

Jussi Savolainen

**SAVUKAASUPÄÄSTÖJEN RAJOITTAMINEN KIINTEÄN
POLTTOAINEEN LAITOKSILLA**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2019**

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika huhtikuu 2019	Tekijä/tekijät Jussi Savolainen
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi Savukaasupäästöjen rajoittaminen kiinteän polttoaineen laitoksilla		
Työn ohjaaja Kari Pieniniemi & Aki Suokko		Sivumäärä 28
Työelämäohjaaja Jari Halme		
<p>Työssä tarkastellaan erilaisten kiinteän polttoaineen laitosten savukaasupäästöjä, joita syntyy polttoprosessissa. Tarkasteltavat päästöt ovat rikkidioksidi (SO_2), typenoksidit (NO_x) sekä pienhiukkaset. Tavoitteena oli käydä läpi yleisimmät savukaasupäästöjen puhdistusmenetelmät sekä niiden toimintaperiaatteet. Lisäksi perehdytään yleisimpiin polttoaineisiin, polttolaitteisiin sekä muuhun laitteistoon.</p> <p>Työssä käydään myös läpi päästöjä koskevia erilaisia rajoituksia ja säädöksiä ja niiden tuomia haasteita päästöjen vähentämisessä.</p>		
Asiasanat Kiinteät Polttoaineet, Polttolaitteet, Savukaasupäästöt		

Centria University of Applied Sciences	Date April 2019	Author Jussi Savolainen
Degree programme Industrial Management		
Name of thesis Limiting the fuel gas emissions in solid fuel plants		
Instructor Kari Pieniniemi & Aki Suokko		Pages 28
Supervisor Jari Halme		
<p>This thesis examines different kinds of fuel gas emissions in solid fuel plants that are produced during the combustion process. The examined emissions are sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x) and fine particles. The goal of the study was to go through the most common methods of cleaning fuel gas emissions and the operating principles. In addition the study explains the most common fuel types, combustion devices and other equipment.</p> <p>The thesis also presents the different restrictions and regulations about emissions and discusses the challenges of reducing emissions.</p>		
Key words Solid Fuels, Combustion devices, Fuel gases		

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 ILMANSUOJELULAINSÄÄDÄNTÖ.....	2
2.1 Lainsäädäntö EU:ssa.....	2
2.2 Lainsäädäntö Suomessa.....	3
2.2.1 Ilmansuojelulaki ja -asetus.....	3
2.2.2 PIPO-asetus.....	3
2.2.3 Rikkidioksidille asetetut rajoitukset.....	5
2.2.4 Hiukkaspäästöille asetetut rajoitukset.....	5
3 SAVUKAASUPÄÄSTÖT.....	6
3.1 Rikkidioksidipäästöt.....	6
3.2 Typpioksidipäästöt.....	6
3.3 Hiukkaspäästöt.....	7
4 POLTTOLAITTEET JA -AINEET.....	8
4.1 Arinapoltto.....	8
4.1.1 Kiinteä tasoarina.....	9
4.1.2 Kiinteä viisto- tai porrasarina.....	10
4.1.3 Alasyöttöarina.....	11
4.1.4 Mekaaninen ketjuarina.....	11
4.1.5 Mekaaninen viistoarina.....	12
4.1.6 Valssiarina.....	12
4.2 Leijukerrospoltto.....	12
4.2.1 Leijupetikattilat.....	13
4.3 Pölypoltto.....	14
4.3.1 Nurkkapoltin.....	14
4.3.2 Low-nox-poltin.....	15
5 SAVUKAASUJEN PUHDISTUSMENETELMÄT.....	16
5.1 Pölyerotusmenetelmät.....	16
5.1.1 Sähkösuodatin.....	16
5.1.2 Kangassuodatin eli letkusuodatin.....	17
5.1.3 Dynaaminen erotin.....	18
5.1.4 Savukaasupesuri.....	19
5.2 Rikinpoistomenetelmät.....	20
5.2.1 Märkä menetelmä.....	21
5.2.2 Puolikuiva menetelmä.....	22
5.2.3 Kuiva menetelmä.....	23
5.3 Typen oksidien poistomenetelmät.....	24
5.3.1 Katalyyttinen menetelmä.....	24
5.3.2 Katalyytiton menetelmä.....	25
6 POHDINTAA.....	26
LÄHTEET.....	27

KUVAT

KUVA 1. Arinapolton periaate (Huhtinen ym. 1994, 139).....	9
KUVA 2. Kiinteällä viistoarinalla varustettu kattila (Huhtinen ym. 1994, 134).....	10
KUVA 3. Alasyöttöarina (Kurki-Suonio ym. 1995, 399).....	11
KUVA 4. Leijupetikattilan periaate (Huhtinen ym. 1994, 144).....	13
KUVA 5. Nurkkapolttimen rakenne (Huhtinen ym. 1994, 128).....	14
KUVA 6. Low-nox-polttimen rakenne ja toimintaperiaate (Huhtinen ym. 1994, 129).....	15
KUVA 7. Sähkösuodattimen rakenne (Huhtinen ym. 1994, 233).....	17
KUVA 8. Letkusuodatin (Huhtinen ym. 1994, 235).....	18
KUVA 9. Syklonin rakenne (Wikipedia).....	19
KUVA 10. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Promaint, 2014).....	20
KUVA 11. Märkämenetelmä (Huhtinen ym. 1994, 237).....	21
KUVA 12. Puolikuivan menetelmän toimintakaavio (Huhtinen ym. 1994, 238).....	23
KUVA 13. Kuivan savukaasunpuhdistuksen periaate (JLY, 2006).....	25
KUVA 14. Katalyyttisen NOX:n poistomenetelmän kytkentävaihtoehtoja (Huhtinen ym. 1994, 241).....	
26	

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Uusien polttoaineteholtaan 1-50 MW:n kattiloiden päästöraja-arvot (mukaillen Finlex 2010).....	4
TAULUKKO 2. Olemassa olevien polttoaineteholtaan 1-50 MW:n kattiloiden päästöraja-arvot (mukaillen Finlex 2010).....	4
TAULUKKO 3. 1-50 MW:n kattilalaitoksia koskevat hiukkaspäästöohjearvot (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 233.).....	5

1 JOHDANTO

Tässä työssä esitellään polttolaitteet ja polttotekniikat, joita käytetään erikokoisissa kiinteän polttoaineen voimalaitoksissa. Voimalaitokset jaotellaan yleensä kolmeen eri ryhmään riippuen laitoksen koosta: pienet polttolaitokset (5-50 MW), keskisuuret polttolaitokset ((MCP eli medium combustion plant) 50-150 MW) sekä suuret polttolaitokset (yli 150 MW). Polttoprosessissa syntyy erilaisia päästöjä, joista tärkeimmät ovat rikkidioksidi (SO_2), typenoksidit (NO_x) sekä pienhiukkaset. Tässä työssä on esitelty erilaisia puhdistusmenetelmiä näiden aineiden puhdistamiseen ja vähentämiseen erilaisilla laitteilla ja tekniikoilla. Lainsäädäntö määrittelee raja-arvot kaikille päästöille ja voimalaitosten on noudatettava niitä tarkasti.

Työn ulkopuolelle rajataan ilmastonsuojelu. Voimalaitosten kannalta tärkein kasvihuonekaasupäästö on hiilidioksidi (CO_2). Hiilidioksidipäästöihin tässä työssä ei kuitenkaan keskitytä, vaan paino on niin sanotuissa paikallispäästöissä ja ilmansuojelussa.

2 ILMANSUOJELULAINSÄÄDÄNTÖ

2.1 Lainsäädäntö EU:ssa

Vuonna 2013 Euroopan komissio antoi Euroopan parlamentille ja neuvostolle ns. ilmanlaatupaketin, joka koostui neljästä osasta: ilmastonsuojelustrategiasta, päästökattodirektiivistä, keskisuurten polttolaitosten direktiivistä ja Göteborgin pöytäkirjan muutoksen hyväksymisestä. (Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2015)

EU:n alueella on arvioitu olevan yhteensä yli 140 000 pientä polttolaitosta, jotka tuottavat mm. sähköä (maa- ja metsätalousvaliokunnan lausunto 28/2014). Pieneksi polttolaitokseksi katsotaan voimalaitos, jonka polttoaineteho on 1 - 50 MW. Nämä laitokset vaikuttavat merkittävästi ilmanlaatuun Euroopassa ja siksi nähtiin tarpeelliseksi valmistella direktiivi, jonka avulla myös polttoaineteholtaan tämänkokoiset laitokset saadaan lainsäädännön alle EU:n alueella. Aikaisemmin vain polttoaineteholtaan vähintään 50 MW:n energiantuotantolaitoksia säädeltiin teollisuuden päästöjen direktiivillä 2010/75/EU ja pienempiä, kuten alle 1 MW:n kattiloita, direktiivillä 2009/125/EY. (EU-julkaisut, 2011.)

Vuonna 2013 laajemman ilmansuojelupaketin yhteydessä polttoaineteholtaan 1-50 MW laitosten ilmaan johdettavien päästöjen rajoittamisesta annetun direktiiviehdotuksen käsittely eteni nopeasti. Ehdotus hyväksyttiin lopullisesti joulukuussa 2015. Direktiivi koski kaikkia EU:n jäsenmaita ja se tuli ottaa käyttöön kahden vuoden kuluessa hyväksymisestä. Nyt myös suurien laitosten lisäksi pienempiä polttolaitoksia säädellään ilmaan johtuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisen direktiivillä 2015/2193/EU eli MCP- 11 direktiivillä. (Euroopan unionin virallinen lehti, 2015.)

2.2 Lainsäädäntö Suomessa

Suomessa viranomaiset asettavat erilaisia rajoituksia voimalaitosten etenkin pöly-, SO_2 -, sekä NO_x -päästöille. Muillekin päästöille voidaan asettaa rajoituksia, jos kyseisen laitoksen toiminta aiheuttaa haittaa terveydelle tai elollisen luonnon toiminnalle, taloudellista vahinkoa tai ympäristön vahingollista muuttumista. (Pietilä, S. 1990.)

2.2.1 Ilmansuojelulaki ja -asetus

Ilmaan johdettujen päästöjen ja niiden sääntelyn periaatteet määrää Suomessa ilmansuojelulaki ja -asetus, jotka astuivat voimaan vuonna 1982. Ilmansuojeluasetus 716/82 rajaa kunnan ympäristöviranomaisten tehtävät sekä niihin liittyvän valvonnan, joita ovat esimerkiksi ilmansuojelulain mukaisten ilmoitusten käsittely ja niiden perusteella tehtävät päätökset päästöjen rajoittamisesta. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 1994, 231.)

2.2.2 PIPO-asetus

Valtioneuvoston asetus 750/2013 eli PIPO-asetus koskee ympäristönsuojeluvaatimuksia sellaisten laitosten osalta, jotka ovat polttoaineteholtaan alle 50MW. PIPO-asetus julkaistiin 29.10.2013 ja se korvaa edellisen PINO-asetuksen 445/2010. Asetusta sovelletaan kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta käyttävissä laitoksissa joiden minimiteho on 5MW ja maksimiteho 50 MW. Asetusta alettiin soveltaa vanhoihin laitoksiin 1.1.2018 ja uusiin laitoksiin välittömästi asetuksen julkaisusta lähtien. (Rejlers 2016.) Käyttötarkkailussa mitataan happea, hiilimonoksidia sekä palamattomien kaasujen määrää. Savukaasupäästöjen tarkkailussa täytyy edelleen mitata hiukkaspäästöjä uusilla, kiinteää polttoainetta käyttävillä laitoksilla. (Kontram 2017.)

TAULUKKO 1. Uusien polttoaineteholtaan 1-50 MW:n kattiloiden päästöraja-arvot (mukaillen Finlex 2010)

Kattilan polttoaineteho	Hiukkaset mg/m ³ n	NO ₂ mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Puu ja muut kiinteät biopolttoaineet⁴	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	
1 P 5 MW	200	375	200
5<P 10 MW	50	375	200
10<P 50 MW	40	375	200
Turve	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 P 5 MW	200	500	500
5<P 10 MW	50	500	500
10<P 50 MW	40	500	500
Hiili	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 P 10 MW	50	270	850
10<P 50 MW	40	270	850

TAULUKKO 2. Käytössä olevien 1-50 MW:n kattiloiden päästörajat (mukaillen Finlex 2010)

Kattilan polttoaineteho	Hiukkaset mg/m ³ n	NO ₂ mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Puu ja muut kiinteät biopolttoaineet³	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 P 5 MW	300(375)	450 (500)	200
5<P 10 MW	150 (250)	450 (500)	200
10<P 50 MW	50 (125)	450 (500)	200
Turve	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 P 5 MW	300(375)	600 (625)	500
5<P 10 MW	150 (250)	600 (625)	500
10<P 50 MW	50 (125)	600 (625)	500
Hiili	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 P 50 MW	50 (140)	420 (550)	1100

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty uusien sekä jo käytössä olevien polttoaineteholtaan 1-50 MW kattiloiden päästöraja-arvoja

Tulevaisuudessa pieniä polttolaitoksia koskee myös Euroopan parlamentin MCP-direktiivi, joka koskee vähintään 1 MW:n, mutta alle 50 MW:n energiantuotantoyksiköitä ja jonka piiriin olemassa olevat pienet, alle 50 MW polttolaitokset siirtyvät vuoden 2025 tai 2030 alussa riippuen laitoksen polttoainetehosta. PIPO ja MCP-direktiivi asettavat polttolaitosten hiukkas-, typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöille aikaisempaa tiukempia päästöraja-arvoja. Lisäksi PIPO ja MCP-direktiivi sisältävät muita määräyksiä, jotka rajoittavat polttolaitosten aiheuttamaa

ympäristöhaittaa. Joissakin tapauksissa kiristyvät päästörajat vaativat polttolaitoksen polttoaineen vaihtamista tai savukaasujen puhdistamista. Muutos on tapauskohtainen ja vaatii laitoksilta vertailua eri puhdistuskeinojen ja polttotekniikoiden välillä. (Huttunen 2017.)

2.2.3 Rikkidioksidille asetetut rajoitukset

Uusia polttoaineteholta 50-150 MW kivihiiltä polttavia laitoksia koskeva päätös (256/90) astui voimaan 1990. Siinä määrättiin, että kyseisten laitosten rikkidioksidipäästöjen vuosikeskiarvo saa olla enintään 230 mg/MJ. Kun taas uusien yli 150 MW:n kattiloiden päästöt voivat olla enintään 140 mg/MJ. Vuonna 1994 voimaan astuneiden uusien määräyksien mukaan vanhojen yli 200 MW:n kattiloiden rikkidioksidipäästöjen vuosikeskiarvo ei saa ylittää 230 mg/MJ. Määräys ei kuitenkaan koske kattiloita, joiden huipputeholla ajettu aika on enintään 15000 tuntia. (Huhtinen ym. 1994, 231.)

2.2.4 Hiukkaspäästöille asetetut rajoitukset

Taulukossa 3 on esitetty valtioneuvoston tekemän hiukkaspäästöjä rajoittavan päätöksen ohjearvot jotka koskevat 1-50 MW:n laitoksia

TAULUKKO 3. 1-50 MW:n kattilalaitoksia koskevat hiukkaspäästöohjearvot (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 233.)

Polttoaine	Kattilan polttoaineteho MW	Hiukkaspäästöt enintään mg/MJ
Kotimaiset polttoaineet	$1 < P < 5$ $5 < P < 50$	200 lasketaan kaavasta $85 - 4 : 3 \times (P - 5)$
Kivihiili	$1 < P < 3$ $3 < P < 5$ $5 < P < 50$	150 lasketaan kaavasta $60 - 7 : 9 \times (P - 5)$

3 SAVUKAASUPÄÄSTÖT

3.1 Rikkidioksidipäästöt

Rikkidioksidi (SO_2) on syövyttävä, ärsyttävä ja hajuton kaasu, joka sisältää rikkiä ja happea. Hyvä esimerkki rikkipitoisesta polttoaineesta on kivihiili. Kivihiiltä poltettaessa sen sisältämä rikki hapettuu ja muuttuu rikkidioksidiksi. Rikkidioksidin haitallisuus perustuu siihen, että se reagoi helposti veden kanssa muodostaen rikkihapoketta ($\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$). Rikkihapoke muuntuu edelleen synnyttäen rikkihappoa (H_2SO_4). Rikkihappo luontoon päästyään liukenee sadepisaroihin ja kulkeutuu sitä kautta maan päälle aiheuttaen hapanta sadetta, joka syövyttää erilaisia materiaaleja sekä haittaa ihmisiä ja eliöitä.

Rikkidioksidipäästöjen suurin lähde ovat kivihiilikäyttöiset voimalaitokset. Jopa yli 90% näistä oksideista saadaan suodatettua savukaasuista erilaisilla tekniikoilla ja laitteilla. Kivihiilen lisäksi rikkidioksidipäästöjä syntyy paljon laitoksissa, joissa polttoaineena on turve. (Raiko, Kirvelä, Tolvanen, Pääkkönen 2017, 205-208).

3.2 Typpioksidipäästöt

Typen oksidit (NO_x) ovat yhdisteitä, jotka sisältävät typpeä sekä vaihtelevan määrän happiatomeita. Ilmaston yhteydessä puhuttaessa typen oksideista tarkoitetaan yleensä typpimonoksidia (NO) tai typpidioksidia (NO_2). Näitä kyseisiä kaasuja esiintyy ilmassa luonnostaankin, mutta suurin osa ilman typpioksideista on kuitenkin ihmisen aiheuttamaa ilmansaastetta. Rikkidioksidin tavoin typpioksidit reagoivat veden kanssa muodostaen erilaisia happoja, jotka jälleen sateen mukana tulevat maahan saastuttaen maaperää ja vesistöjä. (Kurki-Suonio, Raiko, Saastamoinen & Hupa 2002, 239.) Typpipäästöihin vaikuttaa eniten käytetty polttotekniikka, eikä niinkään käytetty polttoaine. Merkittäviä päästölähteitä

ovat mm. hiili- sekä turvekattilat. Palamisprosessissa syntyy typenoksideja (NO_x). (Raiko ym. 205-208.)

3.3 Hiukkaspäästöt

Voimalaitoksissa syntyviä alle 2,5 mikrometrin kokoisia terveydelle haitallisia hiukkasia kutsutaan pienhiukkasiksi. Hengitettynä näin pienet hiukkaset tunkeutuvat aina keuhkorakkuloihin asti aiheuttaen erilaisia hengityssairauksia. (Hiukkaset 2005.) Kemiallinen koostumus hiukkasissa saattaa olla täysin vaaratonta, mutta on myös mahdollista, että hiukkaseen on sitoutunut esimerkiksi raskasmetallia tai hiilivetyä. Silloin hiukkanen on terveydelle haitallinen hengitettynä. (Ilmatieteenlaitos, Hengitettävät hiukkaset)

Uusimmat kansainväliset tutkimukset osoittavat, että kaupunkien ilmansaasteet vaikuttavat ihmisen terveyteen luultua enemmän. Erityisesti pienhiukkaset ovat aiemmin luultua haitallisempia. Mitä pienempi hiukkanen on, sitä vaarallisempi se on. Osa hiukkasista on niin pieniä, ettei niitä pysty silmällä näkemään, ja ne jaotellaan neljään eri kategoriaan. Pienimmät on ultrahiukkasia, joiden halkaisija on alle 0,1 mikrometriä. Toiseksi pienimpiä hiukkasia ovat pienhiukkaset, joita voimalaitoksistakin tulee. Suurimmat hiukkaset ovat kooltaan yli 10 mikrometriä, ja ne poistuvat yskimällä ja aivastelemalla eivätkä ole niin haitallisia kuin pienet hiukkaset. (Tilastokeskus, 2008)

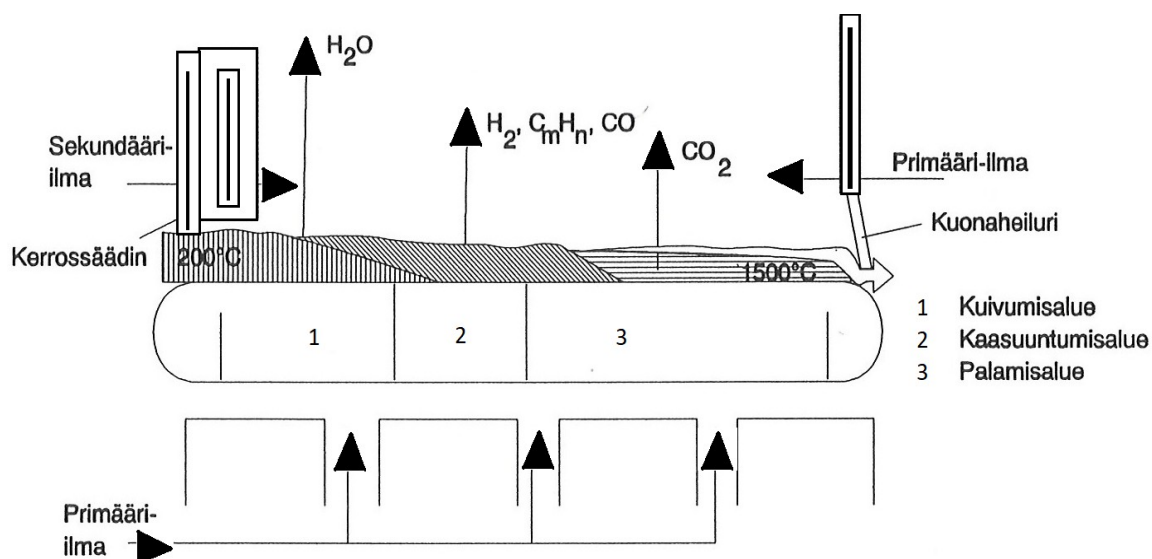
4 POLTTOLAITTEET JA -AINEET

Polttoaineisiin sitoutunutta kemiallista energiaa pyritään vapauttamaan lämmöksi polttamalla niitä erilaisilla polttolaitteilla. Jotta seos saadaan syttymään, tulee palamisilma sekä polttoaine saada tehokkaaseen kosketukseen keskenään. Halutun tehoisen sekä tasaisen palamisen toteutumiseksi tulee palamistehon olla säädettävissä tarpeen tullen. (Huhtinen ym. 1994, 119.)

4.1 Arinapoltto

Kattilan pohjalle sijoitettavaa polttolaitetta kutsutaan arinaksi, jonka päällä polttoaine poltetaan. Arinapoltto on vanhin polttotapa puhuttaessa kiinteistä polttoaineista. Erityyppisten polttoaineiden polttoon soveltuvia arinaratkaisuja on kehitetty aikojen kuluessa useita erilaisia sekä eri tehoisia. Hiilelle, turpeelle, puulle sekä puujätteelle on paljon hyvin toimivia arinaratkaisuja. Jätelietteen polttoon arina ei sovi sen suuren tuhkapitoisuuden vuoksi. Pehmennyt tuhka tukkii arinan ilmaraot eikä arina toimi oikein. (Huhtinen ym. 1994, 133)

Arinapolton etuna leiju- ja pölypolttoon verrattuna on mm. mahdollisuus polttoaineen polttamiseen suurina kappaleina, jolloin säästetään jauhuslaitteiden kustannuksissa. Lisäksi arinapoltossa on alhainen omakäyttötehon tarve sekä alhaiset NO_x -päästöt pölypolttoon verrattuna. (Voimalaitostekniikan yleiskurssi). Arinat voidaankin jakaa kiinteisiin sekä mekaanisiin arinoihin. Kiinteät arinat sopivat yleisesti pienempiin laitoksiin, kun taas mekaanisia arinoita käytetään enemmän isommissa laitoksissa. (Polttolaitteet ja kattilat, 2017).



KUVA 1. Arinapolton periaate (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 139)

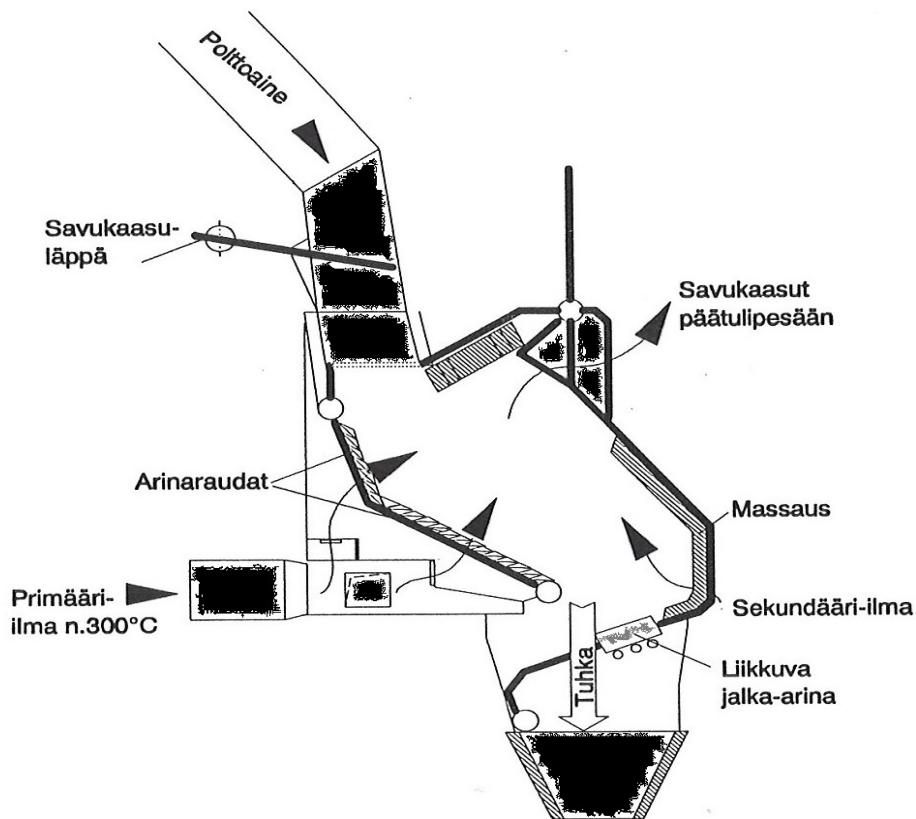
4.1.1 Kiinteä tasoarina

Kiinteä tasoarina on toteutukseltaan hyvin yksinkertainen. Tasoarina koostuu vierekkäisistä arinasauvoista, jotka ovat lähellä toisiaan, jolloin sauvojen väliin jäävistä raoista virtaa ilmaa polttoaineseokseen. Tasoarinoita voi myös olla tasomaisina levyinä, joihin on tehty reiät ilmaa varten. Tasoarinoita käytetään kattiloissa, joihin polttoaine syötetään yleensä käsin, mutta polttoaineen syöttö voidaan toteuttaa myös esimerkiksi syöttöruuvilla. (Energiatalous, 2013)

4.1.2 Kiinteä viisto- tai porrassarina

Turpeen sekä puupolttoaineiden polttoon käytetään usein viistoarinaa. Viistoarina voidaan sijoittaa suoraan tulipesän alle tai erilliseksi polttolaitteeksi. Arinan palkkeihin on upotettuna

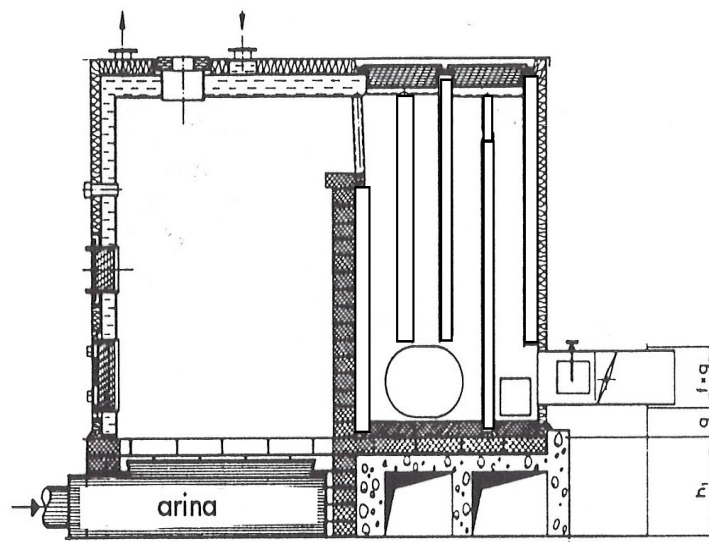
jäähdytysjärjestelmä, joka jäähdyttää tehokkaasti arinan. Vesijäähdytetyn arinan pinta on valmistettu hitsatuista putkista. Arina on asetettu loivaan kulmaan, jonka seurauksena polttoaine vyöryy sitä pitkin alas. Jotta pystyttäisiin polttamaan kosteampaakin polttoainetta, arinan seinät varustetaan muurauksin, jotka säteilyn vaikutuksesta nostavat palamislämpötilaa. Palamisilma jaetaan primääri- ja sekundääri-ilmaksi. Sekundääri-ilma johdetaan arinan etu- ja takaseinälle asennettujen suuttimien kautta, kun taas primääri-ilma puhalletaan suoraan arinaan siihen tehtyjen rakojen kautta polttoaineen läpi. (Pietilä, S. 1990.)



KUVA 2. Kiinteällä viistoarinalla varustettu kattila (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 134)

4.1.3 Alasyöttöarina

Ruuvikuljetin kuljettaa polttoaineen alasyöttöarinaan alakautta tulipesän keskelle. Polttoaine siirtyy vähitellen keon pohjalta kohti pintaa samalla kuivuen, kunnes lopulta kaasuuntuu ja syttyy palamaan. Esilämmitetty palamisilma (primääri-ilma), tuodaan ilmakehää pitkin arinaan. Palamisen tehostamiseksi sekundääri-ilma tuodaan tulipesään poikkisuunnassa tulipesän sivuilta, jolloin savukaasut saadaan kiertävään liikkeeseen. Pesän yläosaan johdetaan vielä tertiääri-ilmaa. (Huhtinen ym. 1994, 135.)



KUVA 3. Alasyöttöarina (mukaillen Kurki-Suonio ym. 1995, 399)

4.1.4 Mekaaninen ketjuarina

Mekaaninen ketjuarina on liikkuva tasoarina. Se muodostuu arinaraudoista, jotka on kiinnitetty kahden ketjun väliin. Jotta ilma pääsee virtaamaan polttoaineeseen on arinarautojen pinnassa oltava uria. Ketjupyörä liikuttaa ketjuja sekä koko arinaa. Polttoaine

syötetään arinaan sen toisessa päässä olevasta syöttökourusta. Mekaanista ketjuarinaa hyödynnetään paljon kivihiilen poltossa. (Huhtinen ym. 1994, 135.)

4.1.5 Mekaaninen viistoarina

Mekaanisessa viistoarinassa polttoaine syötetään arinan yläosaan, josta polttoaine jatkaa matkaa liikkuvien arinautojen tai tärinän avulla. Arina muodostuu molemmista päistään kannatetuista viistossa olevista arinaraudoista, joissa on pystysuuntaiset ilmakanaavat. Mekaanisia viistoarinoita käytetään lähinnä huonolaatuisten kosteiden polttoaineiden kuten turpeen ja puun poltossa. (Huhtinen ym. 1994, 137)

4.1.6 Valssiarina

Valssiarinan muodostaa sylinterinmuotoiset pyörivät valssit, joiden ulkokehänä on rengasmaiset arinaraudat. Valsseihin ajetaan ilmaa, josta se siirtyy arinautojen kautta polttoaineeseen. Valssien avulla polttoaine saadaan sekoittumaan tehokkaasti. (Huhtinen ym. 1994, 137)

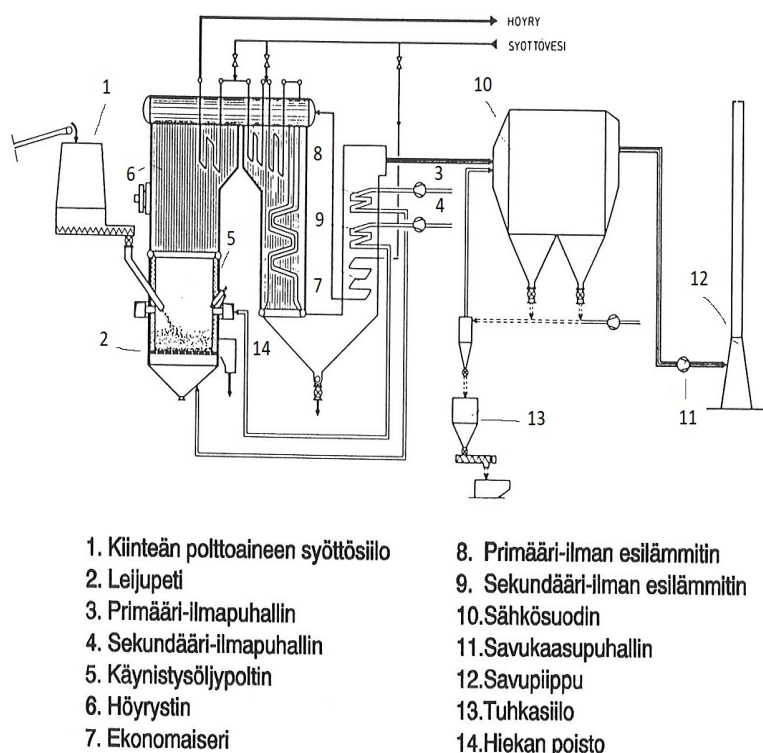
4.2 Leijukerros poltto

Leijukerros polttoa ryhdyttiin soveltamaan energiatuotannossa vasta 1970-luvulla. Kyseistä tekniikkaa on kuitenkin käytetty jo aikaisemmin eri teollisuusaloilla. Nykyään leijukerros poltto on yleistynyt laajasti, koska sillä pystytään polttamaan useita erilaisia myös huonolaatuisia polttoaineita hyvällä hyötysuhteella. Typenoksidipäästöt jäävät leijukerros poltossa pieniksi alhaisen palamislämpötilan vuoksi. Tekniikka mahdollistaa myös edullisen rikin puhdistuksen

savukaasuista, joka toteutetaan syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään. (Huhtinen ym. 1994, 140).

4.2.1 Leijupetikattilat

Leijupeti muodostuu kiinteästä petimateriaalista, johon syötetään polttoainetta sekä ilmaa. Leijukerroksen käyttäytyminen riippuu mm. kaasun virtausnopeudesta, petimateriaalista, pedin korkeudesta sekä pedin painehäviöstä. Pedin suuri lämpökapasiteetti mahdollistaa matalalämpöarvoisen ja kostean polttoaineen polton hyvällä hyötysuhteella. Tasaisen palamislämpötilan sekä palamisilman vaiheistuksen vuoksi NO_x -päästöt ovat alhaiset. Leijukattilassa voidaan polttaa kaikkia kiinteitä polttoaineita, ja usein ne onkin suunniteltu vähintään kahdelle eri polttoaineelle. (Pietilä, S. 1990.)

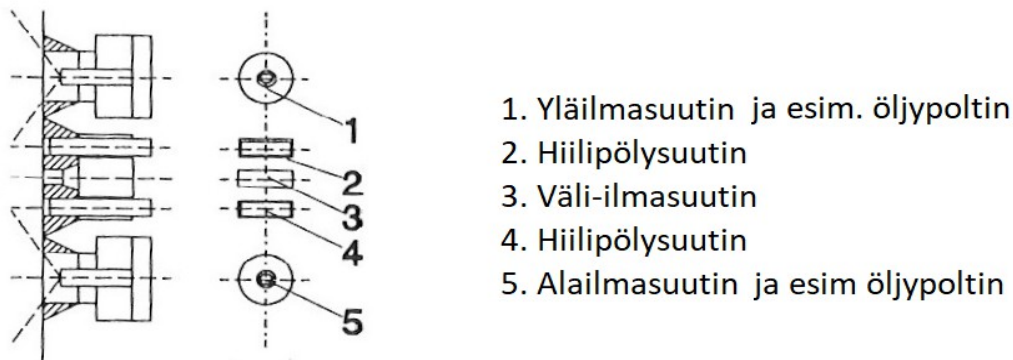


KUVA 4. Leijupetikattilan periaate (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 144)

4.3 Pölypoltto

Pölypoltossa kiinteä polttoaine jauhetaan ja syötetään tulipesään polttimien kautta, jossa se palaa nopeasti mahdollistaen suuret lämpötehot. Suomessa pölypolttoa käytetään lähinnä kivihiili- ja jysinturvepoltossa. Jotta polttoaine ehtii palaa kunnolla tulipesässä se tulee jauhaa erittäin hienoksi ja kostea polttoaine tulee kuivata syttymisen nopeuttamiseksi. Kyseinen polttotapa sopii periaatteessa kaikenkokoisille kattiloille, mutta yleensä se on kannattavaa isommilla laitoksilla tarvitsemiensa polttoaineen käsittelylaitteiden vuoksi. Kantokaasu kuljettaa polttoaineen jauhimesta polttimeen, jossa polttoaine sekä ilma sekoittuvat ja syttyy palamaan tulipesän lämmön vaikutuksesta. Stabiilin palamisen takaamiseksi polttimessa on usein myös tukipoltin. Päästöjen vähentämiseksi pyritään polttimessa saamaan aikaan mahdollisimman täydellinen sekä tasapainoinen palaminen (Huhtinen ym. 1994, 127.)

4.3.1 Nurkkapoltin



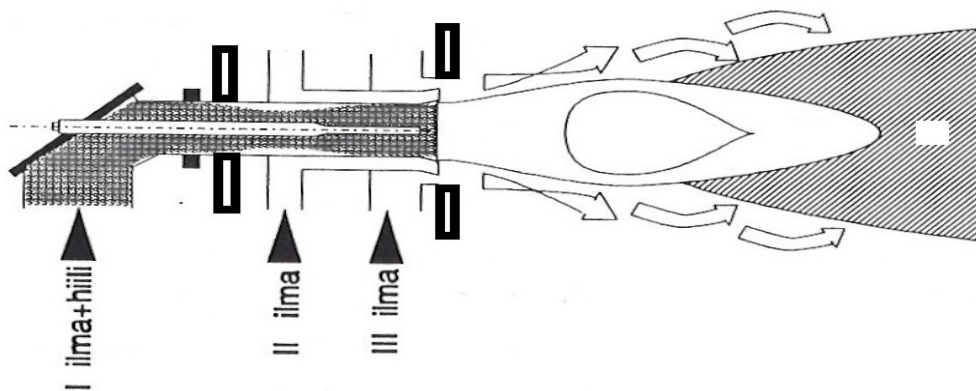
KUVA 5. Nurkkapolttimen rakenne (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 128)

Omia kanavia pitkin kantokaasun avulla ajettu pöly kohtaa palamisilman vasta tulipesässä kantokaasun nopeuden ollessa 20-30 m/s ja palamisilma tuodaan suurella nopeudella, jolloin

saadaan pitkälle tulipesään yltävä virtaus. Virtaus aiheuttaa ulkoisen, virtausta lämmittävän paluuvirtauksen. Tällaiset polttimet sijoitetaan tulipesän nurkkiin, mistä myös nimi nurkkapoltin tulee. Kuvassa 5 on esitetty nurkkapolttimen periaate. (Huhtinen ym. 1994, 128.)

4.3.2 Low-nox-poltin

Savukaasujen kierrätyksen sekä ilman vaiheistuksen periaatetta käytetään hyödyksi low-nox-polttimissa. Low-nox –polttimissa saadaan vähennettyä typpioksidia. Tämän lisäksi huippulämpötila jää alhaisemmaksi kuin muissa polttintyypeissä.



KUVA 6. Low-nox-polttimen rakenne ja toimintaperiaate (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 129)

Kattiloissa käytetään usein low-nox –polttimien lisäksi ilman tai polttoaineen erillistä vaiheistusta. Näin saadaan suurempi vähennystehokkuus. Low-nox –polttimien hyvä puoli on typen oksidien vähennys. Huonoja puolia taas ovat korkea hinta sekä kallis ylläpito (Raiko ym. 2002, 309.)

5 SAVUKAASUJEN PUHDISTUSMENETELMÄT

Rikin oksidit, typen oksidit sekä pölypäästöt ovat yleisimmät haitalliset aineet joita palamisprosessissa syntyy. Päästöjä voidaan vähentää kolmella eri tavalla: valitaan vähemmän saastuttava polttoaine, vähennetään polttovaiheessa syntyviä päästöjä tai puhdistetaan savukaasuja.

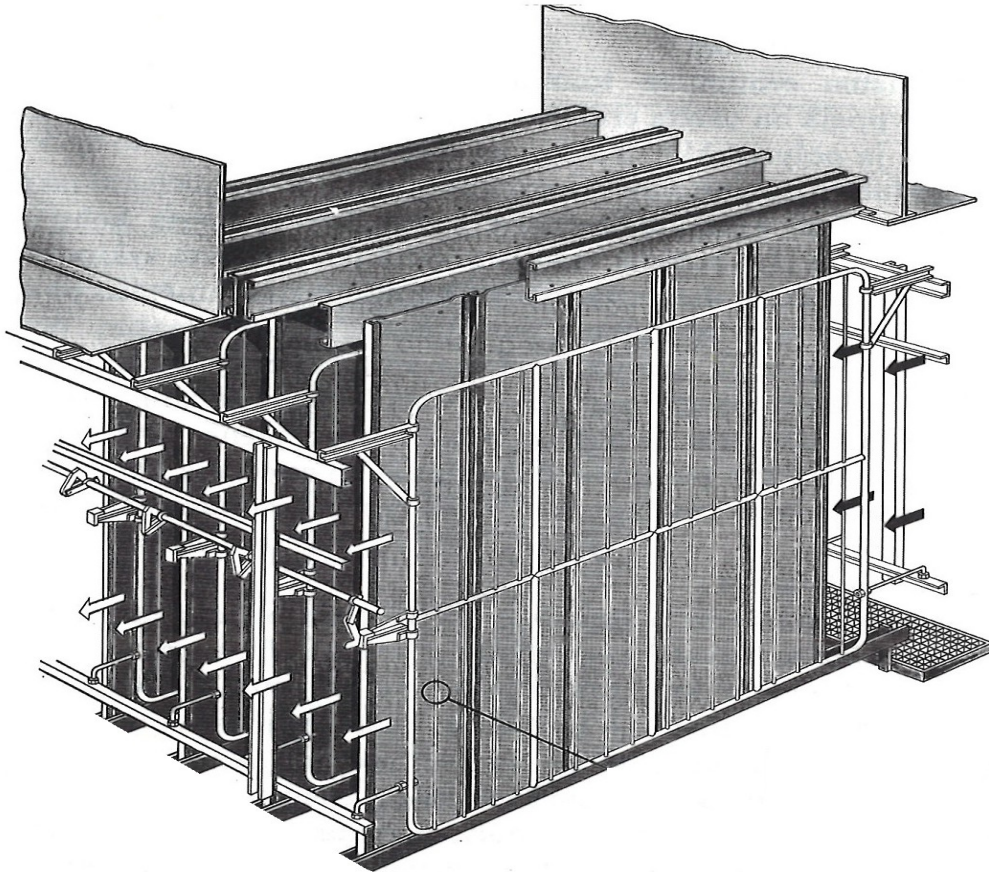
5.1 Pölyerotusmenetelmät

Useilla erilaisilla erottimilla on mahdollista puhdistaa sekä erottaa erilaisia kiinteitä epäpuhtauksia savukaasuista. Sähkösuodattimet, kangassuodattimet, erilaiset dynaamiset erottimet sekä savukaasupesurit ovat tavallisimmat käytettävät erottimet. (Huhtinen ym. 1994, 232.)

5.1.1 Sähkösuodatin

Sähkösuodattimessa ionisoituneen vyöhykkeen läpi ajetaan kaasuvirrasta erotetut hiukkaset ja varataan ne negatiivisesti, jonka jälkeen voimakas sähkökenttä erottelee varautuneet hiukkaset. Sähkösuodatin koostuu emissio- sekä erotuselektrodista, joiden välillä on erittäin suuri jännite, joka aiheuttaa voimakkaan sähkökentän elektrodien välille. Voimakkaan sähkökentän vaikutuksesta syntyy ns. koronapurkaus, jossa syntyy paljon positiivisesti sekä negatiivisesti varautuneita kaasuhiukkasia. Negatiivisesti varautunut emissioelektodi neutralisoi positiiviset hiukkaset. Kulkiessaan kohti erotuselektrodia negatiiviset ionit törmäävät neutraaleihin pölyhiukkasiin varaten ne negatiivisesti. Elektrodien välinen sähkökenttä pakottaa negatiivisesti varautuneet hiukkaset kohti erotuselektrodia.

Erotuselektrodiin kiinnittynyt pöly poistetaan erilaisilla ravistimilla tai vedellä. (Huhtinen ym. 1994, 233.)



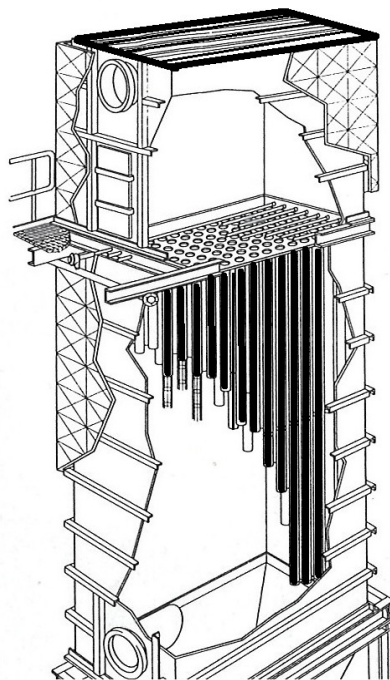
KUVA 7. Sähkösuodattimen rakenne (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 233)

Sähkösuodattimen käyttöikä on pitkä ja sillä voidaan puhdistaa suuriakin kaasumääriä ja se sopii lähes kaikkiin prosesseihin pölyn ominaisuuksien mukaan aina 420°C lämpötilaan asti. (Huhtinen ym. 1994, 233.)

5.1.2 Kangassuodatin eli letkusuodatin

Kangassuodattimessa pölypitoiset savukaasut puhdistetaan johtamalla ne suodatinkankaan läpi, jotka ovat valmistettu usein luonnonkuidusta, mineraalikuidusta tai synteettisestä

kuidusta. Savukaasujen jäähdytystarve vähenee, koska kankaan läpi pystytään ajamaan erittäin lämpimiä savukaasuja. Toisesta päästä avonainen kangaspussi eli letkusuodatin, on yleisin käytettävä kangassuodatinmalli. Pöly erottuu savukaasuista letkun pinnalle, kun se johdetaan kankaan läpi. Ilmansuojelunormien kiristyessä letkusuodattimia on alettu käyttää myös rikinpuhdistuslaitteistoista lähteviin savukaasuihin. (Huhtinen ym. 1994, 234)

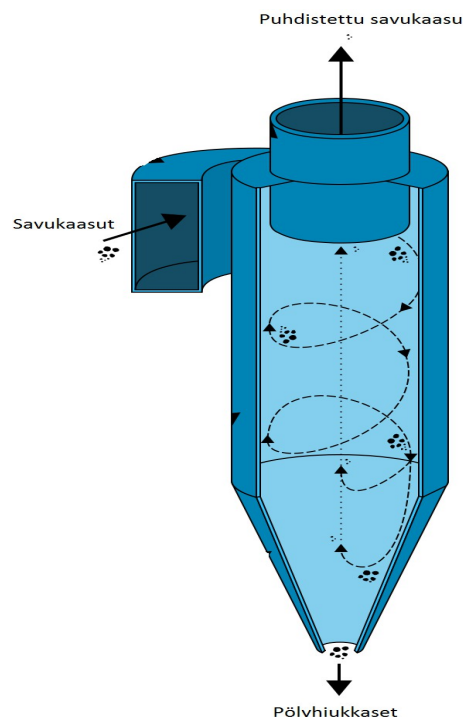


KUVA 8. Letkusuodatin (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 235)

5.1.3 Dynaaminen erotin

Dynaamisen erottimen toiminta perustuu massavaikutukseen. Yleisin dynaaminen erotinmalli on sykloni, mutta myös muita malleja on olemassa. Pölypitoinen savukaasu ohjataan sykloniin, jossa saadaan spiraalin muotoinen liikerata kohti syklonin pohjaa käyttäen

johtosiipiä. Tällöin pölyhiukkaset sinkoutuvat syklonin reunoille valuen pohjalla olevaan poistoaukkoon. Puhdistettu ilma imetään syklonin keskeltä ulos. Kaasun nopeus, viskositeetti sekä syklonin muoto vaikuttavat syklonin erotusasteeseen. Sisääntuloaukon koko määrittää savukaasujen virtausnopeuden ja suuri savukaasuvirta kannattaa jakaa useaan pieneen yksikköön syklonin halkaisijan pienentyessä ja erotusasteen parantuessa. (Huhtinen ym. 1994, 234)

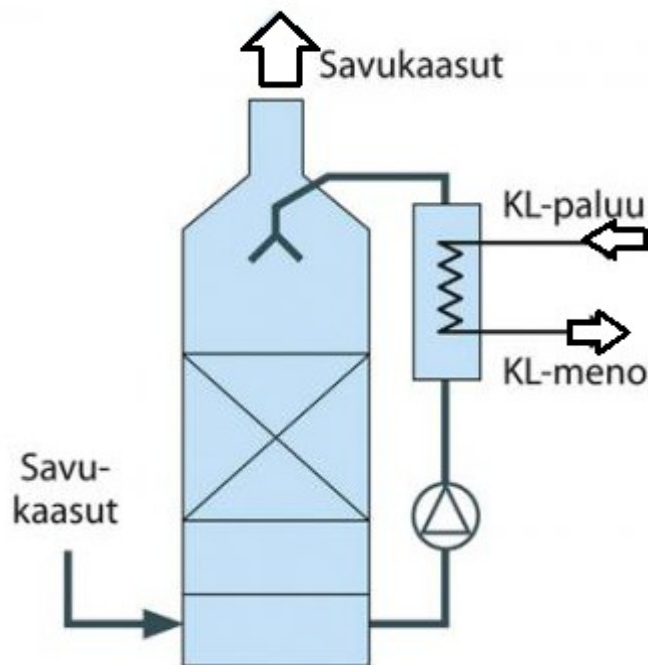


KUVA 9. Syklonin rakenne (mukaillen Wikipedia)

5.1.4 Savukaasupesuri

Savukaasupesurin tavoite oli aluksi hiukkaspäästöjen vähentäminen, mutta nykyään yhä enemmän panostetaan savukaasupesurissa syntyvän hukkalämmön talteenottoon. Savukaasupesurin päästöjen puhdistaminen sekä lämmön talteenotto perustuvat kahteen eri prosessointivaiheeseen. Aluksi kaasut ajetaan pesuvaiheeseen, jossa poistetaan pääosa

pienhiukkasista pois. Samalla savukaasut jäähtyvät niin sanottuun märkälämpötilaansa, joka on noin 65 astetta. Pesuvaiheen jälkeen savukaasut ajetaan lauhduttimeen, jossa savukaasu luovuttaa lämpöenergiansa pääasiassa lauhtumalla vastavirtaan valuvaan kiertoveteen. Lauhtuminen tapahtuu täytkekappalekerroksissa (yksi tai kaksi kerrosta), jotka toimivat prosessin lämmönsiirtopintoina. Kiertovesi, joka on muodostunut lauhdetta, johdetaan lämmönvaihtimelle. Lämmönvaihtimella lauhteeseen siirtynyt lämpöenergia otetaan talteen. (Promaint, 2014)



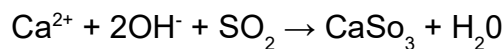
KUVA 10. Savukaasupesurin toimintaperiaate (mukaillen Promaint, 2014)

5.2 Rikipoistomenetelmät

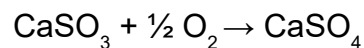
Jatkuvasti tiukentuvat rikkipäästönormit pakottavat kehittämään uusia rikipoistomenetelmiä. Savukaasujen rikipoistomenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri päämenetelmään: märkämenetelmä, puolikuiva menetelmä sekä kuiva menetelmä.

5.2.1 Märkämenetelmä

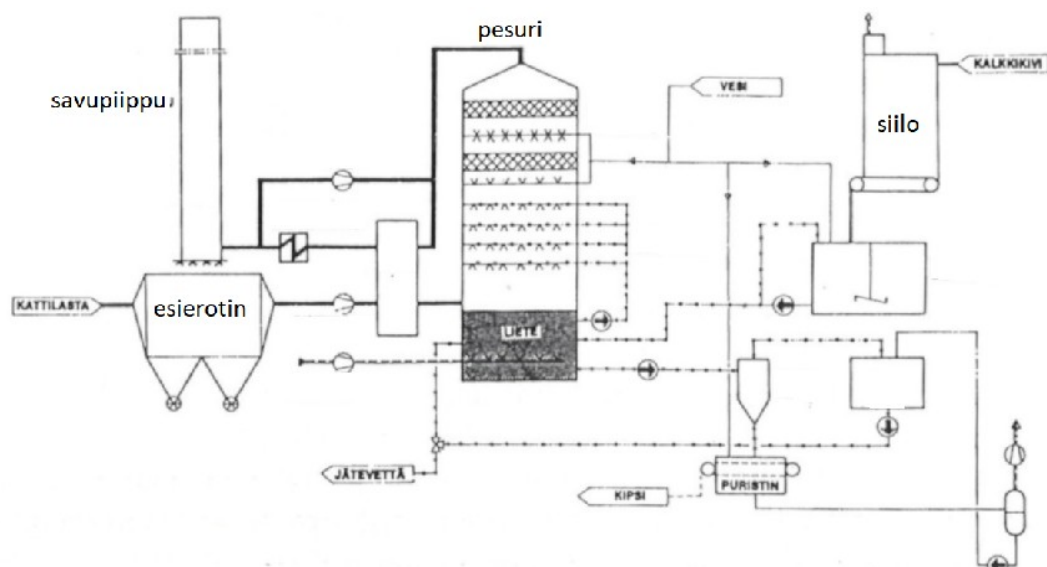
Märässä rikinpoistomenetelmässä alkalista pesunestettä ruiskutetaan pesuriin johdettujen savukaasujen sekaan. Kalsiumpohjaiset aineet kuten kalkkikivi (CaCO_3) sekä kalsiumoksidi (CaO) ovat yleisimmin käytetyt alkalit. Savukaasun sekaan ruiskutettu alkali aiheuttaa reaktion, jossa savukaasujen rikkidioksidi (SO_2) reagoi kalsiumin (Ca) sekä hapen (O_2) kanssa tuottaen kalsiumsulfiittia (CaSO_3) sekä vettä (H_2O). (Huhtinen ym. 1994, 237.)



Märkämenetelmään sisältyy kolme erilaista vaihetta. Ensin rikkidioksidi erotetaan absorptiotornissa, sen jälkeen pesuliuos käsitellään ja lopuksi käsitellään lopputuote (Huhtinen ym. 1994, 237). Kalsiumsulfiitti hapetetaan hyötykäyttöön kalsiumsulfaatiksi (CaSO_4) puhaltamalla ilmaa reaktoriin.



Syntynyt kipsiliete väkevöidään hydrosyklonissa, minkä jälkeen se kuivataan ja saadaan kiinteää kipsiä esim. rakennusaineeksi rakennusteollisuuteen. Menetelmän puhdistusaste on korkea, yli 90% (Huhtinen ym. 1994, 238.)

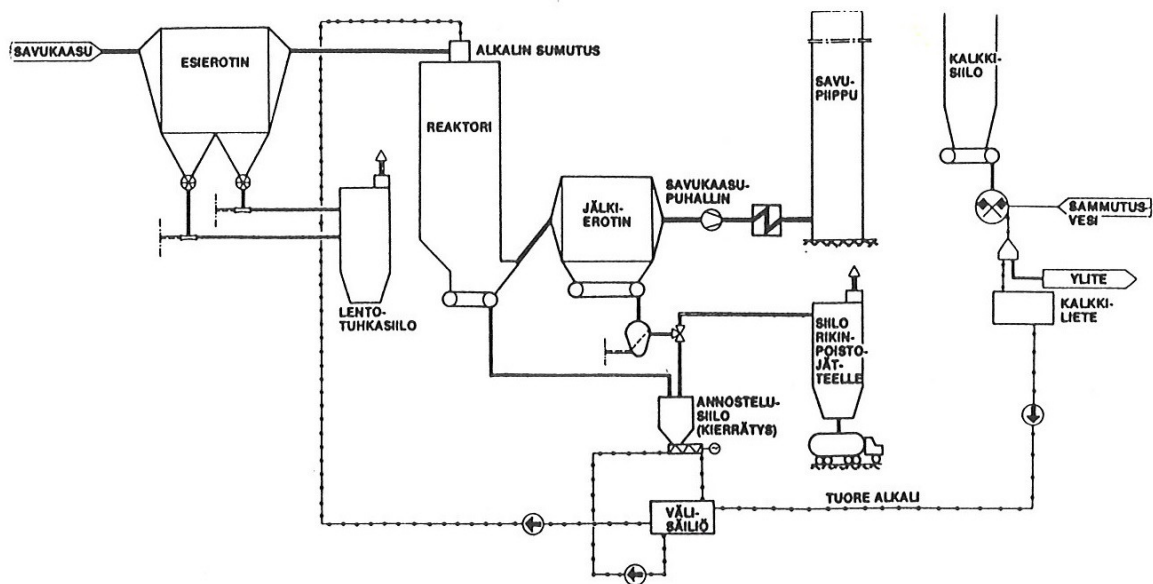


KUVA 11. Märkämenetelmä (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 237)

5.2.2 Puolikuiva menetelmä

Esierotin, SO_2 -reaktori sekä jälkierotin muodostaa puolikuivan menetelmän laitteiston. Sillä pystytään poistamaan happamat aineet (SO_2 , SO_3 , HCl (suolahappo) sekä HF (vetyfluoridi) sekä lentotuhka. Kyseisellä menetelmällä päästään jopa yli 85% erotusasteeseen. Esierottimeen johdetuista savukaasuista erotettu lentotuhka otetaan käyttöön. Esierottimeessa pystytään vähentämään kipsijätettä. Seuraavaksi rikkioksidit reagoivat SO_2 -reaktorissa savukaasujen sekaan lisätyn kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa. Reaktiossa syntyneestä kalkista suurin osa kulkeutuu savukaasuvirran mukana jälkierottimeen. Jälkierottimeessa osa rikkidioksidista reagoi kalsiumhydroksidin kanssa. Lopuksi syntyneet reaktiotuotteet erotetaan savukaasuista. (Huhtinen ym. 1994, 238.)

Suurin etu puolikuivaprosessissa on se, että savukaasuja ei tarvitse jälkilämmittää ja että lopputuote saadaan talteen kuivana sekä helposti käsiteltävässä muodossa. Lisäksi järjestelmä on yksinkertainen, sekä investoinniltaan halpa. (Pietilä, S. 1990.)

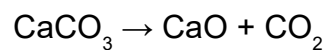


KUVA 12. Puolikuivan menetelmän toimintakaavio (mukaillen Huhtinen ym. 1994, 238)

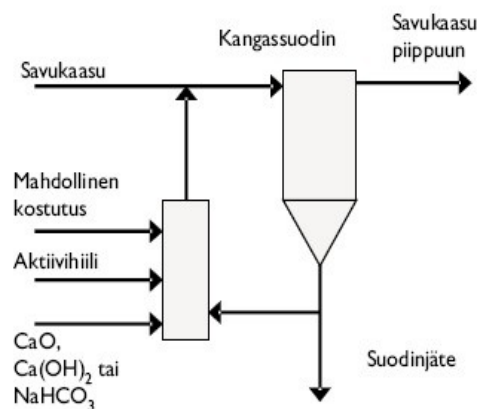
5.2.3 Kuiva menetelmä

Investoinniltaan halvat sekä prosessiltaan yksinkertaiset kuivat menetelmät voidaan jakaa muutamaan erilaiseen menetelmään, jotka ovat injektio menetelmät, leijukerros poltto, kuivareaktio menetelmät, NaHCO_3 -prosessi sekä alkaliprosessi. Leijukerros poltto ei vaadi erillistä savukaasupuhdistuslaitteistoa, koska sen erotusaste on korkea jopa 90%. (Huhtinen ym. 1994, 239.)

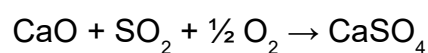
Leijukerros poltossa kalkkikiveä (CaCO_3) syötetään tulipesään, jolloin kalkkikivi muuttuu kalsiumoksidiksi (CaO) sekä hiilidioksidiksi (CO_2).



Tämän jälkeen syntynyt kalsiumoksidi reagoi edelleen rikkioksidin (SO_2) kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia (CaSO_4)



KUVA 13. Kuivan savukaasunpuhdistuksen periaate (mukaillen JLY, 2006)



Savukaasuista poistetaan kalsiumsulfaatin, reagoimattoman kalkkikiven, tuhkan sekä palamattoman polttoaineen seos. Reaktion onnistumiseksi oleellista on, että kalkin

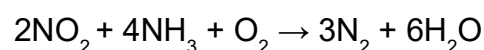
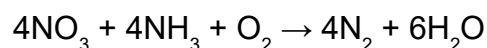
hiukkasten koko on oikea. Leijukerros poltossa uuret hiukkaset poistuvat kattilasta reagoimatta, kun taas liian pienet hiukkaset poistuvat savukaasujen mukana. (Huhtinen ym. 1994, 240.)

5.3 Typen oksidien poistomenetelmät

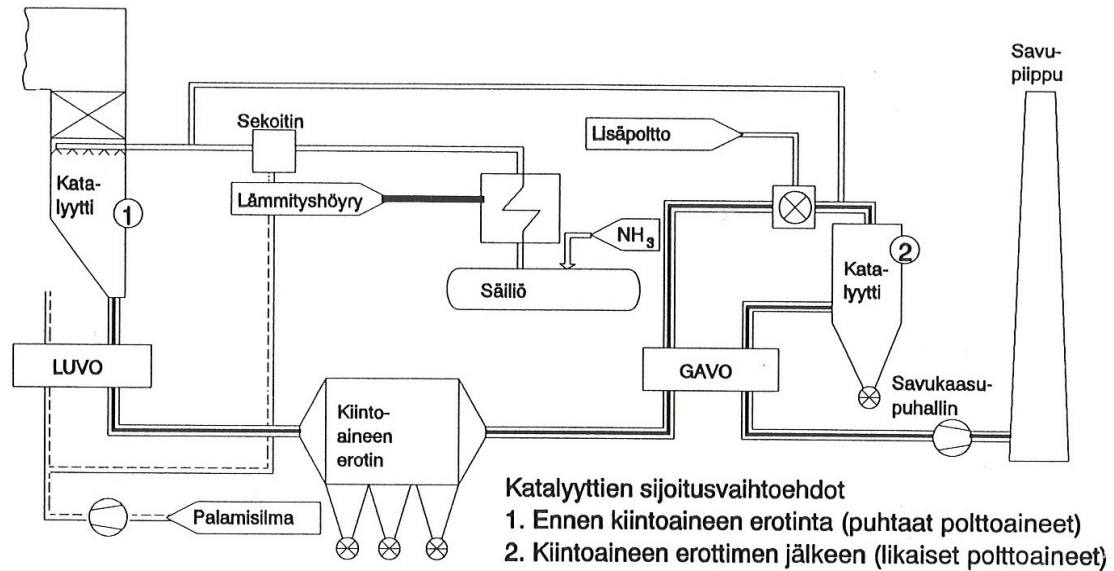
Polttolaitosten Nox-päästöillä tarkoitetaan typpimonoksidia (NO) sekä typpidioksidia (NO₂). Fossiilisia polttoaineita käytettäessä typen oksideja syntyy palamisilman tyydestä korkeissa lämpötiloissa sekä polttoaineen mahdollisesti sisältämästä tyydestä ylimääräisen hapen vaikutuksesta. Typen oksidien syntyminen on tapahtuma, johon vaikuttavat olosuhteiden lisäksi käytetty polttoaine, käytetty polttotekniikka, kattilan koko, sekä kattilan kuorma. Luonnollinen ja helpoin tapa vaikuttaa typen oksidien syntyyn on muuttaa palamisolosuhteita suuntaan, joka tuottaa niitä vähemmän. Hyvänä esimerkkinä tällaisesta ovat leijukattilat. Leijupoltossa voidaan luoda hyvät olosuhteet typen oksidien vähentämiseksi. Johtuen leijukattilan alhaisesta lämpötilasta termisiä typen oksideja syntyy erittäin vähän. (Pietilä, S. 1990.)

5.3.1 Katalyyttinen menetelmä

Katalyyttistä menetelmää käytettäessä Savukaasut pelkistyvät katalyyttireaktorissa, kun savukaasujen sekaan sekoitetaan typpi yhdistettä (ammoniakkia tai ureaa). Pelkistymisreaktiossa typen oksidit pelkistyvät typpimolekyyleiksi sekä vedeksi.



Yleensä katalyyttireaktori kannattaa sijoittaa prosessissa rikkidioksidinpoistolaitteen jälkeen, jolloin kaasut ovat jo melko puhtaita. Savukaasujen lämpötilaa pystytään nostamaan esimerkiksi polttamalla niiden joukossa kaasua, jolloin katalyyttireaktori toimii tehokkaammin.



KUVA 14. Katalyyttisen NO_x :n poistomenetelmän kytkentävaihtoehdot (Huhtinen ym. 1994, 241)

Katalyyttinen menetelmä onkin paras ja tehokkain vaihtoehto typenoksidien poistoon, ja sillä on saavutettu jopa 90% pitoisuuden vähentyminen. (Huhtinen ym. 1994, 241.)

5.3.2 Katalyytiton menetelmä

Katalyytittomassa menetelmässä kattilan pesään syötetty ammoniakki (NH_3) pelkistää typen oksidit vedeksi sekä typpimolekyyleiksi, kuten katalyyttisessäkin menetelmässä. Katalyytittomassa menetelmässä vaarana on ammoniakin liiallinen syöttö ja kulkeutuminen reagoimattomana ilmaan aiheuttaen haitallisia päästöjä. (Huhtinen ym. 1994, 242)

6 POHDINTA

Päästöjä pyritään rajoittamaan erilaisilla menetelmillä joita ohjaa lainsäädäntö. Polttotekniikka sekä eri polttoaineet vaikuttavat päästöjen määrään ja näitä asioita joudutaan miettimään jo laitoksen suunnitteluvaiheessa esim. miettimällä polttoaine sekä käytettävä polttotekniikka jolloin mahdollisesti voidaan vaikuttaa puhdistuslaitteiden määrään ja näin ollen myös kustannuksiin.

Olemassa olevien laitosten kustannukset ovat suuret ja aiheuttaa aina uusien päästörajojen myötä lisäkustannuksia jotka saattavat rajoittaa laitosten toimintaa ja jopa lakkauttaa koko laitoksen kannattamattomuuden takia. Suomessa on viime vuosina lopettanut toimintansa useat hiilivoimalaitokset mm. Inkoossa ja Kristiinankaupungissa osa syynä voi olla kiristyvien päästörajojen aiheuttamat lisäkustannukset.

Suuria kiinteänpolttoaineen laitoksia rakennetaan yhä vähemmän ja vähemmän johon yhtenä syynä voi olla tiukentuvat päästörajat sekä kalliit investoinnit puhdistuslaitteisiin. energiayhtiöt investoivat mielummin uusiutuviin vähäpäästöisiin tai täysin päästöttömiin vaihtoehtoihin. Esimerkiksi nykyään aurinkoenergiaa voidaan käyttää hyödyksi myös lämmöntuotannossa suuremmassa mittakaavassa.

Nykyään myös pieniä alle 50 MW polttolaitoksia säädellään ja tarkkaillaan aiempaa tiukemmin ja näin ollen myös niiden täytyy kiinnittää entistä enemmän huomiota päästöjen vähentämiseen ja päästörajojen noudattamiseen.

LÄHTEET

Energiatalous. 2013. Saatavissa: <http://energiatalous.blogspot.fi/2013/03/arinapoltto.html>. Viitattu 2.12.2018.

Euroopan unionin virallinen lehti. 2015. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>. Viitattu 10.10.2018.

EU-julkaisut. 2011. Saatavissa: <https://publications.europa.eu/fi/publication-detail/-/publication/ed51596d-0659-4f28-8b13-92061786abac/language-fi>. Viitattu 17.11.2018.

Hiukkaset. 2005. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/8_2006_ilmanlaatu_pkseudulla_2005.pdf. Viitattu 14.11.2018.

Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. Pakkanen, H. 1994. Höyrykattilatekniikka. Painatuskeskus. Opetushallitus.

Huttunen, A. 2017. Ympäristönsuojeluvaatimukset energiapalveluliiketoiminnassa. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/25105>. Viitattu 12.1.2019.

Ilmatieteenlaitos. Hengitettävät hiukkaset. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/hengitettavat-hiukkaset>. Viitattu 19.11.2018.

Kontram. 2017. PIPO-asetus. Saatavissa: <https://www.kontram.fi/ajankohtaista/pipo-asetus.html>. Viitattu 2.12.2018.

Kurki-Suonio, I. Raiko, R. Saastamoinen, J. Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen.

Maa- ja metsätalousvaliokunnan lausunto 28/2014. 2014. Valtioneuvoston kirjelmä ehdotuksesta Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi (1—50 megawatin polttolaitosten direktiiviehdotus). Saatavissa: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Lausunto/Documents/mmv1_28+2014.pdf. Viitattu 22.11.2018.

Pietilä, S. 1990. Voimalaitostekniikan peruskurssi. Energiataloudellinen yhdistys.

Polttolaitteet ja kattilat 2017. Saatavissa: <http://docplayer.fi/21551631-Polttolaitteet-ja-kattilat.html>. Viitattu 1.12.2018.

Promaint. 2014. Tuotantotehokkuuden parantaminen. Saatavissa: <https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>. Viitattu 24.10.2018.

Raiko, R. Kirvelä, K. Tolvanen, H. Pääkkönen, A. 2018. Voimalaitos- ja polttotekniikka luentomoniste. Saatavissa: <http://docplayer.fi/48163665-Keb-energiatekniikan-perusteet.html>. Viitattu 2.12.2018.

Rejlers. 2016. PIPO-asetus kiristyy. Saatavissa: <https://www.rejlers.fi/Ajankohtaista/PIPO-asetus-kiristyy>. Viitattu 13.1.2019.

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2015. Suoheimo, P. Grönroos, J. Karvosenoja, N, Petäjä, J. Saarinen, K. Savolahti, M. Silvo, K. 2015. Päästökattodirektiiviehdotuksen ja keskisuurten polttolaitosten direktiiviehdotuksen toimeenpanon vaikutukset Suomessa. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/153981>. Viitattu 13.1.2019.

Tilastokeskus. 2018. Ilman pienhiukkaset merkittävä terveysongelma. Saatavissa: https://www.stat.fi/artikkelit/2008/art_2008-05-30_007.html?s=0. Viitattu 1.10.2018.

