorittamista. (VNA 1065/2017 §17.)

Mittaussuunnitelman laajuus huomioon ottaen sisällössä tulee käydä läpi ainakin seuraavia asioita;

- 1) mitattavan kohteen lähtötiedot, joissa kerrotaan kohteen sijainti, kattilan teho, käytettävät polttoaineet ja savukaasujen puhdistuslaitteet,
- 2) mitattavan kohteen prosessin tila, onko kyseessä normaali ajotilanne tai onko prosessissa jokin häiriötä aiheuttava tekijä,
- 3) kiinteiden jatkuvatoimisten mittalaitteiden lähtötiedot,

- 4) mitattavien kaasukomponenttien ja hiukkasten kohdalla tulee mainita, onko kukin komponentti myös jatkuvatoimisessa mittauksessa.

Taulukossa 11 on esimerkein kerrottu komponenttien mittaustapa ja niiden mittausväli.

Komponentti	M/V	Kattila
Hiukkaset	V	(mittauskerrat kpl)
NO _x	M	jatkuva
SO ₂	M	jatkuva
HCl	M	jatkuva/näytteet kpl
HF	M	jatkuva/näytteet kpl
O ₂	M	jatkuva
CO ₂	M	jatkuva
CO	M	jatkuva
TVOC	M	jatkuva
Raskasmetallit	M	näytteet kpl
PCDD/F	M	näytteet kpl
Kosteus	M	hiukkasmittausten yhteydessä
Paine	M	hiukkasmittausten yhteydessä
Tilavuusvirta	M	hiukkasmittausten yhteydessä
Lämpötila	M	jatkuva

Taulukossa 11 M tarkoittaa referenssimittausten suorittamista ja V referenssimittausten vertailua jatkuvatoimisiin mittauksiin.

Mittaussuunnitelman sisällössä tulee olla huomioitu turvallisuuteen liittyvät seikat. Koska mittauksia ei saa suorittaa esimerkiksi nojatikkailta, tarvittavista teline- ja sääsuojaratkaisuista on sovittava tilaajan kanssa. Mahdollisten nostimien ja nostokorien käytöstä sekä käyttöopastuksesta tulee sopia. Mittauspaikan (mittaus-taso) sijainti on katsottava etukäteen ennen mittauksia, jotta mahdolliset mittauspaikan aiheuttamat häiriöt voidaan ottaa huomioon lopullisessa raportissa.

Taulukossa 12 on kerrottu eri kaasukomponenttien mittauksessa käytettävät standardit ja mittausmenetelmät.

Mitattava suure	Standardi ja menetelmä
O ₂	SFS-EN 14789 Jatkuvatoiminen mittaus
CO ₂	SFS 5624 jatkuvatoiminen IR-absorptio
CO	SFS-EN 15058 jatkuvatoiminen IR-absorptio
SO ₂	Mittausyrityksen menetelmä, jatkuvatoiminen IR-absorptio
NO _x	SFS-EN 14792 jatkuvatoiminen mittaus
TVOC	SFS-EN 12619 jatkuvatoiminen mittaus
Hiukkaset	SFS-EN 13284-1 jaksottainen mittaus
HCl	EN 1911 jaksottainen menetelmä
HF	SFS 5789 jatkuvatoiminen FTIR
PCDD/F	EN 1948 jaksottainen menetelmä
Hg	SFS-EN 13211 jaksottainen menetelmä
Cd, Tl, Sb, AS, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni ja V	SFSA-EN 14385 jaksottainen menetelmä
AST- tarkastelu	SFS-EN 14181

Taulukko 12. Mitattava suure, standardi ja menetelmä

Mittaussuunnitelman sisällössä tule lisäksi sopia mittausaikatauluista ja mahdollisesta varapäivästä, työlusta, turvallisuusperheidyksistä. Tilaajalle kuuluvissa tehtävissä tulee ottaa huomioon mahdollisten paineilman ja sähkön saantiin liittyvät seikat.

Mittausraportoinnissa tulee kertoa mahdollisten viiveiden, esimerkiksi juhlapyhien, vaikutus tulosten valmistamiseen ja on sovittava raportoinnille mahdollinen viimeinen valmistuspäivä. Tyypillisesti mittausraportti valmistuu noin kaksi viikkoa laboratoriotulosten valmistumisen jälkeen. Mittausraportin sisällössä tulee ilmetä yhteenvetotarkastelu, sisäiset vertailut laitoksen lupiin ja niille asetettuihin päästörajoihin, kuvaukset mahdollisista häiriötilanteista ja tarkastelu mittauksen luotettavuudesta. Mittauksen tulokset esitetään keskiarvopitoisuuksina kuiviin savukaasuihin (mg/Nm³) ja haluttuun happi O₂-pitoisuuteen redusoituna pitoisuuksina (mg/Nm³). Päästöt ilmoitetaan mg/MJ sekä kg/h yksiköissä. Mittausraportti toimitetaan ensin sähköisenä. Kommenttien jälkeen toimitetaan paperiset allekirjoitetut versiot (kaksi kappaletta) sekä yksi sähköinen versio, jonka muoto voi olla esimerkiksi pdf. (Pakarinen 2018.)

Happi O₂- redusoinnilla tarkoitetaan happipitoisuuden sitomista ympäristöluvassa asetettuun jäännöshappipitoisuuteen. Määritettäessä happireduointia tulee olla käytössä savukaasujen kaasukomponenttien mittaus tulosten lisäksi polton jäännöshappimittaus tulos. Molempien mittaus tulosten tulee olla samassa tilassa.

Happireduointilaskenta suoritetaan standardin SFS 5624 mukaan yhtälöllä: (Päästömittausten käsikirja 2007)

$$C_{ref} = C_m \frac{(20,9 - X_{O_2,ref})}{(20,9 - X_{O_2,m})} \quad (6)$$

Missä:

C_{ref}	Happireduoitu mittaustulos
C_m	Mitattu pitoisuus
$X_{O_2,ref}$	Happipitoisuus, johon redusoidaan
$X_{O_2,m}$	Mitattu jäännöshappipitoisuus [%]

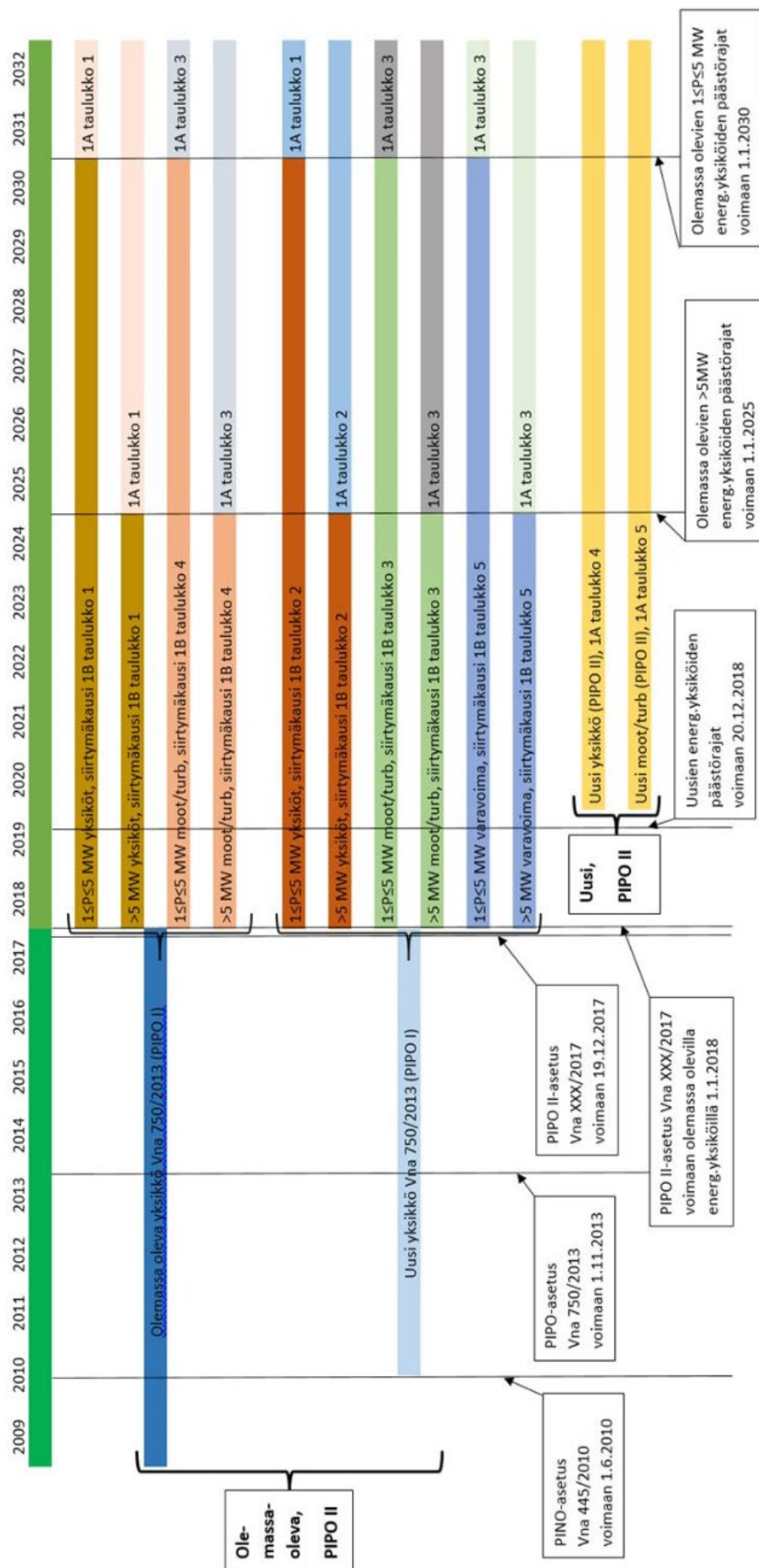
17.3 Mittausraportti

Savukaasumittausten toteutuksen jälkeen mittauksen suorittanut yritys laatii mittausraportin, jonka sisältö tulee olla selkokiehinen, jolloin mittaustulosten vertailu asetettuihin raja-arvoihin on helppoa. Kaikkien mitattujen kaasukomponenttien osalta tulee mittausraportissa olla mitattu pitoisuus, mittausepävarmuus sekä pitoisuus vähennettynä mittausepävarmuudella. Mittausraporttiin tulee lisätä laskennassa käytetty kerroin, määriteltäessä vuosipäästöjä. Käytetyn kertoim määritellään todellisen mittaustuloksen perusteella eikä siinä oteta huomioon mittausepävarmuutta. (EN 1065/2017.)

18 EN 1065/2017

Valtioneuvoston asetuksessa EN 1065/2017 määritellään savukaasupäästöjen määräaikaismittausten suorittaminen, ilmaanjohdettavien päästöjen raja-arvot sekä niille suoritettavat tarkkailut, kirjanpidon että tietojen toimittamisen viranomaisille. Asetus ottaa kantaa myös savupiipun korkeuteen, syntyviin jätteisiin sekä jätteiden käsittelyyn että varastointiin, jätevesien käsittelyyn, polttoaineiden käsittelyyn ja varastointiin, melun- torjuntaan sekä poikkeustilanteisiin. Kuvassa 53 on pienten polttolaitosten asetuksen aikajana.

PINO-, PIPO- ja "PIPO II"-asetusten aikajana



KUVA 53. Pienpolttolaitosten asetuksen aikajana (Kirjavainen 2017, 14).

19 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli koota yhteen polttoon ja päästöjenhallintaan liittyvät menetelmät ja päästöihin vaikuttavat seikat sekä keinot parhaan olemassa olevan tekniikan käyttöön ja valinnan tueksi uusille laitoksille.

Työssä aineiston laajuudesta huolimatta työlle asettamiini tavoitteisiin päästiin ja saatiin kasattua yhtenäinen kokonaisuus. Työn aihealueeseen liittyvien aineistojen hajanaisuus teki aineiston kokoamisesta varsin työlää, mutta oman oppimisen ja asiantuntijuuden lisääntymisen kannalta koen hyötyneni paljon. Tulevia savukaasumittauksia ja päästöjä vähentäviä investointeja suunnittelevat voivat hyötyä kootusta aineistosta ja hyvästä lähdeaineistosta, pohtiessaan omassa poltossa tapahtuneita muutoksia ja niiden selvittämistä. Tiukenevat päästöraja-arvot tuovat haasteita toiminnanharjoittajalle varsinkin, jos raja-arvoihin pääsy tuottaa vaikeutta. Onkin hyödyllistä tutustua päästöjen vähennyskeinoihin ja päästöjen aiheuttajiin. Tällöin säästytään parhaimmillaan hinnakkailta laiteinvestoineilta. Polton ja päästöjen vähennysmenetelmien kehittäminen ja laitosten oikeanlainen käyttö on edellytyksenä pyrkimyksille saavuttaa ilmastolle asetetut päästövähennystavoitteet polttolaitoksissa.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ALAKANGAS, Eija, HURSKAINEN, Markus, LAATIKAINEN-LUHTAMAA, Jaana ja KORHONEN, Jaana 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [viitattu 6-4-2018.] Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Docpayer.fi 2016. [verkkoaineisto]. [viitattu 2-7-2018.] Saatavissa: <https://docpayer.fi/65350069-Pienen-energiantuotantoyksikon-ja-laitoksen-tarkkailusuunnitelma-liite-lomakkeeseen-6035.html>

Ehox tuote Oy Savukaasujen puhdistus ja rikin poisto kaasuista. [viitattu 15-7-2018.] Saatavissa <http://www.ehox.fi/savukaasujen-puhdistus-rikin-poisto-kaasuista.htm>

Elearn.ncp.fi 2003. Energiaverkko päästöjen kulkeutuminen. [viitattu 24-8-2018.] Saatavissa: <http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/energiaverkko/ilmastonmuutos/kulkeutuminen.htm>

EN 1065/2017 Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista liite: 3 [viitattu 10-8-2018.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171065>

Energiauutiset.fi 2016. Hiilidioksidin talteenotto tulee taas. [viitattu 12-8-2018.] Saatavissa: <http://www.energiuutiset.fi/uutiset/hiilidioksidin-talteenotto-tulee-taas.html>

Energiauutiset.fi Glopaalit hiilipäästöt lähellä huippua? [viitattu 4-11-2018.] Saatavissa: <http://www.energiuutiset.fi/uutiset/glopaalit-hiilipaastot-lahella-huippuaan.html>

Fescon.fi Alkalin kestävä petihiekka GR-Granuli Fescon www sivut [viitattu 4-10-2018.] Saatavissa: <https://www.fescon.fi/tuotteet/hiekat/voimalaitosmateriaalit/956/alkalin-kestava-petihiekka-gr-granuliT>

FLYKTMAN, Martti, IMPOLA, Risto ja LINNA, Veli 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Energiateollisuus. [viitattu 4-3-2018.] Saatavissa: <https://www.google.com/search?q=kotimaistapolttoainetta+k%C3%A4ytt%C3%A4v%C3%A4v&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>

gasek.fi puunkaasutus tekniikat [viitattu 26-8-2018.] Saatavissa: <http://www.gasek.fi/technology/wood-gasification/>

HAKONEN, Tuomas ja LAURILA, Jussi 2011. Metsähakkeen kosteuden vaikutus polttoon ja kaukokuljetuksen kannattavuuteen. Opinäytetyö Seinäjoen ammatikorkeakoulu. [viitattu 12-6-2018.] Saatavissa:

<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34746/B55.pdf;jsessionid=1A0D63E36608DADB0B22541A2CB58EE7?sequence=1>

HANSKI, Tuomas 2018. Metsä Board Simpele, Kattila 6K ajettavuus ja päästöjenhallinta. Diplomityö Lappeenrannan teknillinen yliopisto Teknillinen tiedekunta Energiatekniikan koulutusohjelma. [viitattu 18-8-2018.] Saatavissa: http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153120/DI-ty%C3%B6_Hanski_Tuomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

HILDEN, Mikael*, KUPARINEN, Kaarle*, FORSIUS, Martin* ja SALONEN, Raimo** Suomen ympäristökeskus SYKE, **Terveyden ja hyvinvoinninlaitos THL. Mustan hiilen päästöjä vähentämällä jarrutetaan arktista lämpenemistä. [viitattu 30-8-2018.] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228323/PB_mustahiili_FI_20171219.pdf?sequence=5

HUHTINEN, Markku, KETTUNEN, Arto, NURMINEN, Pasi ja PAKKANEN, Heikki 1994. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab

HUHTINEN, Markku, KETTUNEN, Arto, NURMINEN, Pasi ja PAKKANEN, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka Viides uusittu painos Edita Oy. Helsinki. ISBN:951-37-3360-2

HUUTONIEMI, Katri, ESTLANDER, Alec, HAHKALA Matti, HÄMEENKOSKI, Kari, KULMALA, Antti, LAHDES, Risto ja LAUKKANEN, Timo 2006. Savuntarkastajista päästökauppiaisiin Gummerus kirjapaino Oy Jyväskylä ISBN 952-92-0025-0

Ilmasto opas.fi globaalit päästöt. [viitattu 2-11-2018.] Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/42433dde-827f-485e-9fa9-45b49fbfa317/globaalit-paastot.html>

Ilmasto-opas.fi Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. [viitattu 2-11-2018.] Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/fd626ba3-8099-40e4-af75-94124d1f5c7f/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi.html>

JALOVAARA, Jukka, AHO, Juha, HIETAMÄKI, Eljas ja HYYTIÄ, Hille 2003. Suomeen Ympäristö Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. [viitattu 2-3-2018.] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY_649.pdf?sequence=1

JÄRVENREUNA, Juha ja NUMMILA, Mika. Nykyaikainen savukaasupesuri [viitattu 25-4-2018.] Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

KIISKI, Harri 2004. Polttolaitosten päästöjen viranomaisraportoinnin uudistaminen Lappenrannan teknillinen yliopisto Energia- ja ympäristötekniikan osasto Diplomityö. [viitattu 7-11-2018.] Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/39916695.pdf>

KIRJAVAINEN, Kari 2017. ajankohtaista ympäristölainsäädännöstä Ympäristösuojelun ajankohtaispäivät. [viitattu 20-7-2018.] Saatavissa: https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/27653726/KIRJAVAINEN_Ajankohtaista+ymparistolainsaadannosta.pdf/64d44642-00cb-4b73-9c9a-639e3494c0f1

KJÄLDMAN, Lars, LEHTO, Jani, JUKOLA Perttu, LAPPALAINEN, Jari, PÄTTIKANGAS, Timo, NIEMISTÖ, Hannu ja KARHELA, Tommi 2014. VTT impulssi julkaisu tieteestä, teknologiasta ja liiketöinnistä. [viitattu 12-9-2018.] Saatavissa: <https://www.vtt.fi/Impulssi/Pages/Mallinnuksen-ja-simuloinnin-hyodyntaminen-uusissa-voimalaitoskonsepteissa.aspx>

KOKKONEN, Anssi ja LAPPALAINEN, Iris 2005. Hakelämmöstä yritystoimintaa. Kuopio: Offsetpaino

KOSKINIEMI, Esa 2014. Energiaseminaarin aineisto [viitattu 3-3-2018.] Saatavissa: <http://www.metla.fi/tapahtumat/2014/biorefine/pdf/koskiniemi.pdf>

KUITTINEN, Tuomo 2012. Biopolttoaineiden ominaisuudet [viitattu 15-2-2018.] Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/handle/10024/88854>

KUKKONEN, Ville 2016. Haastavien polttoaineiden palaminen pienen kokoluokan kattiloissa diplomityö Lappenrannan teknillinen yliopisto Energiatekniikan koulutusohjelma [viitattu 18-5-2018.] Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143259>

Laatukattila.fi Automaattinen kaasutuspolttokattilka kotimaisille polttoaineille. [viitattu 26-8-2018.] Saatavissa: <http://www.laatukattila.fi/extranet/ext/cms3/attachments/laka-y-esite-fin.pdf>

MANKONEN, Aleks 2014. Bioöljy ja pyrolyysi Lappeenrannan teknillinen yliopisto teknillinen tiedekunta energiatekniikan koulutusohjelma BH10A0201 Energiatekniikan kandidaattityö ja seminaari [viitattu 7-11-2018.] Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/96513>

N.d. NVI.se [verkkoaineisto]. [viitattu 15-6-2018.] Saatavissa: <http://nvi2000.se/index.html>

Oekosolve.ch [verkkoaineisto]. [viitattu 20-8-2018.] Saatavissa: http://www.oekosolve.ch/joomla/oekosolve/images/pdf/OT-S2_Infolyer_E_02-2012.pdf

NIEMI, Sami. 2016. Savukaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä. opinäytetyö Jyväskylän ammatikorkeakoulu energiatekniikka koulutusohjelma [viitattu 14-8-2018.] Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/112701/Savukaasujen_Jalkikasittelyjarjestelma_Sami_Niemi.pdf?sequence=1

PAKARINEN, Tenho 2018. Sähköpostin vaihto ja puhelin keskustelut

PALO, Petri 2009. Öljypolttimen modifiointi bioölykäyttöön opinäytetyö Lahden ammatikorkeakoulu kone- ja tuotantotekniikka suunnittelupainotteinen mekatroniikka. [viitattu 2-11-2018.] Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2771/Palo_Petri.pdf?sequence=1

PESSA, Matias 2016. Suurten polttolaitosten savukaasujen puhdistusmenetelmät. Lappeenrannan teknillinen yliopisto energiatekniikan koulutusohjelma BH10A0201 Energiatekniikan kandidaattityö ja seminaari [viitattu 6-6-2018.] Saatavissa:

<https://docplayer.fi/24556829-Suurten-polttolaitosten-savukaasujen-puhdistusmenetelmat.html>

PITKÄNEN, Tuomo 2018. Alkalikertymä leijupedissä käytettäessä luonnonhiekkaa ja granuloitua maasuunikuonaa petimateriaalina. Opinäytetyö Savonia Ammatikorkeakoulu Energiatekniikan koulutusohjelma. [viitattu 4-6-2018.] Saatavissa:

<https://www.theseus.fi/handle/10024/150323>

PUUSTINEN, Harri ja PELLIKKA, Tuula 2008. Ohjeistus päästömittauspaikalle ja mittayhteille asetettavista vaatimuksista. [viitattu 10-6-2018.] Saatavissa: [https://docplayer.fi/8618171-](https://docplayer.fi/8618171-Ohjeistus-paastomittauspaikalle-ja-mittausyhteille-asetettavista-vaatimuksista.html)

[Ohjeistus-paastomittauspaikalle-ja-mittausyhteille-asetettavista-vaatimuksista.html](https://docplayer.fi/8618171-Ohjeistus-paastomittauspaikalle-ja-mittausyhteille-asetettavista-vaatimuksista.html)

Päästömittausten käsikirja osa 1 Päästömittaustekniikan perusteet [viitattu 7-11-2018.] Saatavissa:

<https://ilmansuojeluyhdistys.files.wordpress.com/2015/05/osa1.pdf>

RAIKKO, Risto, SAASTAMOINEN, Jaakko, HUPA, Mikko ja KURKI-SUONIO, Ilmari 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä Gummerus Kirjapaino Oy.

SCHÖNACH, Paula 2008. Kaupungin savut ja käryt Helsingin ilmansuojelu 1945- 1982 [viitattu 18-7-2018.] Saatavissa:<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/23477/kaupungi.pdf>

SEPPÄ, Aki 2014. Sähkösuodattimen mekaanisten tarkastusten yhtenäistämishoje opinäytetyö Oulun ammattikorkeakoulu Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. [viitattu 6-5-2018.] Saatavissa:

<https://docplayer.fi/29333024-Aki-seppa-sahkosuodattimien-mekaanisten-tarkastusten-yhtenaistamishoje.html>

SIPPULA, Olli 2018. [verkkoaineisto]. [viitattu 6-7-2018.] Saatavissa: https://www.uef.fi/documents/592626/595218/1_Sippula+Olli.pdf/93b08fe4-fe59-46da-b4cd-35d60e14c3f0

SJÖHOLM, Petri 2015. promaintlehti.fi kunnossapidon erikoislehti Uudet vaatimukset savukaasujen puhdistuslaitteille [viitattu 20-6-2018.] Saatavissa:

<https://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Uudet-vaatimukset-savukaasujen-puhdistuslaitteille>

TEIR, Sebastian, PIKKARAINEN, Toni, KUJANPÄÄ, Lauri, TSUPARI, Eemeli, KÄRKI, Janne, ARASTO, Antti ja AATOS, Soile 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). [viitattu 16-6-2018.] Saatavissa: <https://docplayer.fi/11706773-Hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi-ccs.html>

Virtual.vtt.fi Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. [viitattu 12-8-2018.] Saatavissa:

http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/kpl_6_6.htm

VISAKOVA, Antti 2015. Päästöjen vähentämistekniikat ja niiden sopivuus pienpolttolaitoksiin. Opi-näytetyö. Oulun ammatikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. [viitattu 6-7-2018.] Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94099/Visakova_Antti.pdf?sequence=1

Ympäristö.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 4-2-2018.] Saatavissa:

[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ympariston_tilan_indikaattorit/Ilman_epapuhtau-det/Hiukkaspaastoissa_ei_nay_laskua\(28647\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ympariston_tilan_indikaattorit/Ilman_epapuhtau-det/Hiukkaspaastoissa_ei_nay_laskua(28647))

Ympäristö.fi Ilman epäpuhtauksien päästöt suomessa. [viitattu 3-11-2018.] Saatavissa:

http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ilman_epapuhtauksien_paas-tot#P%C3%A4%C3%A4st%C3%B6t%C3%A4hteet

Ympäristömittaukset. Liite 13 Jatkuva toiminen päästömittaus teollisuudessa [viitattu 15-4-2018.] Saatavissa:

<https://docplayer.fi/5559361-Jatkuva-toiminen-paastomittaus-teollisuudessa.html>