

Mika Kuuppo

LEIJUKERROSKATTILA K3:N MINIMIKUORMA

Ilmajako ja kiertokaasun käytön vaikutukset NO_x-päästöihin

LEIJUKERROSKATTILA K3:N MINIMIKUORMA

Ilmajako ja kiertokaasun käytön vaikutukset NO_x-päästöihin

Mika Kuoppo
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Mika Kuuppo

Opinnäytetyön nimi: Leijukerroskattila K3:n minimikuorma, ilmajako ja kiertokaasun käytön vaikutukset NO_x-päästöihin

Työn ohjaajat: Reijo Hukkanen, Sami Tiuraniemi, Jukka Ylikunnari

Työn valmistuslukuksi- ja vuosi: Kevät 2016

Sivumäärä: 59 + 3

Tämä opinnäytetyö on tehty Stora Enso Oyj:n Oulun tehtaiden voimalaitokselle. Leijupetikattila K3 toimii voimalaitoksen höyryjärjestelmän säätävänä kattilana ja kattilalla ajetaan käytännössä aina osakuormilla. Energian käytön tehostamisen myötä on tullut ajankohtaiseksi tutkia, voidaanko K3-kattilan nykyistä minimihöyrykuormaa saattaa alemmalle tasolle. Energiatehokkuuden lisäksi myös päästörajojen tiukentuminen tulevaisuudessa on luonut tarpeen saattaa alemmas kattilan savukaasujen NO_x-päästöjä.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia K3-kattilan minimikuormaa, ilmajakoa ja kiertokaasun käytön mahdollisuuksia sekä näiden vaikutuksia kattilan NO_x-päästöihin. Työn tärkeimpänä tavoitteena oli saada laskettua kattilan minimikuormaa nykyisestä alemmalle tasolle. Tutkimuksessa perehdyttiin K3-kattilan toimintaan sekä pyrittiin löytämään minimikuormaa rajoittavia tekijöitä ja kattilan NO_x-päästöjen syntyyn vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus perustuu aiheesta löytyvään teoriaan, aikaisempiin tietoihin ja kokemuksiin K3-kattilasta sekä suoritettuihin koeajoihin. Koeajoista kerättyä dataa analysoitiin ABB-trendikuvaajien ja MS Excel -ohjelman avulla.

Tutkimuksessa löydettiin K3-kattilan minimikuormalla ajoin ja NO_x-päästöjen syntyyn vaikuttavia tekijöitä. Kiertokaasun käytöllä voidaan laskea petilämpötilaa ja vähentää kattilaan menevää yli-ilmamäärä, joka vaikuttaa myös kattilassa syntyviin savukaasupäästöihin. Minimikuormalla ajettaessa K3-kattilan ilmajaon ja kiertokaasun käytön muutokset ovat kuitenkin rajallisia. Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että K3-kattilan nykyistä minimikuormaa on mahdollista saattaa alemmas. Kattilaan menevää yli-ilman määrää vähennettiin ja kattilan jäännöhappitasoa saatiin laskettua. Tutkimuksen tuloksena tehtiin muutosehdotus kiertokaasupuhaltimen toimintaan minimikuormalla. Kattilalle tulevaisuudessa asetettuja NO_x-päästöjen päästöraja-arvoja ei kuitenkaan saavuteta pelkästään ilmajaon tai kiertokaasun käytön avulla. Uusien päästöraja-arvojen täyttäminen vaatii muutoksia käytettävien polttoaineiden suhteen tai sekundäärisiä menetelmiä NO_x-päästöjen vähentämiseksi.

Asiasanat: leijupetikattila, minimikuorma, ilmajako, kiertokaasu, NO_x-päästöt

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy engineering

Author: Mika Kuuppo

Title of thesis: Fluidized Bed Boiler K3, Minimum Load, Air Distribution and Flue Gas Recirculation and Its Effect on nitrogen oxide emissions

Supervisors: Reijo Hukkanen, Sami Tiuraniemi, Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016 Number of pages: 59 + 3

This thesis is done in Stora Enso Oyj's Oulu mills power plant. Fluidized bed boiler K3 operates as steam system control and the boiler is normally running in partial loads or minimum load. After improving the energy efficiency of the consumption of steam it has become important issue to examine whether the current minimum load of the steam boiler K3 may be at a lower level. Energy efficiency in addition to the tightening of the emission limits has created a need to lower the boiler flue gas nitrogen oxide emissions.

The purpose of this study was to investigate the K3 boiler minimum load, air distribution and opportunities for the use of the flue gas recirculation as well as their effects on the boiler nitrogen oxide emissions. The main objective was to decrease boiler current minimum load to a lower level. The study is based on the theory and previous knowledge of the K3 boiler and test drive data. The data collected from test drives were analyzed by using ABB trend graphs and MS Excel.

The factors affecting K3 boiler minimum load as well as the formation of nitrogen oxide emission determinants were found in the research. When using of the flue gas recirculation it is possible to decrease bed temperature and to reduce the degree of boiler excess air, which also influences the boiler emissions. Changes in the use of K3 boiler air distribution and flue gas recirculation are limited in minimum load driving. As a result of the study it can be concluded that it is possible to lower the current minimum load of the K3 boiler. The excess air of the boiler was reduced and the boiler residual oxygen level was slightly improved. On the basis of the analysis it was proposed that the operation of flue gas fan should be changed in minimum load. However, regarding NO_x-emissions from a boiler the emission limit values can not be achieved solely through the use of air distribution or flue gas recirculation. Complying with the new emission limit values requires changes in fuel ratio or secondary methods used to reduce NO_x-emissions.

Keywords: BFB Boiler, minimum load, air distribution, FGR, NO_x-emissions

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS.....	5
1 JOHDANTO	7
2 TEOLLISUUDEN VOIMALAITOS.....	8
2.1 Vastapainevoimalaitos.....	8
2.2 Stora Enson Oulun tehtaiden voimalaitos	10
3 HÖYRYKATTILATEKNIikka.....	13
3.1 Höyrykattilan toiminta	13
3.1.1 Luonnonkiertokattilat.....	15
3.1.2 Pakkokiertokattilat.....	17
3.1.3 Läpivirtauskattilat	17
3.2 Leijukerros poltto.....	18
4 KIINTEÄN POLTTOAINEEN PALAMINEN	21
4.1 Polttoaineen ominaisuudet.....	22
4.2 Palamisreaktiot	23
4.3 Palamisilmantarve	25
4.4 Palamisessa syntyviä päästöjä	27
4.4.1 Hiilidioksidi CO ₂	28
4.4.2 Hiilimonoksidi CO.....	28
4.4.3 Rikin oksidit SO _x	29
4.4.4 Typen oksidit NO _x	31
4.4.5 NO _x -päästöjen hallinta leijupoltossa	32
5 KATTILA K3.....	34
5.1 Kattilan perustiedot.....	34
5.2 Polttoaineet	35
5.2.1 Turve	36
5.2.2 Puupolttoaineet.....	37
5.3 Palamisilmajärjestelmä.....	39
5.4 Kiertokaasu	41
5.5 Päästöraja-arvot.....	42

6	TUTKIMUS JA KOEAJOT	45
6.1	Tutkimuksen lähtökohdat	45
6.2	Koeajoista saatu informaatio	45
7	TULOKSET	53
7.1	Kiertokaasun käytön muutos	54
7.2	Muita huomioita.....	55
8	YHTEENVETO	57
	LÄHTEET.....	58
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Stora Enso Oyj:n Oulun tehtaiden voimalaitokselle. Voimalaitos tuottaa prosessihöyryä, lämpöä ja sähköä tehdasintegraatin tarpeisiin. Tarvittava energia tuotetaan pääasiassa soodakattilalla (SK7) ja leijukerroskattilalla (K3). Leijupetikattila K3 toimii höyryjärjestelmän säätävänä kattilana, ja sillä ajetaan käytännössä aina osakuormilla.

Energian käytön tehostamisen ja energiatehokkuuden parantumisen myötä on tullut ajankohtaiseksi tutkia, voidaanko K3-kattilan nykyistä minimihöyrykuormaa saattaa nykyisestä alemmalle tasolle. Energiatehokkuuden lisäksi myös päästörajojen tiukentuminen on luonut tarpeen pienentää kattilan savukaasupäästöjä. Tällä hetkellä K3-kattilalla ei saavuteta tulevaisuudessa typen oksideille asetettuja päästöraja-arvoja.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia K3-kattilan minimikuormalla ajoa. Tavoitteena oli löytää minimikuormaa rajoittavia tekijöitä ja selvittää, voidaanko kattilan minimikuormaa saattaa entisestään alemmalle tasolle. Tarkoituksena oli tutkia myös ilmajaon ja kiertokaasun käytön vaikutuksia kattilan NO_x-päästöihin.

2 TEOLLISUUDEN VOIMALAITOS

2.1 Vastapainevoimalaitos

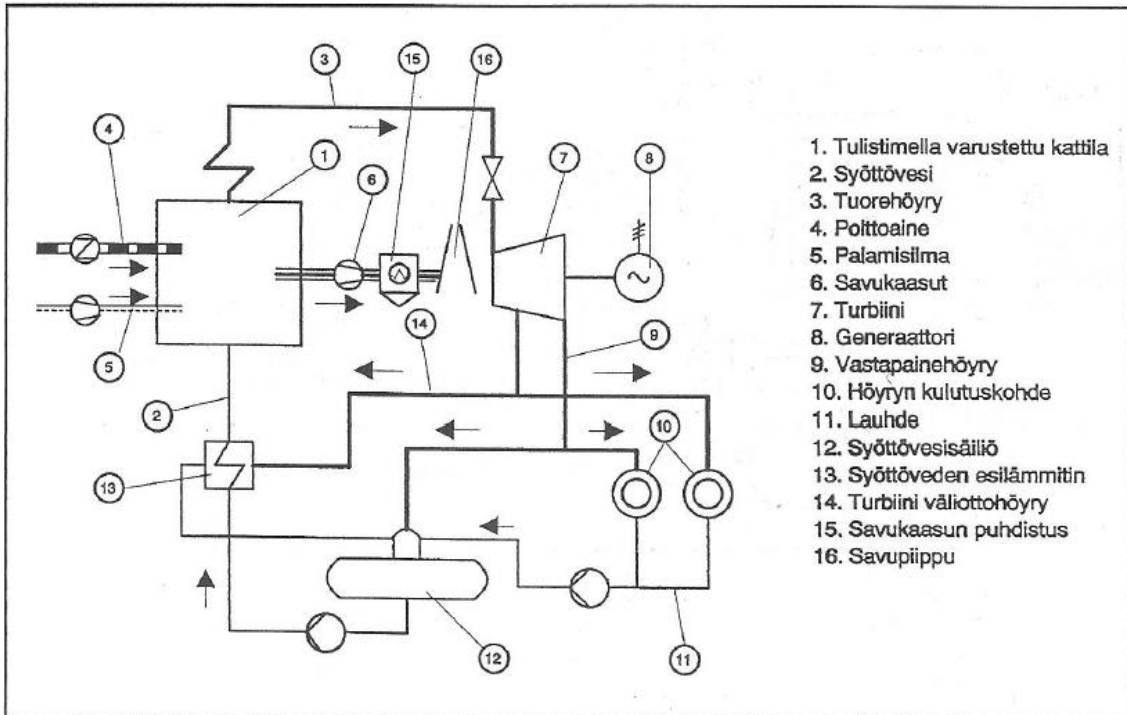
Teollisuuden voimalaitosten pääasiallinen tarkoitus on tuottaa teollisuusprosesseissa tarvittavaa lämpöä. Höyryllä on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, ja tämän vuoksi sen avulla voidaan siirtää tehokkaasti lämpöä. Teollisuusprosessien lämmitys onkin toteutettu usein käyttämällä höyryä. Lauhtuvan höyryn lämmönsiirtokerroin on parempi kuin jäähtyvän höyryn. Tämän vuoksi höyryä jäähdytetään tarvittaessa ruiskutusvedellä. Tarvittava höyry tuotetaan höyrykattilalla, ja kulutuskohteissa höyry käytetään suoraan prosessiin tai lämmitys tapahtuu lämmönsiirtimien avulla, jolloin lauhde palautuu voimalaitokselle. Teollisuusprosessit toimivat yleensä keskeytyksettä ympäri vuoden lukuun ottamatta huoltoseisakkeja. Lämmitystehontarpeiden ollessa riittävän suuria kannattaa alkaa tuottaa lämmön ohella sähköä. Sähköntuotantoa varten tarvitaan turbiinilaitos ja höyrykattilan painetasoa on korotettava. (1, s.12–13; 2, s. 63–64 ; 3, s. 24.)

Höyrykattilassa tuotettu tulistettu korkeapaineinen höyry johdetaan prosessiin turbiinin läpi, jolloin siitä vapautuva energia pyörittää turbiinia ja generaattoria. Turbiinin läpi virtaavan höyryn paine laskee prosessissa tarvittavan lämmityshöyryn paineeseen. Teollisuusprosesseissa tarvitaan usein eripaineisia höyryjä. Turbiinin vastapainetta korkeampipaineinen höyry voidaan johtaa prosessiin turbiinin väliotosta. Turbiini voidaan myös tarvittaessa ohittaa kokonaan reduktioventtiilien avulla. (1, s. 13; 2, s. 64; 3, s. 24.)

Teollisuuden voimalaitokset mitoitetaan niin, että prosesseissa tarvittava lämpö voidaan tuottaa suurelta osin vastapainehöyryllä. Vastapainevoimalaitoksissa turbiinin jälkeinen höyrynpaine ja lauhtumislämpötila ovat korkeammat kuin pelkästään sähköä tuottavissa lauhdevoimalaitoksissa. Tyypillinen teollisuuden voimalaitosten vastapainehöyryverkon paine on 2-3 bar. (1, s. 13; 2, s. 64; 3, s. 24.)

Sähköä ja lämpöä tuottavan vastapainevoimalaitoksen hyötysuhde on korkea, tyypillisesti 85–90 % (3, s. 24). Vastapainevoimalaitoksissa tuotetun sähkötehon ja lämpötehon suhdetta kuvataan rakennusasteella. Tyypillisesti teollisuuden vastapainevoimalaitosten rakennusaste on 0,3–0,4.

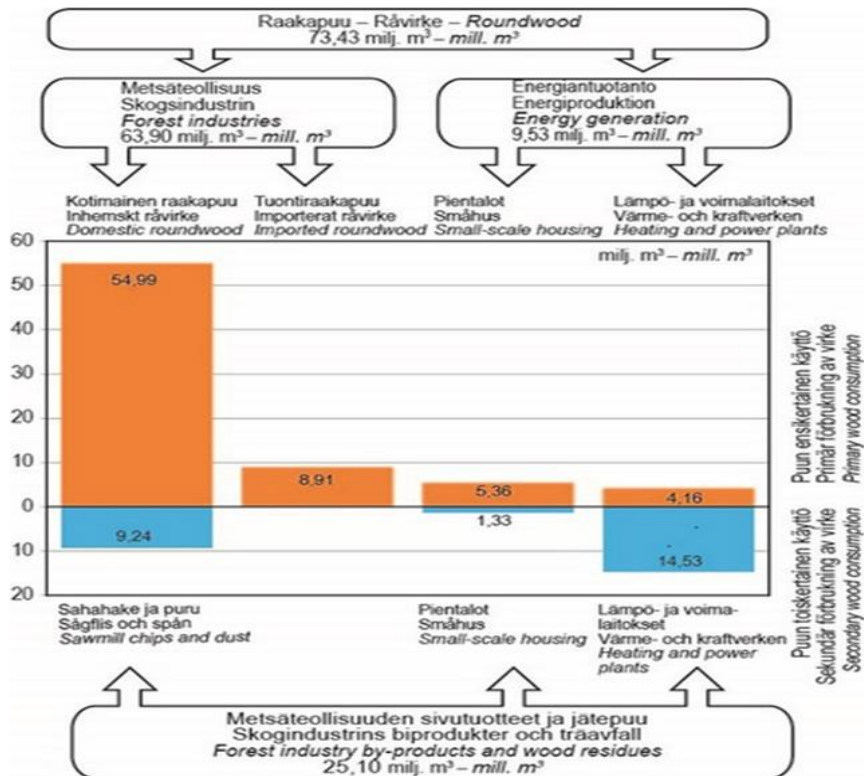
Rakennusasteeseen vaikuttavat turbiinin hyötysuhde ja käytettävä vastapaine. (2, s. 64.) Alla olevassa periaatekuvassa (kuva 1) on esitetty teollisuuden vastapainevoimalaitoksen tärkeimmät osat ja ainevirrat.



KUVA 1. Teollisuuden vastapainevoimalaitos, periaatekuva (1, s.13)

Prosessiteollisuuden voimalaitoksissa käytetään yleensä polttoaineina prosesseista syntyviä jätteitä. Voimalaitokseen voi kuulua useita kattiloita ja turbiineja (1, s. 13; 2, s. 65; 3, s. 24). Kattiloiden tuorehöyryn paineista ja lämpötiloista riippuen kattiloilla voi olla yhteinen jakotukki, joka mahdollistaa myös ristiin käyttämisen. Yleensä teollisuuden vastapainevoimalaitosten kattilat ovat luonnonkiertokattiloita, joiden tuorehöyryn paine on 70–115 bar ja lämpötila 500–535 °C. (3, s. 24.)

Metsäteollisuuden yhteydessä syntyvät energijakeet kuten mustalipeä, puun kuori ja sahanpuru, hyödynnetään valtaosin teollisuuden omissa voimalaitoksissa (4; 5). Suomen raakapuun käytöstä noin 46 % käytetään selluteollisuudessa (6). Kuvassa 2 on esitetty Suomen raakapuunkäyttöä vuonna 2014 ja sen jakaantumista metsäteollisuuden ja energiantuotannon kesken.



KUVA 2. Suomen puunkäyttö vuonna 2014 (6)

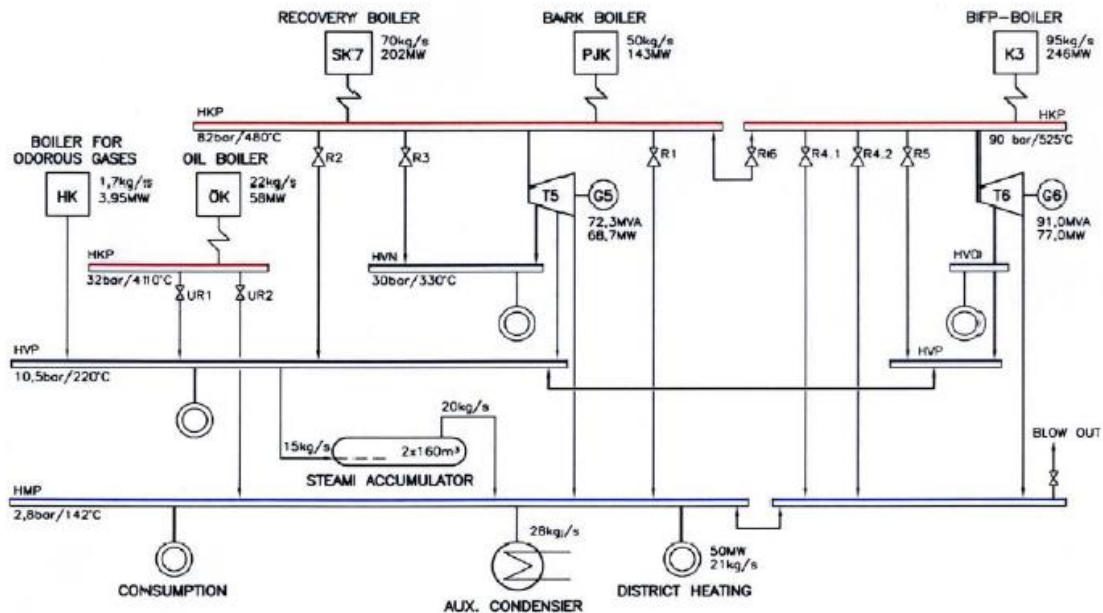
Suomen metsien vuotuinen kasvu on noin 104 miljoonaa kuutiometriä. Vuonna 2014 Suomessa käytettiin raakapuuta yhteensä 73,4 miljoonaa kuutiometriä. Suomen metsien hakkuukertymä oli noin 64 miljoonaa kuutiometriä. Hakkuukertymästä 86 % oli tukki- ja kuitupuuta, jotka käytettiin kotimaisen teollisuuden raaka-aineeksi tai vientiin. Vuoden 2014 hakkuukertymästä noin 9,5 miljoonaa kuutiometriä oli energiapuuta, joka käytettiin pientalojen polttopuuna tai metsähakkeena lämpö- ja voimalaitoksissa. (6.) Puupolttoaineiden lisäksi metsäteollisuuden voimalaitoksissa käytetään energiantuotannon turvaamiseksi myös muita polttoaineita, esimerkiksi turvetta (4).

2.2 Stora Enson Oulun tehtaiden voimalaitos

Stora Enso Oyj:n Oulun tehtaaseen kuuluvat sulfaattisellutehdas ja voimalaitos, kaksi paperintuotantolinjaa ja arkittamo. Sellutehtaalla tuotetaan valkaistua havusellua. Sellutehtaan tuotantokapasiteetti on 350 000 tonnia vuodessa. Paperikoneilla tuotetaan puuvapaata taidepainopaperia ja niiden vuosituotantokapasiteetti on 1 125 000 tonnia. Arkittamon arkituskapasiteetti on 457 000 tonnia vuodessa. (7; 8.)

Oulun tehtaiden kunnossapidosta huolehtii Stora Enso:n omistama Efora Oy. Stora Enson tehdasintegraatin lisäksi Nuottasaaren alueella toimivia muita yhtiöitä ovat Arizona Chemical Oy, Synthomer Finland Oy, Akzo Nobel Pulp and Performance Chemicals Oy ja Oplax Oy. (7; 8.)

Stora Enso Oyj:n Oulun tehtaiden voimalaitokseen kuuluvat soodakattila (SK7), leijukerroskattila (K3) ja apukattiloina käytettävät puujättekattila (PJK) ja öljykattila (ÖK). Lisäksi prosessissa syntyviä hajukaasuja poltetaan hajukaasukattilassa. Voimalaitos tuottaa prosessihöyryä, lämpöä ja sähköä tehdasalueen tarpeisiin. Voimalaitoksella tuotetaan kaikki alueella tarvittava lämpö ja 60 % tarvittavasta sähköenergiasta. Lisäksi voimalaitos toimittaa kaukolämpöä Oulun Energialle. (7; 8.) Normaalikäytössä soodakattilalla ajetaan peruskuormaa ja höyryverkossa tapahtuvia muutoksia tasataan höyryakun avulla. Leijupetikattila K3 seuraa höyryakun painetta ja toimii höyryverkkoa säätävänä kattilana. Voimalaitoksen höyryverkko on esitetty kuvassa 3.

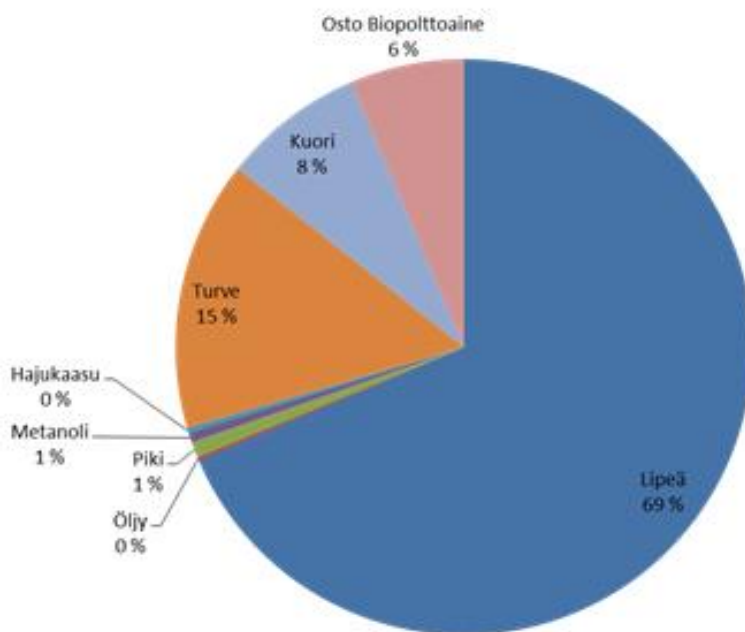


KUVA 3. Voimalaitoksen höyryverkko (8)

Alström Oy:n vuonna 1988 valmistaman soodakattila 7:n nimelliskuorma on 2000 kuiva-ainetonna mustalipeää. Soodakattilan teho on 202 MW ja sitä vastaava höyrykehitys on noin 70 kg/s. Tuorehöyryn arvot ovat 82 bar ja 480 °C. Soodakattilalla katetaan noin 63 % höyryn kokonaiskulutuksesta. Vuonna 1997 käyttöön otettu, Kvaerner Pulping Oy:n valmistama leijupetikattila K3:n nimellishöyrykuorma on 95 kg/s ja sitä vastaava teho on 246 MW. K3:n tuorehöyryn paine on 90 bar ja lämpötila 525 °C. K3:lla tuotetaan noin 36 % alueella käytetystä höyrystä. Hajukaasukattilan höyryntuotanto on 1,7 kg/s ja teho 3,95 MW. Apukattilana toimiva puujättekattila on alun perin Götaverken vuonna 1964 valmistama soodakattila, mutta se on

muutettu Alströmin toimesta arinakattilaksi vuonna 1989. Puujättekattilan nimellisteho on 143 MW. Lisäksi apukattilana toimii Alströmin vuonna 1973 valmistama 52 MW:n öljykattila. Apukattiloilla tuotetaan noin 1 % höyrystä. (7; 8.)

Höyryntuotannosta noin 20 % käytetään sähköntuotantoon. Väliottovastapaineturbiineita on käytössä kaksi: TG5 ja TG6. AEG Kanisin vuonna 1997 valmistama turbogeneraattori 5 on suunniteltu höyryarvoille 110 kg/s, 80 bar ja 475 °C. TG5:n nimellisteho on 68,7 MW ja sähköteho 61,5 MW. Turbogeneraattori 6:n on valmistanut Siemens vuonna 1996. Sen nimellis- ja sähköteho on 77 MW ja se on suunniteltu höyryarvoille 110 kg/s, 86–100 bar ja 525 °C. Turbiinien vastapaine on 2,8 bar ja molemmissa turbiineissa on 25 bar:n ja 11 bar:n väliotot. (7; 8.) Voimalaitos tuottaa vuodessa noin 5 TWh energiaa, josta biopolttoaineilla tuotetaan noin 85 % (7). Energiantuotannossa käytettävät polttoaineet on esitetty kuvassa 4.



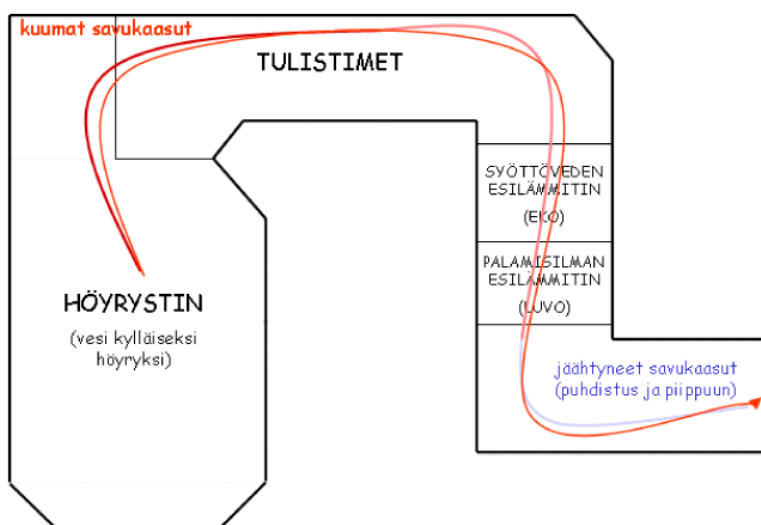
KUVA 4. Oulun tehtailla energiantuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuudet vuosina 2010–2015 (7)

3 HÖYRYKATTILATEKNIikka

3.1 Höyrykattilan toiminta

Voimalaitosten höyrykattilat ovat yleensä vesiputkikattiloita. Vesiputkikattiloissa vesi höyrystyy tulipesän ympärillä olevissa putkissa, ja niiden rakenne soveltuu suurvesikattiloita paremmin korkeammille paineille. (1, s. 7.) Tyypillisesti teollisuuden voimalaitoskattilat ovat lieriökattiloita, joiden höyrynpaine on 80–220 bar ja tuorehöyryn lämpötilat 450–550 °C (9).

Höyrykattilan tehtävänä on tuottaa sinne syötetystä vedestä höyryä. Kattilaan syötetyn syöttöveden lämpötila nostetaan höyrystymislämpötilaan, jonka jälkeen vesi höyrystyy painetta vastaavassa höyrystymislämpötilassa. Muodostunutta kylläistä höyryä tulistetaan vielä höyrystymislämpöä korkeampaan lämpötilaan. Höyryn tuottamisessa tarvittavan energian aikaansaamiseksi kattilassa poltetaan polttoainetta. Palamisreaktioiden seurauksena vapautuva kemiallinen energia siirtyy savukaasuihin lämpönä. Lämpöenergia pyritään ottamaan mahdollisimman tehokkaasti hyödyksi kattilan lämmönsiirtimissä ennen kuin se johdetaan puhdistuksen kautta piippuun. Kattilan lämmönsiirtimiä ovat höyrystin, tulistimet, syöttöveden esilämmitin (ekonomaiser, EKO) ja palamisilman esilämmitin (luftvorwärmer, LUVO). (1, s. 7; 9.) Höyrykattilan lämmönsiirtimien sijoittuminen kattilaan on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Höyrykattilan lämmönsiirtimet (9)

Kattilan korkeimmat lämpötilat ovat luonnollisesti tulipesässä. Tulipesän lämpötila on tyypillisesti 800–1300 °C riippuen käytettävästä polttotekniikasta ja polttoaineesta. Tulipesästä lämpö siirtyy tulipesän ympärillä olevan keittoputkiston avulla höyrystettävään veteen. Höyrystyvän veden aiheuttaman jäädytyksen ansiosta höyrystinputkiseinämien lämpötila on lähellä veden höyrystymislämpötilaa. Painehäviöiden vuoksi höyrystimen paine on tulistetun höyryn painetta hieman korkeampi. Veden höyrystymislämpötila on riippuvainen vallitsevasta paineesta. Esimerkiksi 10 bar paineessa vesi höyrystyy 179 °C:n lämpötilassa ja kriittisessä pisteessä 221 bar veden höyrystymislämpötila on 374 °C. Ylikriittisillä arvoilla ei voida enää havaita selvää faasimuutosta veden ja höyryn välillä. (1, s. 185.)

Koska höyryllä ei ole yhtä tehokasta materiaaleja jäädyttävää vaikutusta kuin vedellä, sijoitetaan tulistimet yleensä tulipesän yläosaan tai sen jälkeiseen savukaasukanavaan. Savukaasujen lämpötila on tulistinvyöhykkeellä vielä tarpeeksi korkea haluttujen tulistuslämpötilojen tuottamiseksi. Materiaalitekniisten rajoitusten vuoksi tulistuslämpötilat ovat maksimissaan noin 550 °C. Tulistimet koostuvat yleensä useasta erilaisesta tulistimesta. Tulistimet voidaan jakaa niiden sijoituspaikan ja lämmönsiirron mukaisesti säteily-, konvektio-, yhdistelmä- ja verhotulistimiin. Säteilytulistimet sijaitsevat yleensä tulipesän yläosassa ja lämpö siirtyy niissä säteilynä. Konvektiotulistimet sijoitetaan savukaasukanavaan, jolloin lämpö siirtyy ainoastaan konvektion vaikutuksesta. Yhdistelmätulistimissa osa tulistimesta toimii säteilytulistimena ja osa konvektiotulistimena. Verhotulistimia käytetään yleensä lämpöpintoja likaavia polttoaineita polttavissa kattiloissa. Verhotulistin on säteilytulistin, joka suojaa jäljempänä olevia konvektiotulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. (1, s. 188–190; 9.)

Tulistuksen lämpötilan on oltava vakaa. Tyypillisesti tulistimilta lähtevän höyryn lämpötila on 450–550 °C. Lämpötilan laskiessa höyrystä saatava energia vähenee ja turbiinin teho laskee. Lämpötilan noustessa liikaa voivat materiaalit ylikuumentua. Höyryn lämpötilaa voidaan säätää ruiskuttamalla vettä höyryn joukkoon. Turbiinin sähköntuottoa saadaan tehostettua välitulistimella. Välitulistimessa tulistetaan matalampipaineista höyryä, joka on johdettu turbiinilta takaisin kattilaan. (1, s. 188.)

Tulistimien jälkeen savukaasujen lämpötila on vielä noin 600–800 °C. Savukaasujen sisältämää energiaa käytetään kattilaan tuotavan syöttöveden lämmitykseen. Syöttöveden lämmitys tapahtuu savukaasukanavaan sijoitetussa lämmönsiirtimessä, ekonomaiserissa. Ekonomaiserin voi olla tyypiltään höyrystävä tai höyrystämätön. Höyrystävässä ekonomaiserissa vesi saavuttaa

höyrystyslämpötilan ja siirtyä kattilaan osittain höyrystyneenä. Höyrystämättömistä ekonomaisereista poistuvan veden lämpötila on noin 20 °C alle höyrystyslämpötilan. Sähköntuotannon hyötysuhteen parantamiseksi voimalaitoksissa syöttövettä lämmitetään myös höyryllä. Ekonomaiseriin tulevan syöttöveden lämpötila on tyypillisesti 100–250 °C ja sieltä lähtevän savukaasun lämpötila on vielä 250–450 °C. (1, s. 194–195; 9.)

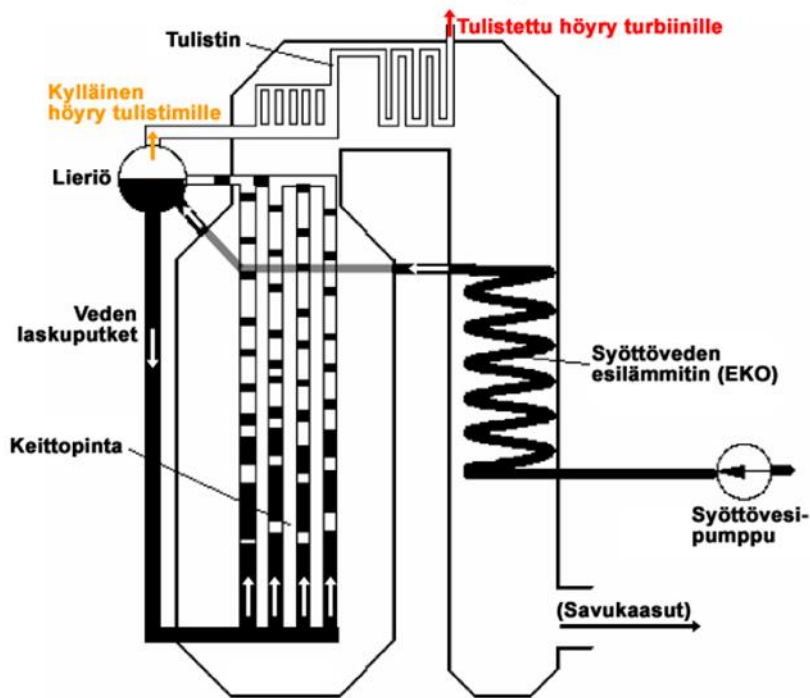
Ilman esilämmitin eli LUVO sijaitsee yleensä kattilan viimeisenä lämmönsiirtimenä. Palamisilman lämmityksellä saadaan kuivattua polttoaineen kosteutta, tehostettua syttymistä ja nopeutettua palamista. Ilman esilämmityksen merkitys korostuu kosteita ja epähomogeenisiä polttoaineita poltettaessa. Kattilaan tuotavan palamisilman lämpötila on 100–400 °C riippuen polttoaineesta ja käytettävästä polttotekniikasta. Luvosta lähtevien savukaasujen lämpötila määräytyy happokastepisteen mukaan. (1, s. 196–197; 9.)

Kattilan savukaasuhäviöt eli savukaasujen mukana kattilasta poistuva energia on yleensä suurin kattilan hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä. Savukaasuhäviöiden määrä riippuu savukaasujen määrästä ja niiden loppulämpötilasta. Savukaasujen tulisi poistua kattilasta mahdollisimman kylminä. Lämpöpintojen syöpymisen ehkäisemiseksi tulee rikkiä sisältäviä polttoaineita poltettaessa savukaasujen lämpötilan olla yli happokastepisteen. Savukaasujen lämpötila on tyypillisesti ilman esilämmittimen jälkeen 150–200°C. Happokastepisteen alittumista voidaan estää lämmittämällä savukaasuluvoon menevää ilmaa höyryluvolla. (1, s. 108; 9.)

Kattilan lämmönsiirron tehokkuuteen ja savukaasuhäviöihin vaikuttaa myös lämmönsiirtopintojen likaantuminen. Likaantumisen seurauksena kattilan lämmönsiirto heikkenee ja savukaasujen loppulämpötila nousee. (1, s. 214; 9.) Lämpöpintojen likaantuminen aiheuttaa myös virtausvastusta ja tätä kautta kattilan omakäyttötehon nousua. Kattilan lämpöpintojen likaantumista ehkäistään nuohoamalla kattilaa. (1, s. 214.)

3.1.1 Luonnonkiertokattilat

Vesiputkikattilat voidaan jakaa niiden vesi-höyrykierron mukaan luonnonkiertokattiloihin, pakkokierto-kattiloihin ja läpivirtauskattiloihin (1, s. 111; 9). Luonnonkiertokattila on tyypillisin metsäteollisuuden voimalaitoksissa käytetty kattila. (9.) Luonnonkiertokattilan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Luonnonkiertokattilan periaate (9)

Luonnonkattilassa vesi kiertää kattilassa ilman erityistä pumppua. Syöttövesi tuodaan kattilaan syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpun avulla. Syöttövesipumpulla vedenpaine nostetaan kattilan painetta vastaavaan paineeseen ja vesi johdetaan syöttöveden esilämmittimelle. Syöttövesi lämmitetään esilämmittimessä savukaasuista saatavalla energialla. Samalla saadaan savukaasujen lämpötilaa laskettua ja parannettua näin kattilan hyötysuhdetta. Lähelle kylläistä lämpötilaa esilämmitetty syöttövesi johdetaan esilämmittimestä lieriöön. Lieriöstä vesi siirtyy laskuputkia pitkin höyrystinputkien alaosaan. Vesi jakautuu kattilan seinillä oleviin höyrystinputkiin ja alkaa höyrystyä. Höyrystyessään veden tiheys pienenee, ja veden sekä vesihöyryn seos nousee takaisin lieriöön. (1, s. 113; 9.)

Lieriössä vesi ja keittoputkistossa muodostunut höyry erotetaan toisistaan. Vesi jää lieriön pohjalle, sekoittuu syöttövedeen ja kiertää laskuputkia pitkin takaisin höyrystimeen. Kylläinen höyry nousee lieriön yläosaan, josta se virtaa edelleen tulistimille. Syöttöveden mukana tulleet suolat ja muut epäpuhtaudet jäävät pääosin kattilaveteen. Epäpuhtauksien määrää höyryssä voidaan vähentää lieriön ulos puhalluksella. (1, s. 113; 9.)

Luonnonkiertokattiloissa höyrystimen ja lieriön välinen kierto perustuu veden ja vesihöyryn tiheyserojen aiheuttamaan paine-eroon. Höyrystimen aiheuttamien virtausvastusten on oltava

vähäiset, koska tiheyserojen paine-eron on oltava suurempi kuin veden ja vesihöyrynkierrosta aiheutuva painehäviön. Paineen kasvaessa veden ja höyryn tiheys pienenee. Kriittisessä 221 bar:n paineessa veden ja höyryn tiheys on sama 315 kg/m³. Tämä rajoittaa luonnonkiertokattiloissa käytettäviä paineita. Tulistimilta tulevan höyrynpaineen on oltava alle 170 bar, jotta luonnonkierto toimisi. Paineen ollessa 170 bar on veden tiheys vielä noin viisinkertainen höyryn tiheyteen verrattuna. (1, s. 113–114; 9.)

Höyrystinputkissa virtaavan vesimassan suhdetta kattilasta tuotettuun höyryyn kuvataan kattilan kiertoluvulla. Kiertoluku on matalapaineista höyryä tuottavilla kattiloilla suuri ja korkeapaineisilla kattiloilla pieni. Luonnonkiertokattiloiden kiertoluku on 5–100. (1, s. 115; 9.)

3.1.2 Pakkokiertokattilat

Pakkokiertokattilat eroavat luonnonkiertokattiloista siten, että pakkokiertokattiloissa vedenkierron tehostamiseksi lieriön ja höyrystimen välillä käytetään pumppua. Pakkokiertokattiloita voidaan tämän vuoksi käyttää hieman luonnonkiertokattiloita korkeammille paineille. Veden ja höyryn erotus lieriössä tapahtuu kuitenkin samalla periaattella kuin luonnonkiertokattiloissa, joten pakkokiertokattiloiden paineen tulee olla kriittisen paineen alapuolella. Käytännössä pakkokiertokattiloiden tuorehöyryn paine voi olla korkeimmillaan noin 190 bar. (1, s. 178; 9.)

Pakkokiertopumpun ansiosta pakkokiertokattiloiden kiertoluku on kolmesta kahdeksaan. Pakkokiertokattiloissa höyrystinputkiston rakenne ja painehäviöt eivät aseta samanlaisia rajoitteita kuin luonnonkiertokattiloissa. Toisaalta pumppu lisää kattilan omakäyttötehon tarvetta. Lämmöntalteenottokattilat ovat yleensä pakkokiertokattiloita. (1, s. 118; 9.)

3.1.3 Läpivirtauskattilat

Läpivirtauskattiloissa vesi virtaa nimensä mukaisesti kerralla kattilan läpi ja tulee höyrynä ulos. Läpivirtauskattiloissa ei ole lieriötä, vaan kaikki kattilaan pumpattu vesi höyrystyy. Läpivirtauskattilalliloiden kiertoluku on näin ollen yksi. Lieriön puuttuminen luo erityisvaatimuksia läpivirtauskattiloiden kattilaveden laadulle, koska epäpuhtauksia ei voida poistaa ulospuhalluksella. Läpivirtauskattiloissa vettä ja höyryä ei erotella kuten lieriökattiloissa. Tämän vuoksi läpivirtauskattiloita voidaan käyttää myös ylikriittisille paineille. (1, s. 120; 9.)

Läpivirtauskattilat jaetaan kahteen päätyyppiin kehittäjiensä mukaan: Sulzer-kattiloihin, jotka toimivat kiinteässä höyrystymispisteessä ja Benson-kattiloihin, joissa ei ole kiinteää veden höyrystymispistettä, vaan se vaihtelee kattilan kuormituksen mukaan. Läpivirtauskattiloita käytetään suurissa voimalaitoksissa, joissa voimalaitosprosessi on sähköntuotannon höytösuhteen parantamiseksi rakennettu korkeille höyrynpaineille. (1, s. 120; 9.)

3.2 Leijukerros poltto

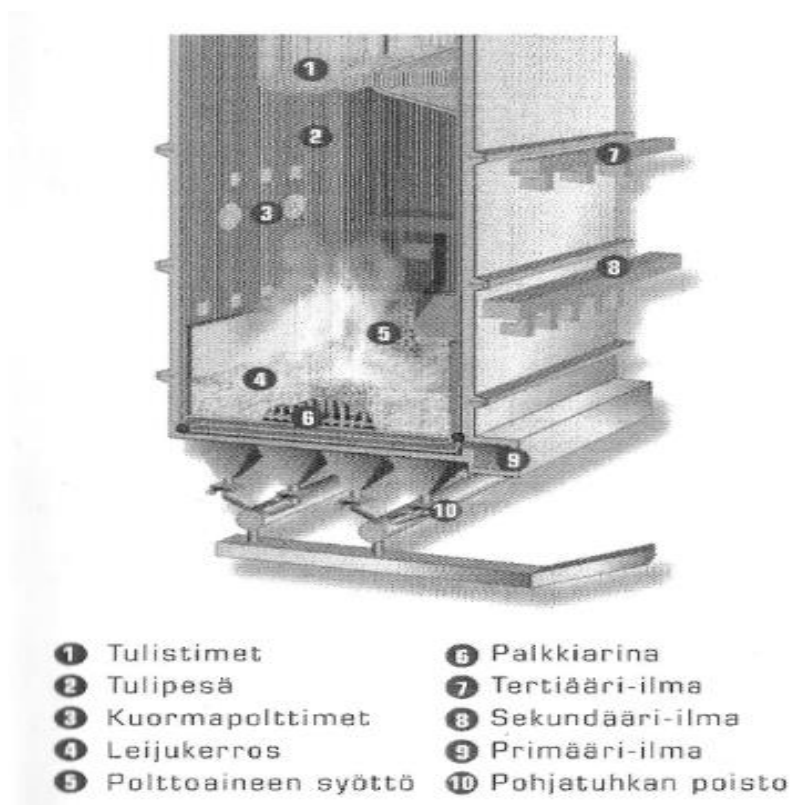
Leijukerros polttoa on alettu soveltamaan kattilatekniikkaan 1970-luvulla. Nykyään se on yksi voimalaitoskattiloiden tärkeimmistä menetelmistä kiinteiden polttoaineiden poltossa (1, s. 153; 2, s. 36; 11, s. 490). Leijukerros poltossa polttoaine palaa leijutettavan palamattoman rakeisen petimateriaalin seassa. Petimateriaalina käytetään yleensä hiekkaa. Petimateriaali saadaan leijuvaan tilaan materiaalikerroksen alta puhallettavan leijukaasun avulla. Petimateriaaliin sitoutuneen energian ansiosta leijupoltotekniikalla on mahdollista polttaa erilaisia polttoaineita yhtäaikaan. Pedin suuri lämpökapasiteetti tasaa polttoaineen laadussa tapahtuvia vaihteluita. Tämä mahdollistaa myös huonon lämpöarvon omaavien polttoaineiden polton ilman erityisiä esikäsitteilyjä. Leijupoltossa palamisessa tarvittavan ilman ja polttoaineen sekoittuminen sekä myös lämmönsiirto tulipesästä on tehokasta. (1, s. 153–159; 2, s. 36; 10, s. 39–40; 11, s. 490.)

Leijupoltossa käytettävät kattilat voidaan jakaa käytetyn polttotekniikan mukaisesti leijupetikattiloihin ja kiertopetikattiloihin. Leijupetikattiloissa petimateriaali pysyy tulipesässä selvänä kerroksena. Kiertopetikattiloissa käytetyn petimateriaalin raekoko on pienempi ja leijutusnopeudet ovat suuremmat. Kiertopetikattiloissa ei voida havaita selvää materiaalikerrosta, vaan kiintoainehiukkaset kulkeutuvat leijutustilasta pois, ja petimateriaali erotetaan savukaasuista syklonin avulla ja palautetaan takaisin tulipesään. (1, s. 155, 159; 2, s. 36; 10, s. 39–40; 11, s. 490.)

Leijutila saadaan aikaan, kun petimateriaalin alta puhallettavan leijukaasun nopeus ylittää minimileijutusnopeuden. Tällöin kaasukuplat kulkevat petimateriaalin läpi ja peti fluidisoituu. Minimileijutusnopeudella tarkoitetaan virtausnopeutta, jossa leijukaasuvirtauksen aiheuttaman paine-eron synnyttävä voima on yhtäsuuri kuin petimateriaalipartikkeleihin kohdistuva maanvetovoima. Leijupetikattiloissa leijukaasun virtausnopeus pidetään sellaisella tasolla, että

petimateriaali ei lähde kaasujen mukana lentoon vaan se pysyy kuplivassa kerroksessa. (1, s. 157–159; 10, s. 39–40; 11, s. 490–491.)

Kuvassa 7 on esitetty leijupetikattilan rakenne. Tulipesän alaosa on vuorattu tulenkestävällä massalla putkien eroosion ja ylikuumentumisen estämiseksi. Tulipesän pohjana toimii ilmanjakoarina, jossa ovat leijuilmasuuttimet. Ilmanjakoarinan painehäviön on oltava riittävän suuri, jotta ilma jakaantuu tasaisesti petiin. Tyypillisesti ilmanjakoarinan painehäviö on noin 30–50 % leijupedin painehäviöstä. (1, s. 158.) Polttoilmasta tuodaan tyypillisesti noin puolet leijuilman mukana primääri-ilmana. Palamisen tehostamiseksi loppu palamisilmasta tuodaan jälkipalotilaan sekundääri- ja tertiääri-ilmana. Jälkipalotilan sopivalla vaihteistuksella voidaan myös vähentää palamisesta aiheutuneita NO_x-päästöjä. (11, s. 490.)



KUVA 7. Leijupetikattilan rakenne (2, s. 37)

Pohjatuhka ja muu karkea-aines poistetaan kattilan pohjalla olevien pohjatuhkasuppiloiden kautta. Petimateriaalia poistetaan määräjain, ja se seulotaan ja palautetaan takaisin kattilaan. Hienojakoisempi tuhka jauhautuu petimateriaalin seassa ja poistuu savukaasujen mukana lentotuhkana. Lentotuhka ja muut hiukkaset poistetaan savukaasuista yleensä sähkösuodattimella. (1, s. 158; 2, s. 37.)

Ennen kiinteän polttoaineen polttoa leijupeti on lämmitettävä sytytyspolttimien avulla noin 500–600 °C:n lämpötilaan, jotta pääpolttoaine varmasti syttyy. Sytytyspolttimien polttoaineena käytetään yleensä öljyä tai kaasua. (1, s. 158.) Kiinteä polttoaine syötetään sulkusyöttimien kautta pedin yläpuolelle, jolloin osa polttoaineesta kaasuuntuu ja palaa heti. Suuremmat partikkelit putoavat petiin, jossa ne lopulta palavat. Leijukerros poltto soveltuu parhaiten polttoaineille, jotka syttyvät matalassa lämpötilassa ja sisältävät runsaasti haihtuvia komponentteja. (1, s. 159; 10, s. 40.) Taulukossa 1 on esitetty leijukerroskattiloissa tyypillisesti käytettäviä toiminta-arvoja.

TAULUKKO 1. Leijukerroskattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (1, s. 159)

Petihiekan keskiraekoko	1 - 3 mm
Leijutusnopeus	0,7 - 2 m/s
Hiekkapedin korkeus	0,4 - 0,8 m
Hiekkakerroksen painehäviö	6,0 - 12 kPa
Pedin lämpötila	700 - 1000 °C
Kaasutilan lämpötila	700 - 1200 °C
Pedin tiheys	1000 - 1500 kg/m ³
Ilmakerroin	1,1 - 1,4
Sekundääri-ilman osuus	30 - 70 %
Primääri-ilman lämpötila	20 - 400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20 - 400 °C
Tilavuusrasitus	0,1 - 0,5 MW/m ³
Poikkipintarasitus	0,7 - 3 MW/m ³

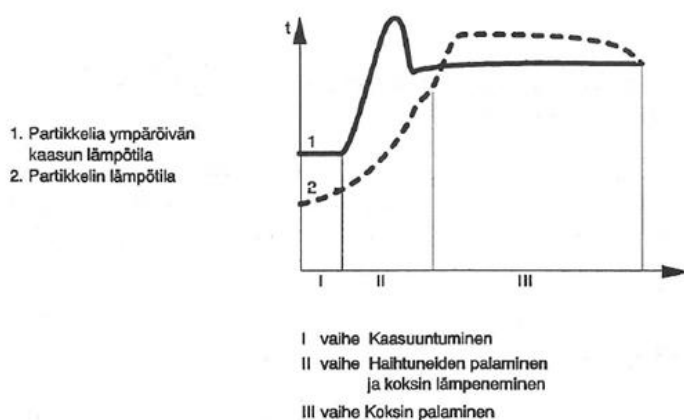
Leijukerroskattiloissa pedin lämpötila on pidettävä noin 100 °C tuhkan pehmenemispisteen alapuolella. Tuhkan pehmeneminen tai sulaminen johtaa petimateriaalin sintraantumiseen. Sintraantuneen petimateriaalin poistaminen kattilasta vaatii yleensä kattilan alasajon. Pedin kuumenemista voidaan rajoittaa esimerkiksi savukaasujen kierrätyksellä. (1, s. 158.)

Leijupetikattiloiden säätöalue on tyypillisesti 30–100 %. Leijupetikattiloiden säätöalue rajautuu petilämpötilojen ja leijutusnopeuksien mukaan. Minimitehoa rajoittaa yleensä minimileijutusnopeus ja pedin lämpötila, jonka tulisi olla vähintään 700 °C. Maksimitehoa rajoittaa pedin maksimilämpötila ja maksimileijutusnopeus, jonka jälkeen petimateriaali ei pysy enää leijuvassa kerroksessa vaan karkaa savukaasujen mukana. Leijupetikattilan säätöaluetta voidaan laajentaa korvaamalla minimikuormalla ajettaessa leijutusilmaa kiertokaasulla tai jakamalla peti osastoihin. (1, s. 159.)

4 KIINTEÄN POLTTOAINEEN PALAMINEN

Palaminen on aineen kemiallista yhtymistä happeen. Kiinteiden polttoaineden palamisreaktiossa hapen kanssa reagoivia aineita ovat yleensä hiili (C), vety (H), rikki (S) ja typpi (N). Palamisreaktion nopeus riippuu reagoivien aineiden määrästä, niiden aktivoitumisenergiasta ja lämpötilasta. Lämpötilan nousu kiihdyttää palamisreaktiota, ja lämpötilan noustessa riittävän korkeaksi polttoaineen ja ilman seos syttyy. Polttoaineen ja hapen muutos palamistuotteiksi tapahtuu nopeasti haarautuvien reaktioketjujen kautta. (1, s. 79.)

Kiinteän polttoaineen palaminen voidaan jakaa vaiheisiin, jotka tapahtuvat polttoainepartikkelissa peräkkäin ja osittain päällekkäisinä ilmiöinä. Näitä vaiheita ovat lämpeneminen ja kuivuminen, syttyminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen. Ulkoisen lämmön vaikutuksesta polttoainepartikkeli kuivuu ja partikkelista vapautuu kosteutta sekä muita kaasumaisia komponentteja kuten hiilivetyjä. Kaasumaiset komponentit syttyvät palamaan. Lämpötila polttoainepartikkelin ympärillä kohoaa, ja polttoainepartikkeli alkaa lämmetä. Palavien kaasumaisten komponenttien määrän ollessa riittävän suuri sytyttää niiden palamisessa syntyvä lämpö jäljelle jääneen jäännöshiilipartikkelin palamaan. Jäännöshiilipartikkelin lämpötila nousee ympäristön lämpötilaa korkeammaksi, ja se alkaa luovuttamaan lämpöä. Jäännöshiilen palamisen jälkeen jäljelle jää tuhka. Kuivuminen, syttyminen ja pyrolyysi sitovat energiaa kemiallisiin sidoksiin. Pyrolyysikaasujen ja jäännöshiilen palaminen rikkoo sidoksia vapauttaen kemiallista energiaa, joka ilmenee lämpönä. (1, s. 83; 11, s. 61, 186.) Kuvassa 8 on esitetty kiinteän polttoainepartikkelin palamisen vaiheet.



KUVA 8. Kiinteän polttoaineen palamisen vaiheet (1, s. 82)

Alemmissa palamislämpötiloissa happi absorboituu jäännöshiilen pintaan ja reagoi hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Korkeammissa palamislämpötiloissa hapen absorptio hiilen pintaan vähenee, jolloin hiilen pinnassa hiilidioksidi reagoi hiilimonoksidiksi. Hiilimonoksidi oksidoiduu hiilidioksidiksi vasta siirryttyään polttoainepartikkelin pinnasta ympäröivään happipitoiseen kaasuun. (1, s. 83.)

Palamisprosessin tavoitteena on yleensä tuottaa lämpöä mahdollisimman tehokkaasti ja mahdollisimman pienin päästöin. Tehokkaan palamisen edellytys on ilman ja polttoaineen sekoittuminen sekä oikea polttoaineen ja ilman välinen suhde. (10, s. 38.) Polttoprosesseissa usein polttoaine ja polttoilma eivät ole esisekoitettuja eli palaminen tapahtuu diffuusiopalamisena. Tällöin polttoprosessin lämmönluovutusta ja palamisnopeutta rajoittavat sekoittuminen ja aineensiirto. Palamisreaktion ylläpitäminen tarvitsee siis polttoaineen, hapen ja riittävän lämpötilan läsnäoloa. Polttoprosesseissa palamisen tehoa säädetään polttoaineen syötöllä, prosessin lämpötilalla ja ilman tuonnilla palamiseen. (11, s. 61, 186.)

4.1 Polttoaineen ominaisuudet

Palamisprosessiin vaikuttavat oleellisesti polttoaineen ominaisuudet. Tärkeimpiä polttoaineen ominaisuuksia palamisprosessin kannalta ovat kemiallinen koostumus, lämpöarvo, kosteus, tuhkapitoisuus ja sen ominaisuudet sekä myös polttoaineen käsittelyyn vaikuttavat ominaisuudet, esimerkiksi palakoko. (12, s. 23.) Taulukossa 2 on esitetty kiinteiden polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia.

TAULUKKO 2. Polttoaineiden ominaisuuksia (13, s. 27)

Ominaisuus	Hake	Kuori	Puru	Jyrsinturve	Kivihilli
Kosteus, %	45 - 55	50 - 60	50 - 60	45 - 55	10
Tuhka, % (d)	0,5 - 2	1 - 3	0,5 - 1	6	14
Haihtuvat aineet, % (d)	80 - 90	70 - 80	70 - 80	65 - 70	30
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (d)	19 - 20	19 - 20	19 - 20	20 - 21	29
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (ar)	7 - 10	6 - 9	6 - 9	8 - 10	26
Hiili, % (d)	52	55	50	54	72
Vety, % (d)	6,0	6,0	6,0	5,5	4,5
Typpi, % (d)	<0,5	<0,5	<0,5	1,7	1,0
Rikki, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	<1,0
Happi, % (d)	40	37	43	33	8
Kloori, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1

Kiinteät polttoaineet koostuvat palavasta aineesta, tuhkaa muodostavasta epäorgaanisesta aineesta ja vedestä. Näistä tuhka ja vesi ovat polttoaineen laatua heikentäviä tekijöitä. Palava aines koostuu hiilestä (C), vedystä (H) ja rikistä (S). Lisäksi palamisreaktioissa ovat mukana polttoaineen typpi (N) ja happi (O). Palamisessa vapautuvan energian kannalta tärkeimmät komponentit ovat hiili ja vety. Rikki ja typpi aiheuttavat haitallisia palamistuotteita. (10, s. 77; 11, s. 124.)

Polttoaineen tuhka on epäorgaanisen aineen massaa, joka jää palamisjäänökseksi. Tuhkan alkuainekoostumuksen avulla voidaan arvioida tuhkan sulamis- ja kuonaantumiskäyttämistä. Tuhkan sisältämät komponentit yhdessä vaikuttavan lämpötilan kanssa voivat aiheuttaa ongelmia polttojärjestelmässä. (1, s. 41–42; 11, s. 122.)

Polttoaineen lämpöarvo ilmoittaa täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpömäärän polttoaineen massa- tai tilavuusyksikköä kohden. Se voidaan ilmoittaa joko tehollisena tai ylempänä lämpöarvona. Ylemmällä lämpöarvolla tarkoitetaan kuivan polttoaineen lämpöarvoa. Tehollisessa eli alemmassa lämpöarvossa on polttoaineen sisältämän veden höyrystämiseen kuluva energia otettu huomioon. Polttoaineen sisältämä kosteus vaikuttaa suoraan polttoaineen palamisessa saatavaan tehoon. (1, s. 39, 43; 10, s. 76; 11, s. 121–123; 12, s. 12.) Kun polttoaineen eri komponenttien paino-osuudet ovat tiedossa voidaan kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo laskea kaavalla 1. (1, s. 44.)

$$H_{u(kostea)} = \quad \text{KAAVA 1}$$

$$34,8 \times m_C + 93,8 \times m_H + 10,5 \times m_S + 6,3m_N - 10,8 \times m_O - l_{25} \times m_{H_2O}$$

$H_{u(kostea)}$ = kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

m_x = komponentin määrä kuivassa polttoaineessa (kg/kgpa)

l_{25} = veden höyrystymislämpö lämpötilassa (T=25°C, 2443 kJ/kg)

4.2 Palamisreaktiot

Polttoaineissa palavien komponenttien reaktiot hapen kanssa on oleellista tuntea, kun halutaan selvittää palamisessa tarvittava ilman määrä. Polttoaineen komponenttien ja niiden

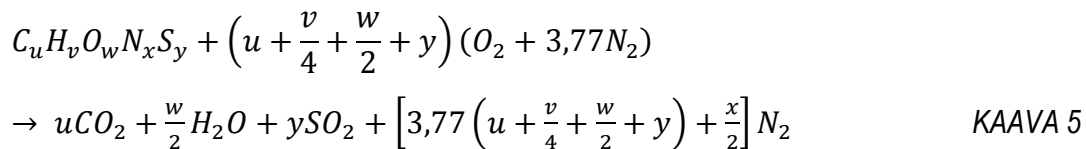
palamisreaktioiden avulla voidaan myös määrittää palamisesta syntyvien savukaasujen määrää ja koostumusta. Palamisessa syntyvien savukaasujen perusteella voidaan päätellä polttoaineen ja palamisilman suhdetta ja palamisen täydellisyyttä. (1, s. 83; 10, s. 77.)

Palamisen monimuotoisia ketjureaktioita voidaan yksinkertaistettuna kuvata lähtöaineiden ja lopputuotteiden avulla, täydellisen palamisen nettoreaktiokaavoilla. Alla on esitetty polttoaineen palavien komponenttien nettoreaktiokaavat sekä reaktioissa vapautuvat energiat. Hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia (kaava 2). Reaktiossa vapautuu lämpöä 411 kJ/mol. Vety reagoi hapen kanssa muodostaen vettä (kaava 3). Reaktiossa vapautuu lämpöä 242 kJ/mol. Rikki muuttuu palamisessa lähes täydellisesti rikkidioksidiksi (kaava 4). Reaktiossa vapautuu 9,2 kJ/mol lämpöä. Kaavoista nähdään myös reagoivien aineiden ja lopputuotteiden moolisuhteet. Esimerkiksi hiilen palamisreaktiota kuvaavassa kaavassa yksi mooli hiiltä tarvitsee täydellisesti palaakseen yhden moolin happea ja lopputuotteena syntyy yksi mooli hiilidioksidia. (1, s. 83–84.)



Polttoaineissa on palamiseen vaikuttavia komponentteja, jotka eivät itse pala. Tällaisiksi katsotaan muun muassa polttoaineen sisältämä vesi, happi, typpi ja tuhka. Polttoaineen sisältämä happi vähentää palamisessa tarvittavaa hapen määrää. Polttoaineen sisältämä tuhka ja vesi heikentävät polttoaineesta saatavaa tehoa. Lisäksi tuhka likaa kattilan lämpöpintoja ja heikentää myös sitä kautta lämmönsiirtoa. Eräät tuhkan komponentit voivat toimia myös palamisreaktioiden katalyytteinä. Polttoaineen typpi muodostaa palamisessa ympäristölle haitallisia yhdisteitä. (1, s. 84.)

Polttoaineen palamista voidaan kuvata yleisellä palamisreaktion yhtälöllä (kaava 5). Yhdistelmäreaktio voidaan kirjoittaa palamisen nettoreaktioiden avulla, kun tiedetään palamisprosessin lähtöaineet ja niiden palamisreaktiot. Kaavassa on esitetty polttoaineen sisältämät palamiseen vaikuttavat alkuaineet hiili (C), vety (H), happi (O), typpi (N) ja rikki (S) ja niiden palamisreaktioiden kautta muodostuneet lopputuotteet, kun happi otetaan palamiseen ilmasta. Moolimäärät saadaan muutettua massoiksi aineiden moolimassojen avulla. (11, s. 40.)



4.3 Palamisilmantarve

Palamisessa tarvittava happi tuodaan prosessiin yleensä ilman mukana. Kuiva ilma sisältää 20,95 % happea, 78,08 % typpeä sekä 0,93 % argonia, ja loppu koostuu muun muassa hiilidioksidista. Palamisessa tarvittavaa ilmamäärää määriteltäessä luetaan ilman muut palamattomat aineet yleensä typeksi. Ilman koostumuksena käytetään siis 21 % happea ja 79 % typpeä. (1, s. 85; 11, s. 35.)

Tärkein tekijä palamisen hyötysuhteen kannalta on oikea ilmamäärä suhteessa polttoaineen määrään. Ilmaa on oltava riittävästi polttoaineen palavan aineksen täydellisen palamisen mahdollistamiseksi. Ylimääräistä ilmaa on kuitenkin oltava mahdollisimman vähän, jotta savukaasuhäviöt olisivat mahdollisimman alhaiset. (1, s. 108; 10, s. 38; 9.)

Polttoaineen palamisessa tarvittava ilmamäärä määritellään yleensä polttoainekiloa kohden. Ilmamäärä lasketaan polttoaineen sisältämien komponenttien ja palamisilman hapen välisten reaktioyhtälöiden avulla. Täydellisessä palamisessa tietty polttoaineen komponentti tarvitsee palaakseen tietyn määrän happea. Laskettaessa yhteen kaikkien polttoaineen sisältämien palavien komponenttien palamisessa tarvitsema hapen määrä ja vähennettäessä tästä summasta polttoaineen sisältämä happi saadaan polttoaineen täydellisessä palamisessa tarvittava happimäärä. (1, s. 84–85.)

Tässä tapauksessa ilman ja sen sisältämän hapen voidaan olettaa noudattavan ideaalikaasumallia. Ideaalikaasun moolitilavuus NTP-olosuhteissa on 22,41 m³/kmol. NTP-olosuhteilla (normal temperature and pressure) tarkoitetaan standardiolosuhteita 0 °C:n lämpötilaa ja 1 bar:n painetta. Polttoaineen teoreettinen täydellisessä palamisessa tarvitsema hapen määrä voidaan laskea kaavalla 6. (10, s. 77.)

$$O_{2(teor)} = 22,41 \times \left(\frac{W_C}{12} + 0,5 \times \frac{W_{H_2}}{2} + \frac{W_S}{32} - \frac{W_{O_2}}{32}\right) \quad \text{KAAVA 6}$$

$O_{2(teor)}$ = palamisessa tarvittava teoreettinen hapen määrä polttoainekiloa kohden (Nm^3/kgpa)

W_x = polttoaineen sisältämän komponentin suhteellinen määrä polttoaineessa (kg/kgpa)

Jakoviivojen alla olevat luvut ovat kunkin komponentin molekyylipaino (kg/kmol)

Kun tiedetään ilman koostumus ja sen sisältämä hapen määrä, saadaan laskettua palamisessa tarvittava teoreettinen ilmamäärä kaavalla 7. (1, s. 85; 10, s. 78.)

$$V_{i(teor)} = \frac{O_{2(teor)}}{0,21} \quad \text{KAAVA 7}$$

$V_{i(teor)}$ = palamisessa tarvittava teoreettinen ilmamäärä polttoainekiloa kohden (Nm^3/kgpa)

$O_{2(teor)}$ = palamisessa tarvittava teoreettinen hapen määrä polttoainekiloa kohden (Nm^3/kgpa)

Palamisessa käytetty ilma ei yleensä ole kuivaa, vaan se sisältää jonkin verran kosteutta. Kylläisen ilman lämpötilan ollessa $0\text{ }^\circ\text{C}$ sisältää yksi kilogramma ilmaa $0,0035\text{ kg}$ vettä. Ilman suhteellinen kosteus on yleensä $40\text{--}60\%$. Ilman sisältämä kosteus lisää palamisilman määrää normaali olosuhteissa noin $0,1\text{--}1\%$. Palamisilman kosteus on otettava huomioon, jos halutaan määrittellä täydellisen palamisen tarvitsema teoreettinen ilmamäärä tarkasti. Käytännössä tämä voidaan yleensä jättää kuitenkin huomiotta. (1, s. 86.)

Todellisuudessa polttoaineen palamiseen tarvitaan teoreettista ilmamäärää enemmän ilmaa. Todellisen palamisessa tarvittavan ilmamäärän ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta kuvataan ilmakertoimella. Palamisessa tarvittava todellinen ilmamäärä voidaan laskea kaavalla 8. (1, s. 86.)

$$V_{i(tod)} = V_{i(teor)} \times \lambda \quad \text{KAAVA 8}$$

$V_{i(tod)}$ = todellinen palamisessa tarvittava ilmamäärä

$V_{i(teor)}$ = teoreettinen palamisessa tarvittava ilmamäärä

λ = polton ilmakerroin

Kiinteät polttoaineet tarvitsevat suuremman ilmakertoimen kuin kaasumaiset helpommin palavat polttoaineet. (1, s. 86.) Taulukossa 3 on esitetty eri polttoaineille käytettäviä polton ilmakertoimia voimalaitoskattiloissa.

TAULUKKO 3. Voimalaitoskattiloiden ilmakertoimia (1, s. 86)

Polttoaine	λ
Kaasu	1,02 - 1,10
Raskasöljy	1,03 - 1,10
Jätelipeä	1,10 - 1,25
Hiili	1,15 - 1,35
Turve (kosteus 50%)	1,15 - 1,35
Puujäte (Kosteus 50%)	1,15 - 1,50

4.4 Palamisessa syntyviä päästöjä

Palamisessa läsnäolevien aineiden, tapahtuvien reaktioiden ja palamisolosuhteiden seurauksena syntyy lukuisia erilaisia päästökomponentteja. Palamisilman mukana oleva argon ja yli-ilmaisessa palamisessa ylimääräinen happi siirtyvät niin ikään savukaasuihin. Palamisilmasta peräisin olevaa palamisreaktioihin osallistumatonta molekyylylityppeä, happea ja argonia sekä palamistuotteista vettä ei pidetä ympäristölle haitallisina päästöinä. Tavanomaisimpia savukaasujen sisältämiä päästöjä ovat hiilidioksidi, hiilimonoksidi, rikkioksidi- ja typpioksidiyhdisteet. Näiden lisäksi syntyy muun muassa erilaisia hiilivetyjä C_xH_y ja hiukkaspäästöjä. (1, s. 91.)

Päästöt aiheuttavat haittaa ympäristölle ja terveydelle. Tämän vuoksi polttolaitoksissa pyritään minimoimaan syntyviä päästöjä. Syntyviin päästöihin vaikuttavat luonnollisesti käytettävän polttoaineen ominaisuudet. Palamisprosessissa syntyviin päästöihin voidaan vaikuttaa primäärisillä ja sekundäärisillä menetelmillä. Primääriset menetelmät ovat polttoteknisiä menetelmiä, joilla vaikutetaan suoraan palamistapahtumaan. Savukaasuja puhdistavia sekundäärisiä menetelmiä ovat esimerkiksi sähkösuodattimet ja savukaasupesurit. (10, s. 47; 11, s. 60; 15, s. 6.) Päästöjä ja niistä aiheutuvia haittoja pyritään vähentämään lainsäädännöllä ja viranomaismääräyksillä (4).

4.4.1 Hiilidioksidi CO₂

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, jota syntyy aina poltettaessa hiiltä sisältäviä polttoaineita. Syntyviin hiilidioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa käytettävän polttoaineen valinnalla (3, s. 94). Hiilidioksidipäästöjen katsotaan aiheutuvat fossiilisten polttoaineiden poltosta. Biomassat sitovat hiilidioksidia kasvaessaan, ja niiden poltosta vapautuva hiilidioksidin määrä on saman suuruinen kuin mitä se olisi biomassan hajotessa luonnossa. Tämän vuoksi biopolttoaineita pidetään päästöjen suhteen hiilidioksidineutraaleina polttoaineina. (5.)

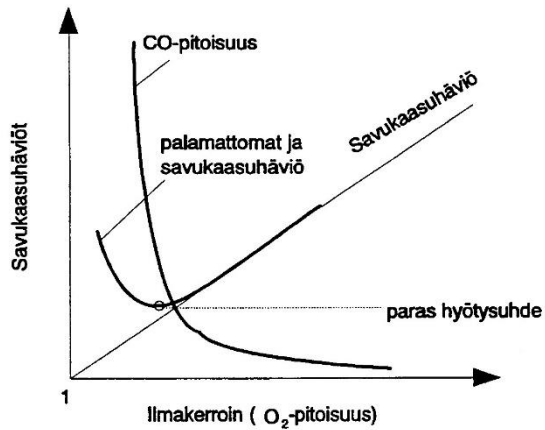
4.4.2 Hiilimonoksidi CO

Hiilimonoksidia syntyy, kun hiilen täydelliseen palamiseen hiilidioksidiksi ei ole riittävästi happea. Hiili reagoi hapen kanssa kaavan 9 mukaisesti muodostaen hiilidioksidin sijaan hiilimonoksidia eli häkää. Hiilen epätäydellinen palaminen tuottaa vain neljänneksen täydellisessä palamisreaktiossa vapautuvasta energiasta. (1, s. 91.)



Hiilimonoksidia syntyy, jos palamisprosessissa on ali-ilmaiset olosuhteet, jotka johtavat epätäydelliseen palamiseen. Hiilimonoksidipäästöjen muodostumista voidaan hillitä lisäämällä polttoprosessissa käytettävää palamisilman määrää. Yli-ilmamäärä lisää palamisprosessiin osallistumatonta ilmaa. Palamisprosessiin osallistumaton ilma virtaa kattilan läpi jäähdyttäen lämpöpintoja ja lisäten savukaasujen määrää. Tämä aiheuttaa kattilan savukaasuhäviöitä ja heikentää hyötysuhdetta. Kiinteiden polttoaineiden poltossa ilman ja polttoaineen sekoittuminen ei ole koskaan täydellistä, joten palamisessa muodostuu yleensä aina jonkin verran hiilimonoksidia. Hyvin toimivan kattilalaitoksen savukaasujen hiilimonoksidipitoisuudet ovat 30–100 ppm. (1, s. 10.)

Savukaasujen hiilimonoksidipitoisuus nousee jyrkästi, jos palamiseen käytettävissä olevan ilman määrä laskee. Hiilimonoksidipitoisuuden ja ilmakertoimen avulla voidaan optimoida palamisprosessissa syntyviä häviöitä. (1, s. 91.) Kuvassa 9 on esitetty palamisprosessissa syntyvien häviöiden optimointia hiilimonoksidipitoisuuden avulla.

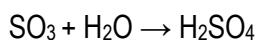


KUVA 9. Palamisen optimointi CO-pitoisuuden avulla (1, s. 91)

4.4.3 Rikin oksidit SO_x

Rikin oksideja, rikkidioksidia SO₂ ja rikkiatrioksidia SO₃ syntyy, kun poltetaan rikkiä sisältäviä polttoaineita. Ympäristövaikutuksiltaan rikkidioksidi ja rikkiatrioksidi ovat samankaltaisia, koska rikkidioksidi hapettuu myös lopulta ilmakehässä rikkiatrioksidiksi. Rikkiatrioksidi muodostaa veden kanssa reagoidessaan rikkihappoa aiheuttaen ympäristöön hapan laskeumaa. Rikkiatrioksidipitoisuudella on myös merkitystä kattilan käytön kannalta, koska se voi aiheuttaa korroosiota. (11, s. 345–346.)

Suurin osa polttoaineen rikistä vapautuu polttotilaan ja pieniä määriä voi sitoutua tuhkaan. Rikki reagoi kaavan 4 mukaisesti rikkidioksidiksi SO₂. Pieni osa rikkidioksidista reagoi edelleen rikkiatrioksidiksi SO₃. Rikkiatrioksidia muodostaa muutama prosentti polttoaineen rikistä. Rikkiatrioksidi muodostaa kaavan 10 mukaisesti rikkihappoa H₂SO₄ reagoidessaan veden kanssa. (1, s. 92; 11, s. 346–348.)

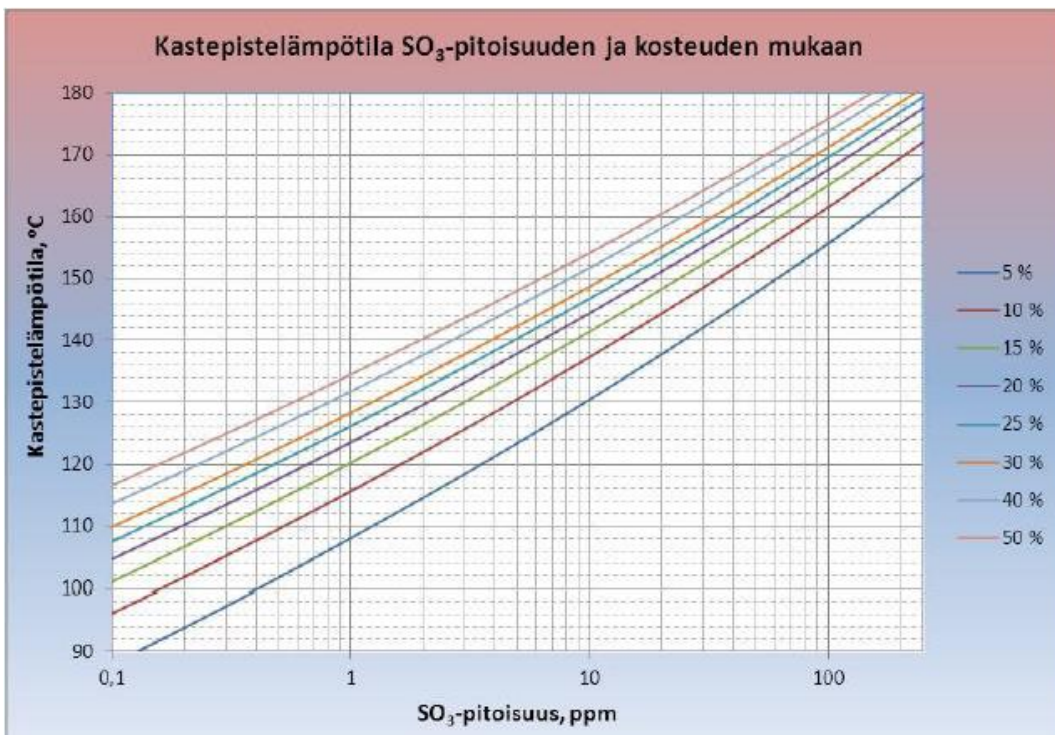


KAAVA 10

Rikkiatrioksidia muodostuu pääasiassa termisesti yli 1100 °C lämpötiloissa ja katalyyttisesti matalissa 500–800 °C lämpötiloissa. Korkeissa lämpötiloissa rikkidioksidi voi reagoida hapen kanssa kolmemolekyylisessä reaktiossa. Matalissa lämpötiloissa rikkiatrioksidin muodostuminen keskittyy tulistinvyöhykkeelle, missä tulistinputkien kerrostumat toimivat katalyyttinä ja vallitseva lämpötila on reaktiolle sopiva. (11, s. 347.) Rikkihapon muodostumiseen vaikuttavat vallitseva

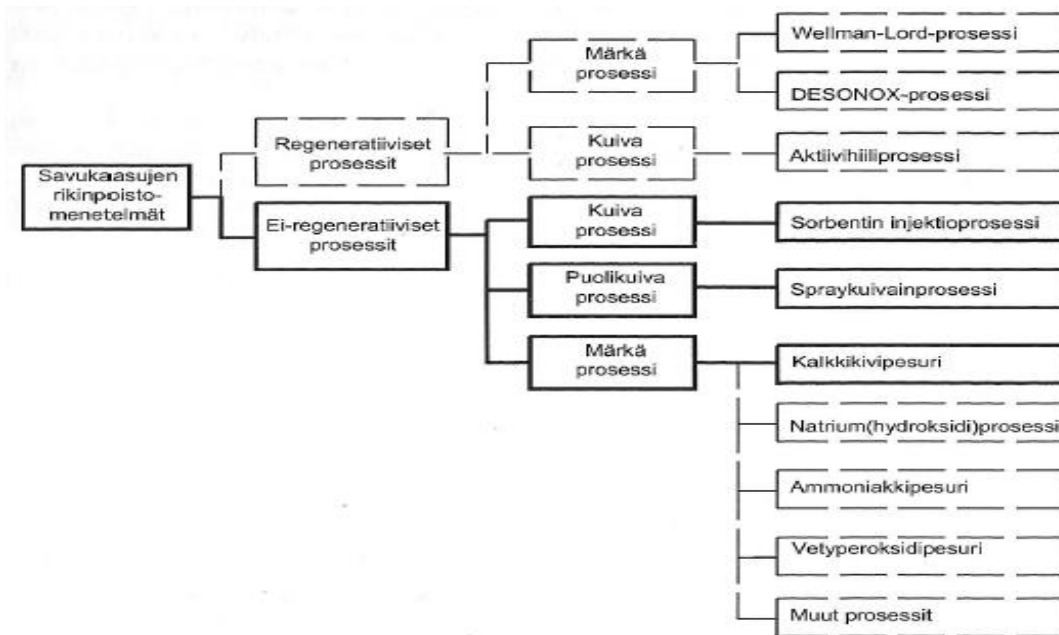
lämpötila ja veden sekä rikkiatrioksidin määrä savukaasuissa. Rikkiatrioksidin läsnäollessa vesihöyry tiivistyy vesikastepistettä korkeammassa lämpötilassa. (1, s. 99; 11, s. 347.)

Mitä enemmän savukaasuissa on rikkiatrioksidia ja vesihöyryä, sitä korkeammassa lämpötilassa ne tiivistyvät rikkihapoksi. Rikkihapon aiheuttamaa korroosiota pyritään estämään pitämällä savukaasujen lämpötila happokastepistettä korkeampana. (1, s. 92; 11 s. 348.) Kuvassa 10 on esitetty rikkihapon kastepistelämpötila savukaasun rikkiatrioksidipitoisuuden ja kosteuden mukaan. Käyrät on piirretty eri vesihöyryn tilavuusosuuksille savukaasuissa. Käytännössä ei tiedetä, kuinka paljon rikkidioksidista reagoi rikkiatrioksidiksi, joten happokastepisteen tarkka määrittäminen on vaikeaa. Korroosion välttämiseksi kattilan kylmemmissä osissa kuten ilmanesilämmittimessä on varmistuttava, ettei happokastepiste alitu missään vaiheessa. (1, s. 100.)



KUVA 10. Rikkihapon kastepistelämpötila (14)

Polttaessa rikkiä sisältäviä polttoaineita ei rikkidioksidin syntymistä voida estää polttoteknisin keinoin. Savukaasujen SO_x-päästöjä voidaan kuitenkin vähentää sekundäärisillä menetelmillä. Sekundäärisiä rikinpoistomenetelmiä on esitetty kuvassa 11.

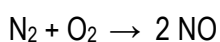


KUVA 11. SO_x-päästöjen vähennystekniikat (10, s. 47)

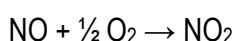
Eri polttomenetelmille ja polttoaineille on käytettävissä erilaisia rikinpoistomenetelmiä. Leijukerrospoltoissa rikkipäästöjä voidaan vähentää esimerkiksi sorbentin injektioprosessilla eli syöttämällä tulipesään kalkkia. Kalkki reagoi rikkidioksidin kanssa kalsiumsulfaatiksi, ja se voidaan poistaa tuhkan mukana. (10, s. 45–47.)

4.4.4 Typen oksidit NO_x

Palamisprosessissa syntyy typen ja hapen reaktioista haitallisia typpiyhdisteitä. Tärkeimmät muodostuvat typen oksidit ovat typpimonoksidi NO ja typpidioksidi NO₂. Typpipäästöjä ei yleensä eritellä, vaan niistä käytetään yhteisnimitystä NO_x-päästöt. Yleensä savukaasujen NO_x-päästöistä noin 95 % on typpimonoksidia ja noin 5 % typpidioksidia. (11, s. 300; 15, s. 5.) Typen ja hapen välistä reaktiota typen oksidien muodostumiseen voidaan yksinkertaistettuna kuvata nettoreaktiokaavoilla 11 ja 12. (1, s. 92–93.)



KAAVA 11



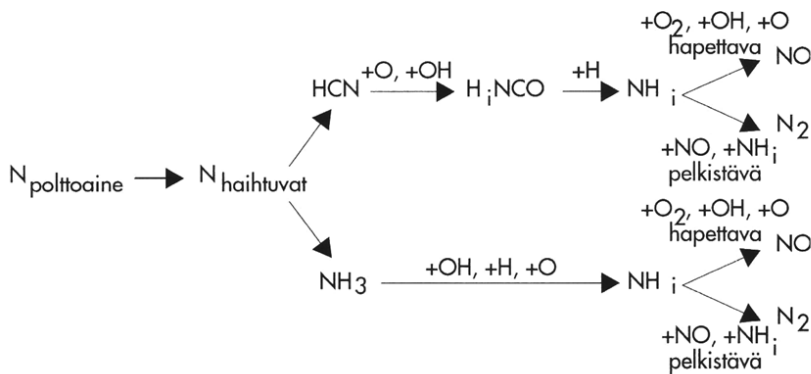
KAAVA 12

Tulipesässä polttoaineesta tai palamisilmasta peräisin oleva typpi reagoi hapen kanssa muodostaen typpimonoksidia, joka lämpötilan laskiessa pyrkii reagoimaan hapen kanssa typpidioksidiksi. Typen oksidien syntymiseen on kolme pääasiallista mekanismia. Nämä ovat

terminen (thermal) NO_x, nopea (prompt) NO_x ja polttoaine (fuel) NO_x. (1, s. 93; 11, s. 304–308; 15, s. 5–6.)

Terminen NO_x muodostuu reaktioketjun kautta palamisilman molekyylylyydestä ja hapesta korkeissa 1400–1600 °C lämpötiloissa. Nopea NO_x muodostuu polttovyöhykkeellä reaktioketjun kautta palamisilman molekyylylyydestä ja hapesta. Nopea NO_x syntyy liekinosassa, joka sisältää runsaasti hiilivetyradikaaleja. Polttoaine NO_x muodostuu polttoaineen typen reaktiosta palamisilman hapen kanssa. (1, s. 93; 11, s. 304–305; 15, s. 5–6.)

Palamisilman sisältämä typen määrä on paljon suurempi verrattuna polttoaineen sisältämään typeen. Polttoaineen tyyppi on kuitenkin paljon reaktiivisempaa verrattuna ilman sisältämään molekyylylyyteen. Tyypeä sisältävien polttoaineiden NO_x-päästöt ovat selvästi korkeammat kuin typpöttömien polttoaineiden. Tyypeä sisältävän polttoaineen pyrolyysissä osa typestä vapautuu muodostaen pienimolekyylisiä kaasumaisia yhdisteitä. Tällaisia yhdisteitä ovat muun muassa syaanivety HCN ja ammoniakki NH₃. Nämä yhdisteet reagoivat hapen kanssa typpimonoksidiksi alhaisemmissakin lämpötiloissa. Alihappisissa olosuhteissa yhdisteet reagoivat typpimonoksidin sijasta molekyylylyypeksi. (11, s. 308.)

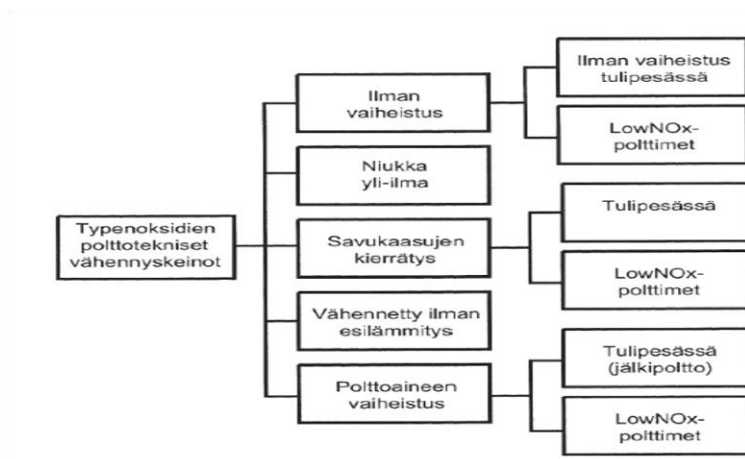


KUVA 12. Yksinkertaistettu polttoaineen typen reaktio typpimonoksidiksi ja molekyylylyypeksi (11, s. 310)

4.4.5 NO_x-päästöjen hallinta leijupoltossa

Leijupolton NO_x-päästöihin tärkeimmät vaikuttavat tekijät ovat polttoaine, lämpötila ja ilmakerroin. NO_x-päästöt kasvavat lämpötilan ja ilmakertoimen kasvaessa (11, s. 326). Niukka yli-ilma pienentää NO_x:n muodostumista (15, s. 6). Termisen NO_x:n muodostus on merkityksetöntä, jos lämpötila on alle 1400 °C (11, s. 305). Leijupetikattiloiden suhteellisen matalan palamislämpötilan

vuoksi termisen NO_x:n muodostuminen ei ole ongelma. Myös nopean NO_x:n muodostus on vähäistä leijupoltossa. Leijupolton NO_x-päästöt aiheutuvat siis suurimmaksi osaksi polttoaineen sisältämästä typestä. Polttoaineen tyyppitoisuuden lisäksi myös haihtuvien aineiden määrä ja typhen sidokset polttoaineessa vaikuttavat NO_x:n muodostumiseen. Primäärimenetelmiä NO_x-päästöjen vähentämiseksi leijukattiloissa ovat vähätyppisten polttoaineiden käyttö, peti- ja tulipesän lämpötilan lasku, ilmajako ja yli-ilmamäärän vähentäminen. (15, s. 6 – 7.)



KUVA 13. Primäärimenetelmiä NO_x-päästöjen vähentämiseksi (10, s. 48)

Sekundäärisiä menetelmiä NO_x-päästöjen vähentämiseksi ovat SCR (Selective Catalytic Reduction) ja SNCR (Selective Non Catalytic Reduction). Molemmat menetelmät perustuvat ammoniakkin tai urean reagointiin typhen oksidien kanssa. Typhen oksidien reaktiossa ammoniakki tai urea kanssa muodostuu molekyylytipeä ja vettä. Katalyyttisessä menetelmässä ammoniakki tai urea ruiskutetaan savukaasuihin ja reaktiot tapahtuvat savukaasukanavaan sijoitetussa katalyyttielementeistä koostuvassa reaktorissa. Katalyyttitönnässä menetelmässä ammoniakki tai urea ruiskutetaan tulipesään, jossa reaktiot tapahtuvat. (10, s. 48; 15, s. 16, 20.)

5 KATTILA K3

5.1 Kattilan perustiedot

Oulun Voima Oy:n kattila K3 on Kvaerner Pulping Oy:n valmistama leijukerroskattila. Kattila K3 on rakennettu paperikone 7:n myötä kasvaneeseen höyryntarpeeseen ja se on otettu käyttöön vuonna 1997. Kattila K3 on rakenteeltaan ylhäältä kannatettu luonnonkiertokattila. K3:n nimellishöyrykuorma on leijupoltolla 95 kg/s ja sitä vastaava nettolämpöteho on 246,2 MW. Kattilan tuorehöyryn arvot ovat 90 bar ja 525 °C. Kattilassa voidaan polttaa erilaisia kiinteitä polttoaineita. Kattilan pääpolttoaineina käytetään turvetta ja kuorta. (7; 16.) Liitteessä 1 on esitetty K3-kattilan sivukuva.

Leijupedin petimateriaalina käytetään seulottua luonnonhiekkaa. Petihiekan keskimääräinen raekokoko on noin 0,8 mm. Kiinteä polttoaine syötetään kattilaan KPA-siiloista kahdelta puolelta kattilaa. Pudotustorvia on molemmilla puolilla kolme. Palamiseen tarvittava ilma otetaan kattilahuoneesta ja ulkoa. Pohjatuuhkaa ja karkeaa-ainesta poistetaan tulipesän alapuolelta pudotustorvien ja pohjatuuhkaruuvien avulla. Savukaasujen sisältämät kiintoaineet kerätään kolmekenttäisellä sähkösuodattimella. Sähkösuodattimesta savukaasut ohjataan savukaasupuhaltimien avulla omaan piippuun. Kattilan savukaasupäästöjä seurataan piipusta jatkuvatoimisilla mittauksilla. (16; 17.)

Kattilan syöttövesi valmistetaan voimalaitoksen omalla vesilaitoksella ja se syötetään syöttövesisäiliöstä kierroslukusäätöisellä syöttövesipumpulla. Syöttövesi johdetaan korkeapaine-esilämmittimien läpi ekonomaiseriin. Kattilan ekonomaiseri on höyrystävä ja siinä on neljä sarjaan kytkettyä vaihetta. Ensimmäinen ja toinen ekopaketti ovat ripaputkirakenteisia ja kolmas sekä neljäs sileäputkirakenteisia. Ekosta syöttövesi johdetaan lieriöön, josta se kiertää höyrystymien kautta luonnonkierron periaatteella. Kattilassa on tulipesän ympärillä olevan höyrystinputkiston lisäksi erillinen omassa kierrossa oleva lisäkeittopinta. Höyryn tulistaminen tapahtuu kolmessa vaiheessa primääri-, sekundääri- ja tertiääritulistimissa. (16.) Tulistettu höyry voidaan ajaa turbiiniin 6 tai johtaa reduktion kautta soodakattilan paineessa olevaan turbiiniin 5.

K3-kattilan tuorehöyryn paine pidetään vakiona polttotehoa ohjaamalla. Tehtaan höyryverkossa on paljon höyrynkuluttajia, ja kulutuskohteiden höyryntarpeessa voi tulla äkillisiäkin muutoksia. Höyrynkulutuksen muutosten aiheuttamaa paineenvaihtelua vastapaineverkossa tasataan höyryakulla. Normaalitilanteessa soodakattilalla ajetaan peruskuormaa ja kattila K3 toimii höyryverkkoa säättävänä kattilana. K3 seuraa höyryakun paineessa tapahtuvia muutoksia ja säättää höyrytehoaan akun paineen perusteella. Kattilaan syötettävä polttoaineen ja palamisilman määrä säätyy tehon mukaisesti. K3-kattilan toiminta on pitkälle automatisoitua ja kattilaa ohjaavana automaatiojärjestelmänä on Honeywell Alcont 3000. (17.)

Vuonna 2015 K3:n keskimääräinen höyrykuorma oli noin 44 kg/s. Koska K3 toimii säättävänä kattilana, on kuorman vaihtelu laajaa. Normaalisti kattilan kuorma vaihtelee välillä 27–75 kg/s. Luonnollisesti yleensä suurimmat kuormat ajoittuvat talven kylmimmille jaksoille ja kesäaikana ajetaan minimikuormaa.

5.2 Polttoaineet

K3-kattilan polttoaineina käytetään lähialueilta tuotavaa jyrshinturvetta ja puupolttoaineita. Puupolttoaine sisältää pääasiassa sellutehtaan kuorimolta saatavaa havupuiden kuorta. Kuoren seassa on myös kuorimon seulontajätettä ja veden puhdistamolla syntyvää lietettä. Puupolttoaineena käytetään myös lähialueilta tuotavaa metsä- ja sahaketta, sahanpurua sekä puuntyöstöjätettä. Kattilassa poltetaan myös tehdasalueelta kerättyä polttokelpoista puujätettä. Puujäte on murskattua ja sen palakoko (sivu+sivu+sivu) on maksimissaan 300 mm. Kuorisuikaleet voivat olla pidempiä, mutta vain yhden sivun pituus voi ylittää 50 mm. Kattilan tukipolttoaineena käytetään pääasiassa mäntypikiölyjä. Kuorma- ja petipolttimilla voidaan tarvittaessa polttaa myös raskasta ja kevyttä polttoöljyä. (16.)

Polttoaine siirretään välivarastoista, kuorikentältä ja turvesiilosta kuljettimilla kattilan KPA-siiloihin. Bioliete, puru, metsä- ja sahakke sekoittuvat kuoren sekaan ja tehdasalueen keräilyjäte sekoittuu turpeen sekaan. Keskimääräinen puun ja turpeen suhde poltossa on 50/50. Turpeen suhteellinen osuus lisääntyy yleensä hieman talven lämmityskaudella. Vuoden 2015 keskimääräinen puun osuus polttoaineessa oli noin 49 %. Kattilassa käytetyn kiinteän polttoaineen tehollinen lämpöarvo on keskimäärin noin 8,5 MJ/kg.

5.2.1 Turve

Turve muodostuu biomassojen maatuessa kosteissa ja hapettomissa olosuhteissa. Turpeen ominaisuudet vaihtelevat kasvilajien ja maatuneisuusasteen mukaan. Turpeet voidaankin luokitella niiden kasvilajikoostumuksen mukaan rahka-, sara-, ja ruskosammalturpeisiin. Usein turve kuitenkin muodostuu useammasta kasvilajista. Maatuneisuusasteen perusteella turpeet jaetaan H-luokkiin. H1-luokka on täysin maatumatonta kasviainesta ja H10-luokka tarkoittaa täysin maatunutta turvetta. Pitkälle maatuneen turpeen energiasisältö on parempi kuin heikommin maatuneen. (12, s. 87.)

Suomessa on noin 9 miljoonaa hehtaaria turvemaita. Turpeen tuotantoon soveltuvia riittävän paksuturpeisia ja tarpeeksi laajoja soita arvioidaan olevan noin 1,4 miljoonaa hehtaaria. (4.) Suomen turvemaista turvetuotannon piirissä on noin 1 %. Polttolaitoksissa käytetään pääasiassa jyrshinturvetta, jonka osuus energiaturpeen tuotannosta on yli 90 %. (1, s. 31; 12, s. 84–85.)

Turve ei ole fossiilinen polttoaine, vaan se määritellään Suomessa hitaasti uusiutuvaksi biomassaksi. Turpeen uusiutuminen kestää noin 2000–3000 vuotta. Turpeen hitaan uusiutumisen vuoksi se luokitellaan ilmasto- ja energiapolitiikassa fossiiliseksi polttoaineeksi. (4.)

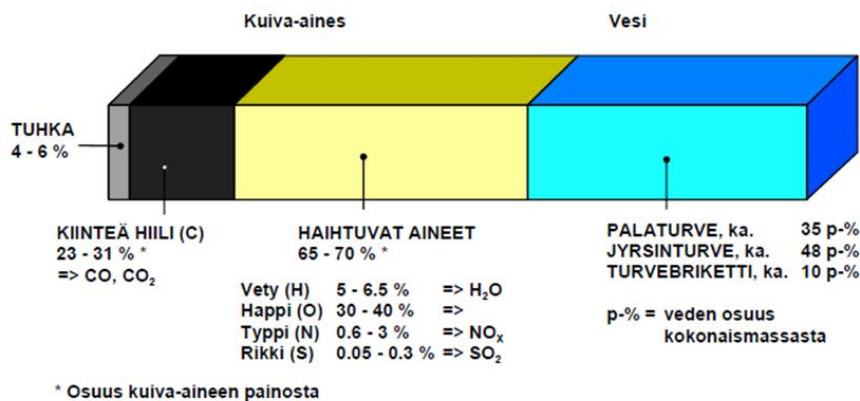
Turve on tyypillinen pääpolttoaine sisämaan lämmitysvoimalaitoksissa ja useissa teollisuudenvoimalaitoksissa. Myös puupolttoainetta pääpolttoaineena käyttävissä monipolttokattiloissa käytetään usein turvetta täydentämään puupolttoaineiden käyttöä, tasaamaan puupolttoaineen laadussa ja saatavuudessa mahdollisesti olevia vaihteluja. Kylmimpinä aikoina turpeella voidaan varmistaa riittävä lämmöntuotanto. (4; 18.)

Puu ja turve sopivat hyvin seospolttoon leijupetikattiloissa. Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi yhteispoltossa palaminen on puhtaampaa ja parantaa kattilan toimintaa. Puupolttoaineet sitovat turpeen sisältämää rikkiä ja turve sitoo puupolttoaineiden sisältämää klooria. Seospoltto vähentää lämmönsiirtopinnoille syntyviä korrodoivia kerrostumia ja myös nuohouksen tarve kattilassa vähenee. (18.)

Turpeen poltosta syntyy hiilidioksidia, rikkidioksidia, typen oksideja, pölymäistä tuhkaa ja siihen sitoutuneita raskasmetalleja. Päästöt ovat kivihiilen poltosta syntyviin päästöihin verrattuna pienemmät mutta suuremmat kuin puupolttoaineiden poltosta. Turpeen poltossa syntyvien

verrattain korkeiden hiilidioksidipäästöjen ja siten päästökaupan aiheuttaman kilpailukyvyn heikkenemisen vuoksi turvetta käyttävissä laitoksissa on korvattu turvetta lisäämällä metsäenergian osuutta (4.)

Turpeen keskimääräinen koostumus on esitetty kuvassa 14. Jyrsinturpeen ominaisuuksia on esitetty myös luvun 4.1 taulukossa 2. Turpeen hiili- ja tuhkapitoisuus vaihtelee maatumisasteen ja turvelajin mukaan. Turve sisältää haihtuvia aineita noin 65–70 %. Maatuneisuusasteen kasvaessa turpeen hiilipitoisuus, lämpöarvo ja myös tuhkapitoisuus kasvavat. Turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 21,5 MJ/kg. Tyypillisesti jyrsinturpeen kuiva-aineesta yli 50 % on hiiltä. Jyrsinturpeen kosteus vaihtelee 40 ja 55 %:n välillä. Jyrsinturpeen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on 9,6 MJ/kg ja tiheys 341 kg/i-m³. Tuhkapitoisuus vaihtelee 2 ja 10 %:n välillä ja tuhkan pehmenispiste on noin 1100 °C. (12, s. 90–91.)



KUVA 14. Turpeen koostumus (12, s. 88)

Polttoturpeet on jaettu niiden ominaisuuksien mukaan laatuluokkiin. Jyrsinturpeen laatuluokkia on kolme: J6, J8 ja J10. Palaturpeella on myös kolme luokkaa: P10, P12, P13. Luokan numeroarvo kuvaa suoraan luokan turpeesta saatavaa polttotehoa yksikössä MJ/kg. (1, s. 31.)

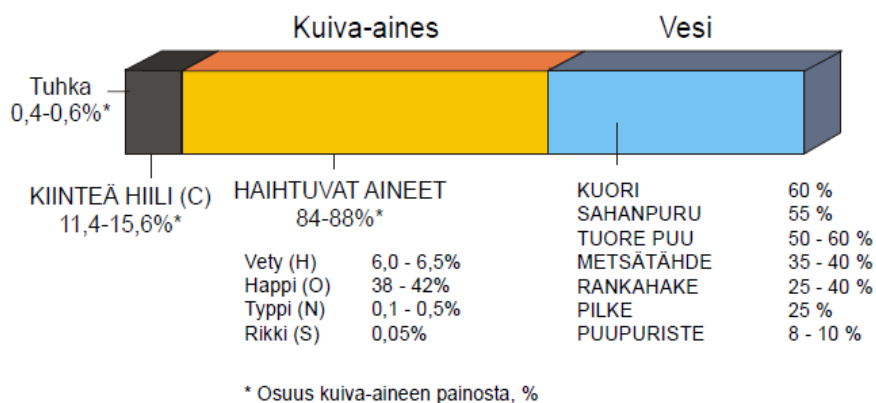
5.2.2 Puupolttoaineet

Puupolttoaineet ovat merkittävin uusiutuva energianlähde Suomessa. Suomessa käytettävästä uusiutuvasta energiasta puun osuus on noin 80 % ja energian kokonaiskulutuksesta 25 % (6). Metsäteollisuudessa käytettävä raakapuu sisältää noin 13–14 % tuotantoon kelpaamatonta kuorta, joka yleensä hyödynnetään energiaksi. (1, s. 29). Sivutuotteena syntyvien energiajakeiden lisäksi käytetään usein polttoaineena myös metsähaketta ja kierrätyspuuta.

Metsähake on yleensä ainespuuksi kelpaamatonta puuta, joka on haketettu energiakäyttöön. Metsähakkeen raaka-aineina käytetään esimerkiksi pieniläpimittaista kokopuuta, karsittua rankaa, raivauspuuta, hakkuualojen latvus- ja oksamassoja tai kantoja. Kierrätyspuu käsittää esimerkiksi purkupuun, joka hyödynnetään energiaksi. (4; 5.) Puupolttoaineita luokitellaan niiden laadun tai alkuperän mukaisesti luokkiin (12. s. 46.)

Puu rakentuu pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Koivun, männyn ja kuusen kuiva-aineesta on selluloosaa 40–45 % ja hemiselluloosaa 25–40 %. Havupuiden hemiselluloosapitoisuus on matalampi, mutta niiden ligniinipitoisuus on korkeampi 24–30 %. Puun mekaaninen lujuus aiheutuu ligniinin puukuituja sitovasta vaikutuksesta. Ligniini sisältää runsaasti hiiltä ja vetyä. Puussa on myös uuteaineita kuten terpeentejä, rasva-aineita ja fenoleja. (12, s. 35.)

Kuvassa 15 on esitetty puun keskimääräinen koostumus ja eri puupolttoaineiden tyypillisiä kosteuksia. Puulajilla, kasvupaikalla, iällä ja sillä, mistä puun osista on kyse, on vaikutusta puun ominaisuuksiin. Puun kuiva-aineen massasta on noin 99 % hiiltä, vetyä ja happea. Puu sisältää suuren määrän haihtuvia aineita. Puun lämpöarvo on pienempi muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna. Puuaineksen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,3–20,0 MJ/kg. Tuoreen puun kosteus on tyypillisesti 40–60 %. Puun tuhkapitoisuus on noin 0,5 %. Kuoren tuhkapitoisuus on muuta puuta suurempi. Puun tuhkan sintraantuminen alkaa 900–1000 °C:n lämpötilassa ja muodonmuutospiste on noin 1150–1490 °C. (12, s. 35–42.)



KUVA 15. Puun koostumus (12, s. 35)

Liitteessä 2 on esitetty eri puupolttoaineiden ominaisuuksia ja liitteessä 3 kosteuden vaikutusta polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Hakkeen, kuoren ja purun ominaisuuksia on esitetty myös luvun 4.1 taulukossa 2. K3-kattilan keskimääräinen puupolttoaineen koostumus on esitetty taulukossa 4. Taulukon 4 arvoissa on mukana myös veden puhdistamon seosliete.

TAULUKKO 4. Biopolttoaineen ominaisuudet (16)

Biopolttoaine	
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	6,5
Kosteus, %	58
Alkuaineanalyysi kuiva-aineesta p-%	
C	50
H2	6,0
N2	0,3
S	0,02
O2	38,6
Tuhka	5,0

Kattilassa käytettävien polttoaineiden keskimääräisillä koostumuksilla laskettuna teoreettisessa palamisessa tarvittava ilmamäärä on turpeelle 2,57 m³/kgpa ja puupolttoaineelle 2,13 m³/kgpa. Tämä vastaa NTP-olosuhteissa 3,31 kg:aa ja 2,74 kg:aa palamisilmaa polttoainekiloa kohden.

5.3 Palamisilmajärjestelmä

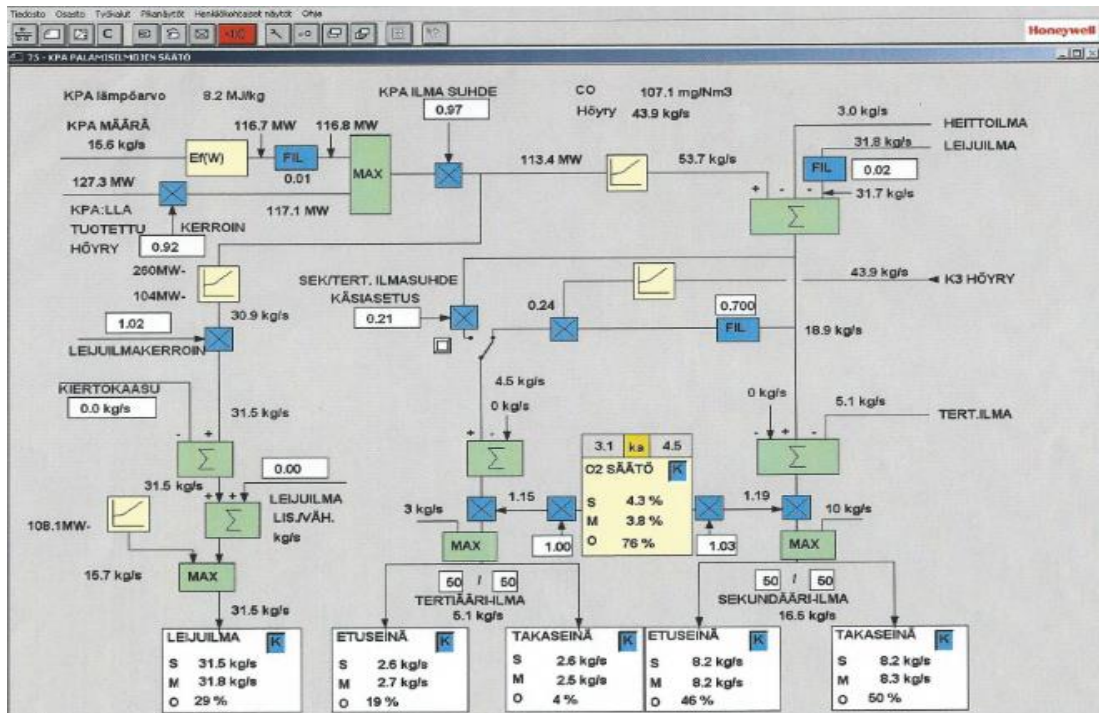
K3-kattilassa palamiseen tarvittava ilma imetään kattilahuoneen yläosasta ja ulkoa. Kattilahuoneesta otetaan lämmintä ilmaa vain kattilan säteilyhäviöitä vastaava määrä ja loppu tarvittavasta ilmamäärästä otetaan ulkoa. Ulkoa otettu ilma lämmitetään glykolikiertoisessa esilämmittimessä. Sisä- ja ulkoilmamäärien suhteisiin vaikuttavat kattilahuoneen alipaine sekä ulkoilman lämpötila. Ulkoa otettu, lämmitetty ilma sekoittuu sisältä otettuun ilmaan ilmakehässä olevien säätöpeltien avulla, joita ohjataan sisältä otetun ilman, kattilahuoneen paineen ja ulkoilman lämpötilan mukaan. Imukanavasta leijuilmapuhallin ja sekundääri-ilmapuhallin puhaltavat ilman esilämmittimen kautta kattilaan. (16; 17.)

Leijuilmapuhaltimella pidetään petihiekka lejuvassa tilassa ja tuodaan osa palamisilmasta hiekkakerrokseen. Leijuilmapuhallin on johtosiipisäätöinen radiaalipuhallin ja sille on säädetty minimitoimintapiste leijutuksen takaamiseksi kaikissa olosuhteissa. Leijuilmaa lämmitetään ennen tulipesään vientiä höyryluvolla ja savukaasulämmitteisellä ilmanesilämmittimellä. Höyryluvossa

voidaan käyttää vaihtoehtoisesti matala- tai välipainehöyryä. Höyryluvoa käytetään materiaaliämpöjen ja savukaasujen loppulämpötilan säätöön. Savukaasuluvoilla siirretään savukaasujen lämpöä takaisin tulipesään ja pidetään savukaasujen lämpötila optimaalisella tasolla. Savukaasuluvon jälkeen ilma jaetaan leijuilmalaatikon kautta leijuarinalle. (16.)

Sekundääri-ilmapuhallin on kierrosnopeussäätöinen radiaalipuhallin, ja sen tehtävä on syöttää ilma etu- ja takaseinien sekundääri- ja tertiärisuuttimille sekä polttimille. Ennen tulipesään syöttöä ilma esilämmitetään höyry- ja savukaasuluvoilla. Tulipesässä tarvittava palamisilman määrä säädetään sekundääri- ja tertiäri-ilmalla. Sekundääri-ilma tuodaan heti pedin yläpuolelle ja tertiäri-ilma ylemmäs, kuormapolttimien yläpuolelle. Sekundääri- ja tertiäri-ilmalle on molemmille suuttimet kattilan etu- ja takaseinillä. Ilman tunkeutuvuutta kattilaan on parannettu vakionopeussuuttimilla. Kuormapolttimilla on poltinkohtainen ilmamäärän säätö, joka on asetettu vastaamaan sille syötetyn polttoaineen määrää. Petipolttimilla on puolestaan poltinkohtainen ilmanpainesäätö. (16.)

Palamisessa tarvittavan ilman laskennan ja säädön periaate on esitetty kuvassa 16.



KUVA 16. Prosessinäyttökuvaa, palamisilmojen laskenta- ja säätökaavio

Palamisessa tarvittavan ilman määrä määritetään kattilaan syötetyn polttoainemäärän ja polttoaineen lämpöarvon kautta lasketun polttoainetehon tai tuotetun höyrytehon mukaan.

Järjestelmä valitsee näistä suuremman ilmantarpeen perustaksi. Pääsääntöisesti kattilaan menevä ilmamäärä määräytyy polttoainetehon mukaan. Höyrytehon arvoa voidaan tarvittaessa muuttaa kertoimen avulla. Kokonaisilmamäärän suhdetta polttoaineen määrään voidaan muuttaa tarvittaessa käsiasetuksella. Kaskadisäädöllä ajettaessa kokonaisilmamäärän ja polttoaineen seossuhde muuttuu happisäädön mukaisesti 1,1 ja 0,75 välillä.

Järjestelmä määrittelee tarvittavan leijuilman tarpeen käyrän mukaisesti tehon funktiona. Tätä korjataan vielä leijuilmakertoimella, joka on operaattorin muutettavissa. Lasketusta leijuilmamäärästä vähennetään kiertokaasun osuus. Leijukaasun kokonaismäärää voidaan vielä korjata lisäys- ja vähennysparametrillä. Leijuilman määrä ei voi laskea leijuilman minimiilmakäyrältä lasketun minimiarvon alle. Leijuilman minimimäärä on rajoitettu 12,5 kg:aan/s. Leijuilman ja kiertokaasun yhteismäärän asetusarvo on rajoitettu 28 kg:aan/s. Kattilan leijupolton lukitusraja leijuilman ja kiertokaasun yhteismäärälle on 25 kg/s.

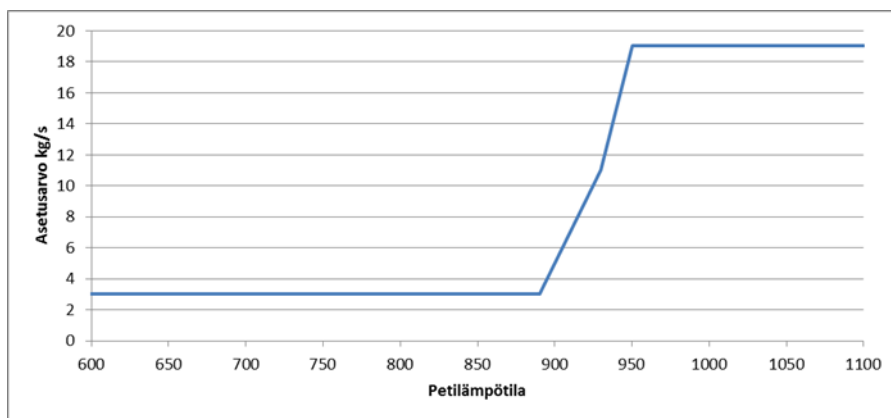
Tarvittava sekundääri- ja tertiääri-ilman määrä saadaan, kun lasketusta kokonaisilmamäärästä vähennetään leijuilman ja heittoilman osuus, joka on kaikilla kuormilla vakio 3 kg/s. Sekundääri- ja tertiääri-ilmojen suhde lasketaan tertiääri-ilmakäyrältä höyrymäärän funktiona. Sekundääri- ja tertiääri-ilmojen suhdetta voidaan muuttaa myös käyttäjän antamalla asetuksella. Sekundääri-ilman määrä saadaan, kun sekundääri-ilmamäärästä vähennetään tertiääri-ilman määrä. Ilmamääriä korjataan vielä happisäädöllä, jäännöshapen mukaan. Sekundääri- ja tertiääri-ilmojen jakoa etu- ja takaseinien välillä voidaan tarvittaessa muuttaa. Riittävän jäähdytyksen takaamiseksi sekundääri-ilman minimimäärä on rajoitettu 10 kg:aan/s ja tertiääri-ilman minimimäärä 3 kg:aan/s.

5.4 Kiertokaasu

Petilämpötilojen säätämiseksi leijuilman sekaan voidaan syöttää kiertokaasua. Kiertokaasu on savukaasua, joka kierrätetään sähkösuodattimen jälkeen takaisin kattilaan. Kiertokaasu sekoittuu leijuilmaan primääri-ilmakanavassa ja leijuilmalaaatikossa. (16.)

Kiertokaasupuhallin on johtosiipisäätöinen radiaalipuhallin (16). Kiertokaasupuhallin käynnistyy petilämpötilojen keskiarvon noustessa yli 880 °C ja pysähtyy petilämpötilojen keskiarvon laskiessa alle 830 °C. Kiertokaasun määräsuodattimen asetusarvo määräytyy kiertokaasun

ohjauskäyrän, petilämpötilojen ohjausarvon ja leijuilmamäärän mukaisesti. Kiertokaasun ohjauskäyrä määrää petilämpötilojen keskiarvon mukaisen asetusarvon (kuva 17). Petilämpötilojen ohjausarvon kautta saatava asetusarvo on kiertokaasun määrää säättävänä asetuksena, jos sen arvo ylittää ohjauskäyrän asetusarvon. Määräsäätimen asetusarvoon vaikuttaa myös näiden asetusarvojen lisäksi leijuilman määrän suojausasetus, joka vaikuttaa kiertokaasun määrään silloin, kun leijuilman määrä on alle 28 kg/s. Järjestelmä valitsee näiden asetusarvojen perusteella puhaltimen määräsäätimen ohjausasetukseksi sen, mikä saa missäkin tilanteessa suurimman asetusarvon.



KUVA 17. Kiertokaasupuhaltimen petilämpötilojen mukainen ohjauskäyrä

5.5 Päästöraja-arvot

K3-kattilaa tulevat tulevaisuudessa mahdollisesti koskemaan päästöraja-arvot, jotka on annettu valtioneuvoston asetuksella 936/2014. K3-kattilaa koskevat päästöraja-arvot voivat vielä muuttua kattilan siirtymäajan aikana. Valtioneuvoston asetuksessa on säädetty ympäristönsuojelulain (527/2014) 97. §:ssä tarkoitettujen suurten polttolaitosten, joihin sovelletaan lain 98–106 §:ää, ilmaan johdettavien päästöjen rajoittamisesta (19.)

Valtioneuvoston asetuksessa ”suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamiseksi” on säädetty päästöraja-arvot polttoteholtaan vähintään 50 MW ja sitä suuremmille polttolaitoksille ja energiantuotantoyksiköille. Energiantuotantoyksiköllä tarkoitetaan yhtä kattilaa, kaasuturbiinia tai polttomootoria, joissa polttoaineet hapetetaan, ja niissä syntyvää lämpöä voidaan käyttää hyväksi. Polttolaitos käsittää yhden tai useamman energiantuotantoyksikön, jonka savukaasut johdetaan samaan piippuun. (19.)

Asetuksessa on annettu polttoainekohtaiset päästöraja-arvot rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten osalta kiinteitä polttoaineita polttaville laitoksille ja edellisten lisäksi hiilimonoksidin raja-arvot kaasumaisia polttoaineita polttaville laitoksille. Raja-arvot on annettu erikseen uusille ja jo olemassa oleville polttolaitoksille. Olemassa olevaksi polttolaitokseksi luetaan laitos, jonka toimintaan on myönnetty lupa ennen 20.2.2013. (19.) Taulukossa 5 on esitetty valtioneuvoston asetuksella annetut päästöraja-arvot kiinteitä polttoaineita polttaville laitoksille.

TAULUKKO 5. Valtioneuvoston asetuksen 936/2014 mukaiset päästöraja-arvot (19)

Uudet laitokset, polttoainetehto $100 < P \leq 300$, Päästöraja-arvo $\text{mg/m}^3(\text{n})$, 6 % O_2			
	Biomassa	Turve	Muut kiinteät polttoaineet
SO_2	200	250	200
NO_2	200	200	200
Hiukkaset	20	20	20
Olemassa olevat laitokset, polttoainetehto $100 < P \leq 300$, Päästöraja-arvo $\text{mg/m}^3(\text{n})$, 6 % O_2			
	Biomassa	Turve	Muut kiinteät polttoaineet
SO_2	200	300	250
NO_2	250	250	200
Hiukkaset	20	20	25

Päästöraja-arvot määritellään massaosuutena savukaasun tilavuudesta yksikössä $\text{mg/m}^3\text{n}$, ja kiinteitä polttoaineita poltettaessa savukaasujen happipitoisuudeksi määritetään kuusi prosenttia. Päästöjä on seurattava jatkuvin mittauksin ja raja-arvoja katsotaan noudatetuksi, jos yksikään päästöjen kuukausikeskiarvo ei ylitä annettuja päästöraja-arvoja, vuorokausikeskiarvo ei ylitä 110 %:a päästöraja-arvoista ja 95 %:a kaikista vuoden päästöjen tuntikeskiarvoista ei ylitä 200 % päästöraja-arvoista. (19.)

Samanaikaisesti useita polttoaineita poltettaessa päästöraja-arvo määritetään polttoaineiden painotettujen päästöraja-arvojen summana. Painotetut päästöraja-arvot lasketaan kertomalla kunkin polttoaineen antama teho polttoaineen mukaisilla päästöraja-arvolla ja näin saatu tulo polttoaineiden kokonaisteholla. Päästöraja-arvo saadaan laskemalla yhteen näin saadut polttoainepainotetut päästöraja-arvot (19.) Asetuksen mukaisesti K3-kattilaa koskeva SO_2 -päästöjen raja-arvo on $250 \text{ mg/m}^3\text{n}$ turpeen ja puupolttoaineiden suhteen ollessa 50/50. Hiukkaspäästöjen raja-arvo on $20 \text{ mg/m}^3\text{n}$ ja NO_x -päästöjen raja-arvo on $250 \text{ mg/m}^3\text{n}$, riippumatta polttoainesuhteista.

K3-kattilan SO₂-päästöt olivat vuosina 2014 ja 2015 keskimäärin noin 200 mg/m³n (O₂, 6 %) ja hiukkaspäästöt alle 3 mg/m³n (O₂, 6 %). Kattilassa on myös valmiina kalkinsyöttöjärjestelmä, joka voidaan tarvittaessa ottaa käyttöön rikkipäästöjen vähentämiseksi. Typen oksidien osalta asetuksessa annettuja päästöraja-arvoja ei saavuteta. Vuonna 2014 K3-kattilan NO_x-päästöt ylittivät asetuksen päästöraja-arvon 250 mg/m³n vuoden jokaisena kuukautena. Vuoden 2015 kuukausittaisten keskiarvojen mukainen keskimääräinen NO_x-päästö oli 340 mg/m³n (O₂, 6 %). Vuoden 2015 syys–joulukuun välinen keskimääräinen savukaasujen NO_x-pitoisuus oli noin 360 mg/m³n (O₂, 6 %).

6 TUTKIMUS JA KOEAJOT

6.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Kattilan toimintaa tutkittiin vuoden 2015 syksyn ja alkutalven aikana. Kokonaiskuva kattilan toiminnasta muodostettiin olemassa olevien aikaisempien tietojen, koeajojen ja käyttöhenkilöstön kokemusten pohjalta. Kattilan automaatiojärjestelmän yhteydessä on ABB-info-ohjelma. Ohjelma tallentaa kattilasta mitattuja toiminta-arvoja ja ohjelmalla voidaan piirtää kerätyistä arvoista trendikuvaaja. Kattilan toimintaa seurattiin koeajojen aikana, sekä koeajoista kerättyä dataa analysoitiin ABB-trendikuvaajien ja MS Excel -ohjelman avulla.

Mikko Matilainen on tutkinut kattilan polttoaineen syöttöä ja ilmajakoa vuonna 2001. Tuolloin ilmakehän rakenteellisten erojen aiheuttamaa ilmasyötön painottumista kattilan vasempaan reunaan on korjattu painottamalla sekundääri-ilman virtausta etuseinälle ja tertiääri-ilman virtausta takaseinälle. Ilmajakoon tehdyt muutokset ovat tasoittaneet lieriön pinnan kaltevuutta ja tulistinlämpötilojen sekä happipitoisuuksien puolittaisia eroja. Tutkimuksessa ei ollut löytynyt merkkejä leijuilman ja kiertokaasun sekoittumattomuudesta, eikä primääri-ilmakehään kiertokaasun sekoittumiseen tarkoitetun pellin asentomuutoksilla ollut havaittu olevan vaikutusta ilman sekoittumiseen. (20.)

Joni Koivu on tutkinut SNCR-järjestelmän optimaalisia syöttökohtia ja kattilanlämpötilaprofilia vuonna 2015. Koivun mukaan kattilan savukaasujen NO_x-pitoisuudet ovat riippuvaisia polttoaineesta ja höyrykuormasta. NO_x-päästöt olivat korkeammat pienemmillä kuormilla. Tuolloin todettiin myös, että tulipesän kuumin kohta on matalilla höyrykuormilla tulipesän alaosassa, jossa leijuilman ja sekundääri-ilman osuudet ovat suuret. (21.)

6.2 Koeajoista saatu informaatio

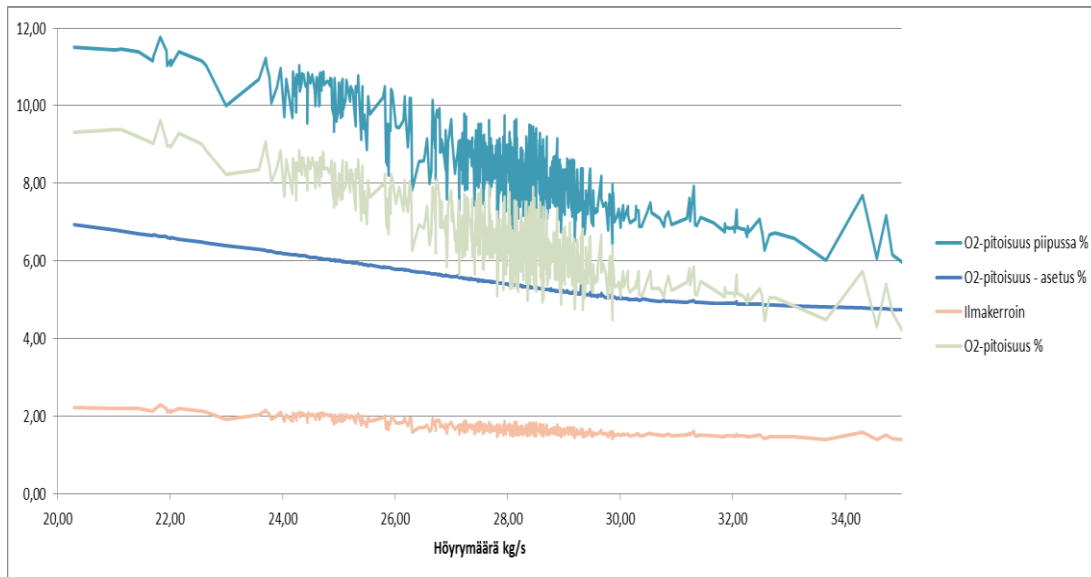
Kattilan toimintaa selvitettiin erilaisten koeajojen avulla. Kattilan koeajoissa seurattiin yleisesti kattilan käyttäytymistä säätöalueen alarajalla. Koeajoissa pyrittiin löytämään minimikuormaa

rajoittavia tekijöitä. Kiertokaasun käyttöä pienillä höyrykuormilla tutkittiin ajamalla eri määriä kiertokaasua kattilaan. Koeajoissa käytettiin myös erilaisia polttoainejakaumia.

Minimikuorman koeajojen aikana ei havaittu ongelmia polttoaineen syötössä. Petilämpötiloissa ei havaittu yli 50 °C:n lämpötilaeroja ja polttoaine purkautui tasaisesti kattilaan. Petilämpötilojen tasaisuudesta voitiin myös päätellä, jo Matilaisen tutkimuksessa todettu, kiertokaasun tasainen sekoittuminen leijuilmaan. Koeajoissa ja aikaisemman datan tarkastelussa ei näkynyt merkkejä savukaasujen kääntymisestä tulipesässä. Tämän vuoksi etu- ja takaseinien ilmajako pidettiin ennallaan.

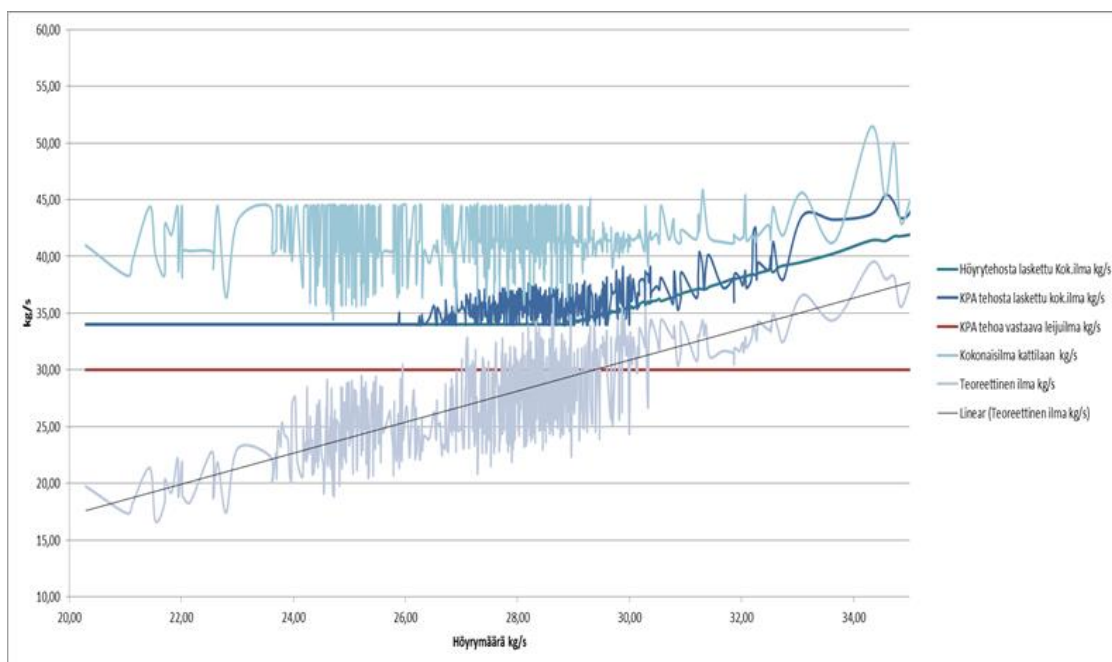
Koeajojen aikana matalin höyrykuorma oli kymmenen minuutin keskiarvolla mitattuna 20,3 kg/s. Mentäessä lähelle höyrykuormaa 20 kg/s kattilaan syötettävän polttoaineen määrä alkaa olemaan melko vähäinen. Esimerkiksi polttoaineen tehollisen lämpöarvon ollessa 10 MJ/kg 20 kg/s höyryntuottoon tarvitaan 6 kg/s polttoainetta. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaisesta sulkusyöttimestä menisi polttoainetta enää vain 1 kg/s. Näin pienillä polttoaineen määrillä polttoaineen laadussa tapahtuvat muutokset saattavat aiheuttaa ongelmia polttoaineen syötössä, vaikka niitä ei koeajojen aikana ilmennytkään.

Koeajojen perusteella voitiin todeta, että pienillä kuormilla kattilaan menevä kokonaisilmamäärä on liian suuri. Tämä ilmeni ilmakertoimen kasvamisena kuorman pienentyessä sekä kattilan happipitoisuuden mittausarvon ja happipitoisuuden asetuksen välisenä kasvavana erona. Myös savukaasujen jäännöshapen osuus piipussa kasvoi kuorman pienentyessä. Alle 22 kg/s kuormilla jäännöshapen osuus piipussa nousee yli 11 %:n ja kattilaan menevän ilman määrä on yli kaksinkertainen teoreettiseen ilmamäärään verrattuna. Kuvassa 18 on esitetty kattilan happipitoisuuden kasvu kuorman pienetessä.

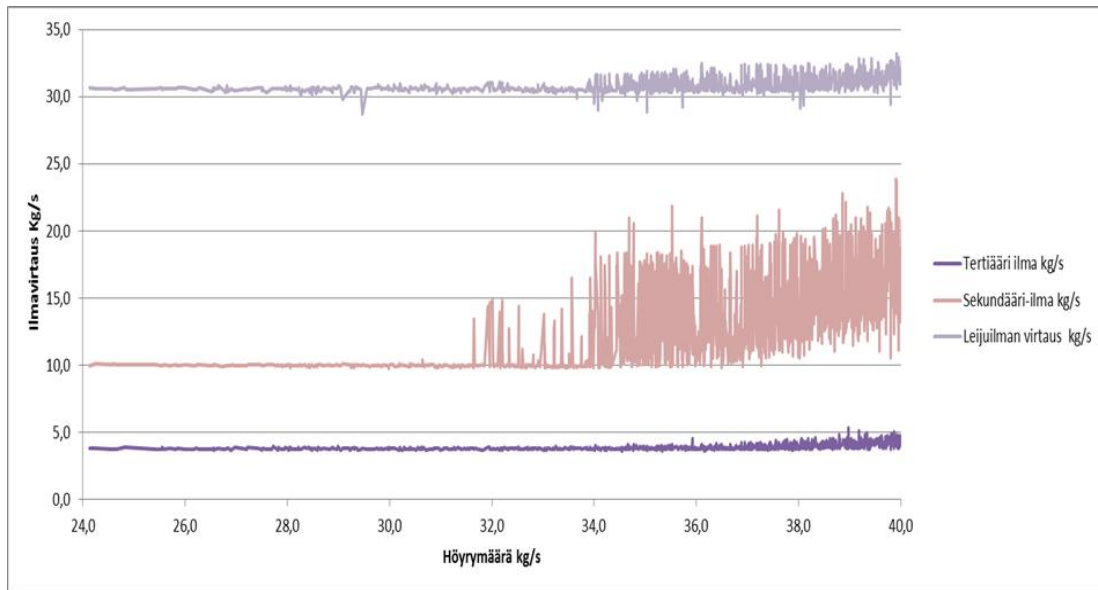


KUVA 18. Kattilan happipitoisuus ja ilmakerroin höyrymäärän funktiona

Kattilan palamisilmojen säätöalue rajoittuu noin höyrykuormaan 30 kg/s. Kuorman laskiessa tämän alle ei ilmamäärissä tapahdu enää muutoksia. Minimikuormalla kattilan kokonaisilmamäärä rajoittuu 44,4 kg/aan/s, ellei kiertokaasua ole käytössä. Sekundääri- ja tertiääri-ilmat ovat minimirajoilla 10 kg/s ja 3,8 kg/s. Leijuilman määrä rajoittuu 30,6 kg/aan/s. Leijuilman osuus kokonaisilmasta on tällöin noin 69 %, sekundääri-ilman osuus 22,5 % ja tertiääri-ilman osuus noin 8,5 %. Kattilan ilmamääriä ja ilmajakoa matalilla höyrykuormilla on esitetty kuvissa 19 ja 20.

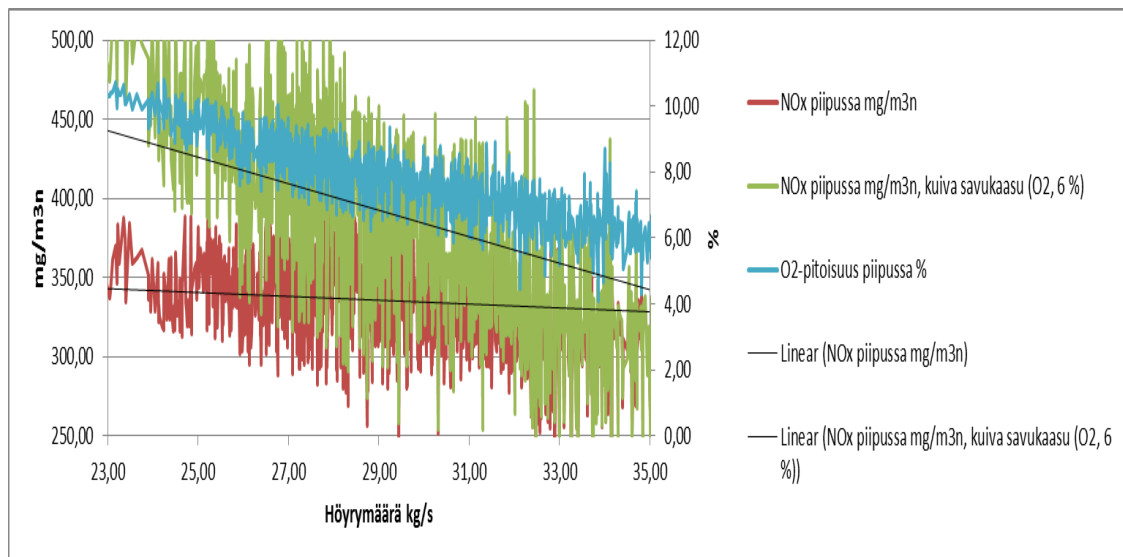


KUVA 19. Todelliset ilmamäärät verrattuna laskettuihin ilmamääriin



KUVA 20. Ilmavirtausten rajoittuminen pienellä kuormalla

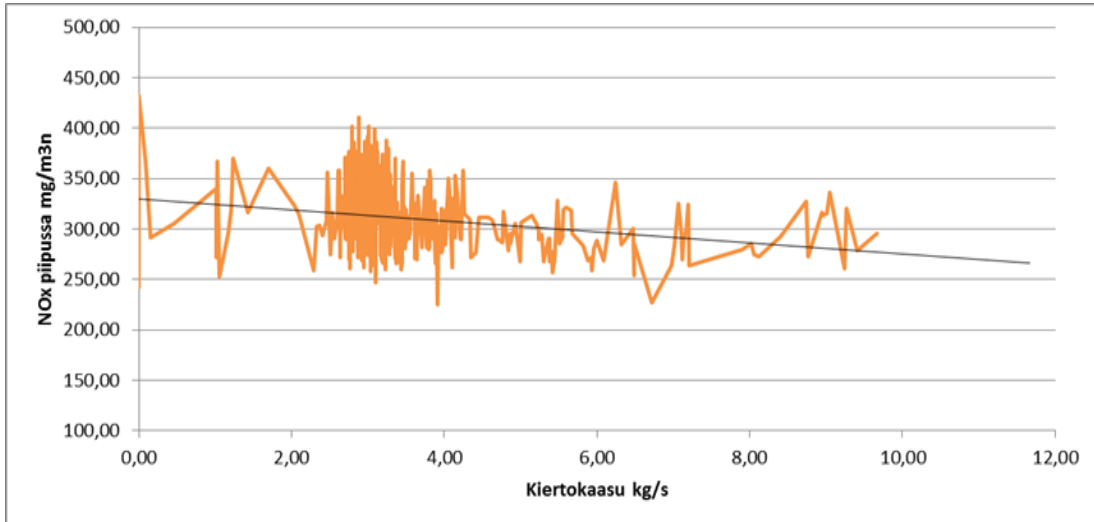
Yli-ilmamäärän ja jäännöshapen nousu kuorman pienentyessä vaikuttaa myös kattilassa syntyviin savukaasupäästöihin. NO_x-päästöt lasketaan kuiville savukaasuille redusoituna 6 % jäännöshapelle, eli jäännöshapen noustessa yli 6 %:n kasvattaa se myös laskennallisia NO_x-päästöjä. Kuvassa 21 on esitetty savukaasujen NO_x-pitoisuuden ja 6 %:n jäännöshapelle redusoitujen NO_x-pitoisuuksien eroa kuorman pienentyessä ja jäännöshapen kasvaessa.



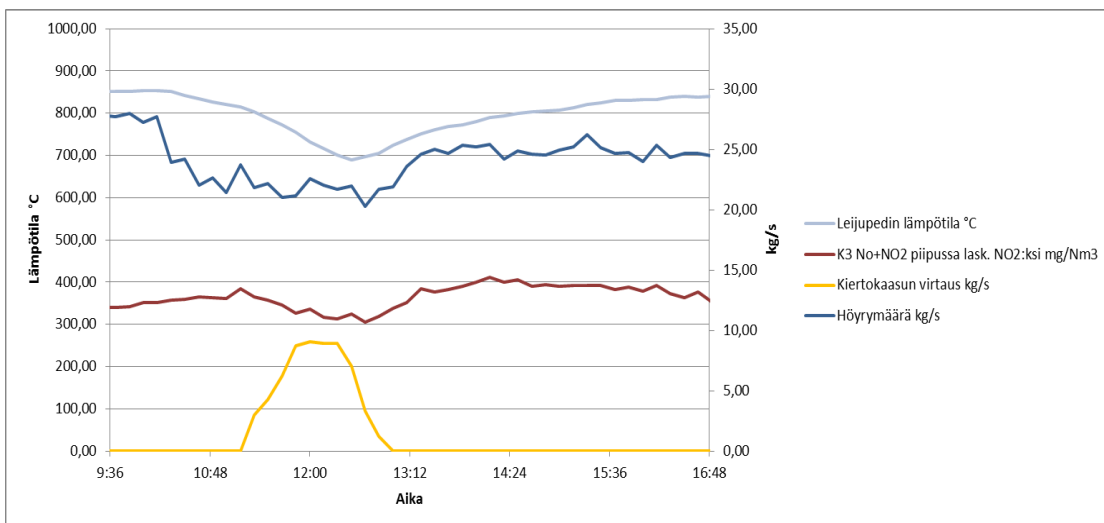
KUVA 21. Jäännöshapen vaikutus NO_x-päästöihin

Kiertokaasun käyttöä tutkittaessa voitiin todeta, että kiertokaasun käyttö laskee petilämpötiloja ja vähentää kattilaan menevää hapen määrää ja vaikuttaa näin myös kattilassa muodostuviin NO_x-päästöihin. Kattilaan syötettävän kiertokaasun määrää minimikuormalla rajoittaa kuitenkin

petilämpötilojen lasku kiertokaasupuhaltimen nykyisen toiminta-alueen alapuolelle. Kiertokaasupuhallin pysähtyy petilämpötilojen mennessä alle 830 °C:n. Kiertokaasun vaikutusta savukaasujen NO_x-pitoisuuteen ja petilämpötilaan on havainnollistettu kuvissa 22 ja 23.



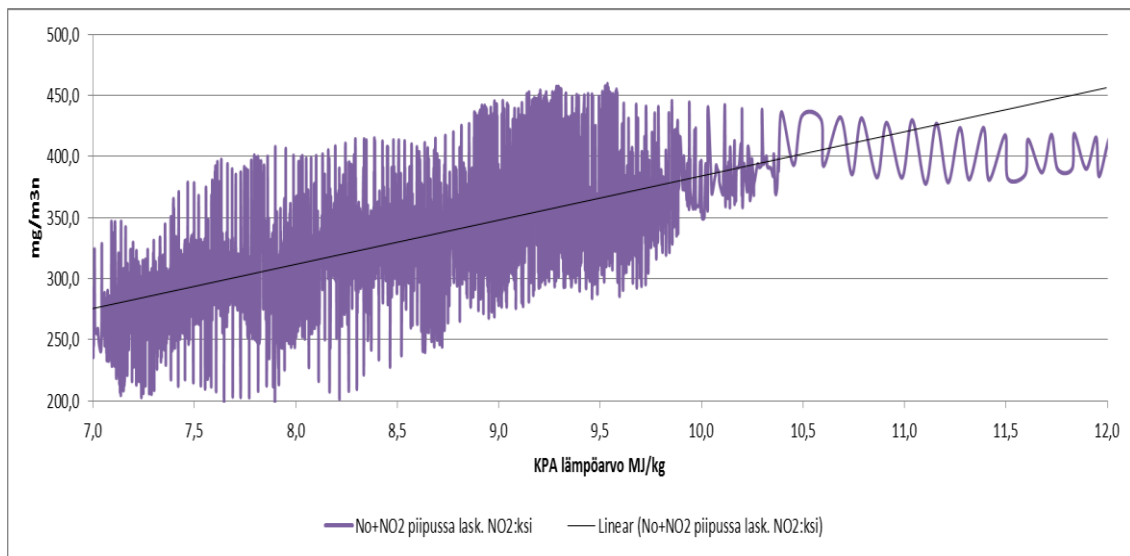
KUVA 22. Kiertokaasun vaikutus NO_x-päästöihin



KUVA 23. Kiertokaasun määrän vaikutus petilämpötilaan ja NO_x-päästöihin

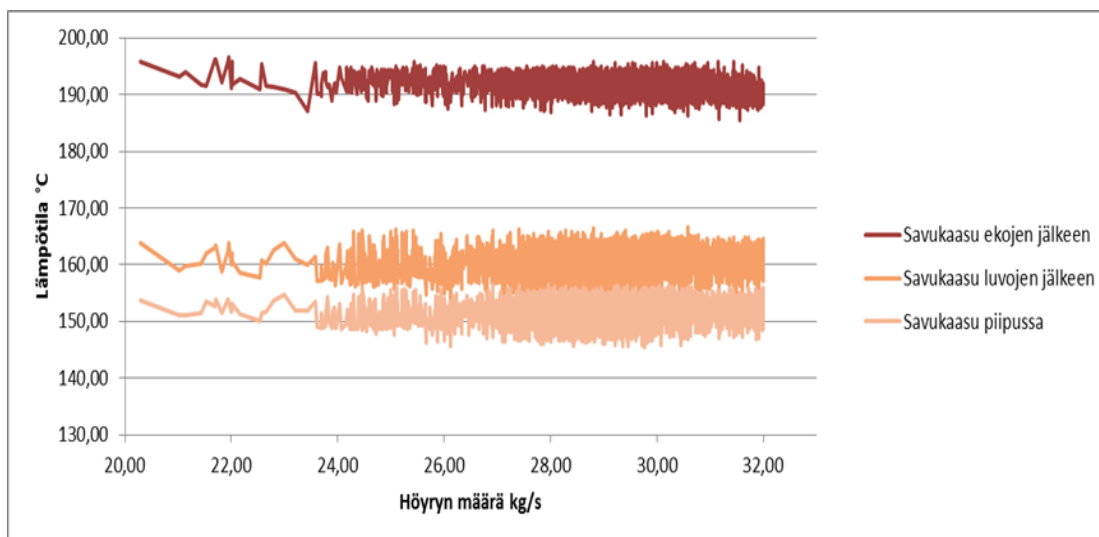
Koeajojen aikana polttoainesuhteilla havaittiin olevan todella suuri merkitys kattilassa muodostuviin NO_x-päästöihin. Turpeen määrän kasvaessa NO_x-pitoisuudet savukaasuissa nousivat jyrkästi. Koeajojen aikana savukaasujen NO_x-pitoisuudet piipussa olivat pienimmillään alle 200 mg/m³n puupolttoaineen osuuden ollessa suuri. Pitoisuudet kasvoivat turpeen osuuden noustessa ja olivat suurimmillaan reilusti yli 400 mg/m³n. Tarkkaa kuvaa polttoainesuhteesta on todella vaikea muodostaa verrattain lyhyiden koeajojen aikana. Pienellä kuormalla polttoainesuhteiden muutoksen näkyminen kattilassa saattaa viedä useita tunteja. Myös KPA-

siiloissa on jonkin verran polttoainetta, vaikka pinnanmittaus näyttäisi 0 %. Polttoaineen lämpöarvosta voidaan päätellä, milloin esimerkiksi turpeen osuus kattilassa lisääntyy, mutta polttoaineiden laadussa on vaihtelua ja tarkkaa osuutta ei pystytä näinkään määrittämään. Kuvassa 24 on esitetty polttoaineen lämpöarvon avulla savukaasujen NO_x-pitoisuuden kasvua turpeen osuuden lisääntyessä.

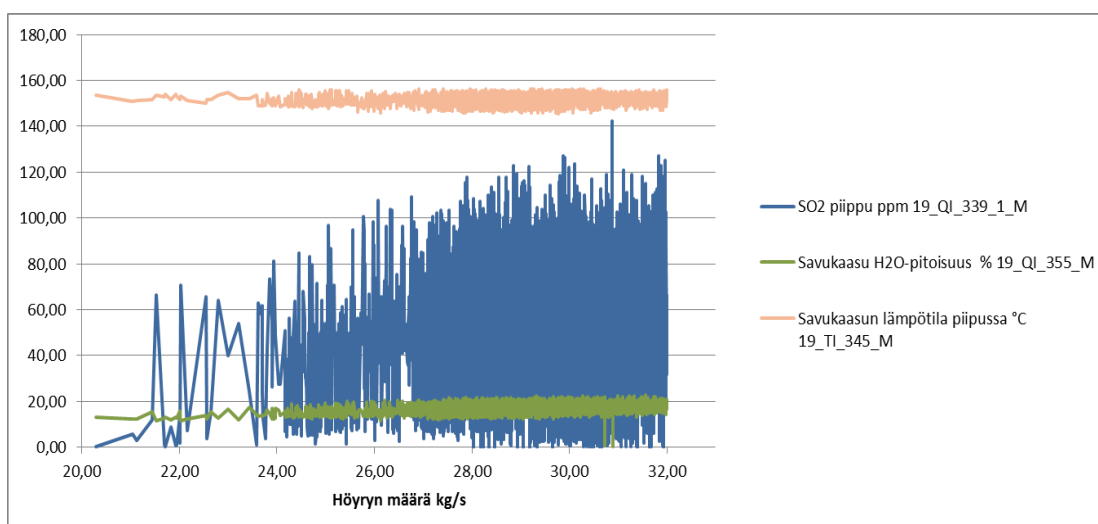


KUVA 24. Savukaasujen NO_x-pitoisuus polttoaineen lämpöarvon funktiona

Savukaasujen lämpötila pysyi koeajojen aikana kuvan 10 perusteella arvioidun happokastepistelämpötilan yläpuolella. Höyrykuorman laskiessa myös savukaasujen SO₂-pitoisuus laskee. SO₂-pitoisuuden lasku vähentää kattilassa syntyvän rikkitrioksidin määrää, joka taas pienentää rikkihapon muodostumisen riskiä. Turpeen osuuden kasvu polttoaineseoksessa nostaa luonnollisesti kattilan SO₂-päästöjä, koska polttoaineen sisältämän rikin osuus kasvaa. Minimikuormalla savukaasujen lämpötila nousee jonkin verran. Kuvassa 25 on esitetty savukaasujen lämpötiloja eri vaiheissa kattilaa koeajojen aikana. Kuvassa 26 on esitetty savukaasujen lämpötila, kosteus ja rikki-pitoisuus matalilla höyrykuomilla.



KUVA 25. Savukaasun lämpötilat koeajoissa



KUVA 26. Savukaasun SO₂, H₂O ja lämpötila piipussa

Koeajojen aikana savukaasun alhaisin lämpötila piipussa oli 145 °C ja korkein savukaasujen kosteuspitoisuus oli 22,5 %. Savukaasujen rikkitrioksidin määrää ei tarkkaan voida määrittää, mutta happokastepisteen alittumiseksi sen olisi oltava näillä arvoilla noin 9 ppm. Syksyn 2015 aikana alle 30 kg/s höyrykuormilla savukaasujen keskimääräinen SO₂-pitoisuus oli 75 ppm. Suurin savukaasujen SO₂-pitoisuus oli 127 ppm kymmenen minuutin keskiarvoilla laskettuna. Tällöin turpeen osuus polttoaineesta oli noin 80 %. Savukaasun lämpötilan ollessa alhaisimmillaan (145 °C) ja kosteuspitoisuuden ja SO₂-pitoisuuden korkeimmillaan (22,5 % ja 127 ppm) täytyisi savukaasujen rikkidioksidista noin 7 % reagoida rikkitrioksidiksi happokastepisteen alittumiseksi piipussa. Tämä on tietysti mahdollista, joskin on epätodennäköistä, että turpeen

osuus sekä polttoaineen kosteus olisivat yhtäaikaan korkeimmillaan ja samalla savukaasujen lämpötila alhainen.

Koeajojen aikana käyttäjien kanssa käytyjen keskustelujen myötä kävi myös ilmi, että yksi minimikuormalla ajoa rajoittava tekijä on kattilan hidas tehon nosto. Jos kattilalla minimikuormaa ajettaessa tulee yhtäkkiäinen tarve lisätä kattilan tehoa, kestää pitkään saada tarvetta vastaava teho kattilasta. Tämä korostuu suurten höyrynkuluttajien kohdalla, esimerkiksi paperikoneiden ylösajossa. Hälytysjärjestelmän hälytys ilmoittaa paperikoneen ylös- ja alasajosta ”katko alkoi” - tai ”katko loppui” -hälytyksellä ”Katko loppui” -hälytyksen jälkeen paperikoneen höyryntarve saattaa nousta äkkiä yli 10 kg/s.

7 TULOKSET

Kattilan minimikuorman koeajojen perusteella voidaan todeta, että kattilalla on mahdollista ajaa pienempää kuormaa kuin nykyistä 27 kg/s. Koeajojen aikana ei havaittu ongelmia 20 kg/s kuormalla ajettaessa. Kattilan palamisilmojen säätöalue rajoittui kuitenkin noin 30 kg/s höyrykuormaan. Sekundääri- ja tertiääri-ilman määrät rajoittuivat kattilan valmistajan kanaville laskemiin jäähdytysilmamääriin. Koeajoissa leijuilman määrä rajoittui 30,6 kg:aan/s. Leijuilmakäyrän muutoksella korjattiin leijuilman määrä 30,6 kg:sta/s 28 kg:aan/s, johon se on ohjelmallisesti rajoitettu. Kattilan leijupolton lukitusrajana on 25 kg/s, johon jää näin vielä 3 kg/s ns. "pelivaraa". Vaikka leijuilman määrää saatiin laskettua 2,6 kg/s on kattilaan menevä yli-ilmamäärä kuitenkin palamisessa tarvittavaan ilmamäärän nähden suuri. Minimikuormalla primääri-ilman määrää rajoittaa leijupolton lukitusraja ja sekundääri- ja tertiääri-ilmoilla tarvittavat jäähdytysilman määrät. Ilmamääriin ja ilmajakoon ei alhaisilla kuormilla pystytä tämän vuoksi vaikuttamaan muuten kuin korvaamalla leijuilmaa kiertokaasulla. Leijuilman korvaaminen kiertokaasulla vähentää samassa suhteessa kattilaan menevää leijuilman määrää. Palamisessa reagoivan hapen määrä vähenee, joka näkyy savukaasujen jäännöshapen alenemisena. Yli-ilmamäärän väheneminen pienentää myös kattilassa syntyvien savukaasujen NO_x-pitoisuutta.

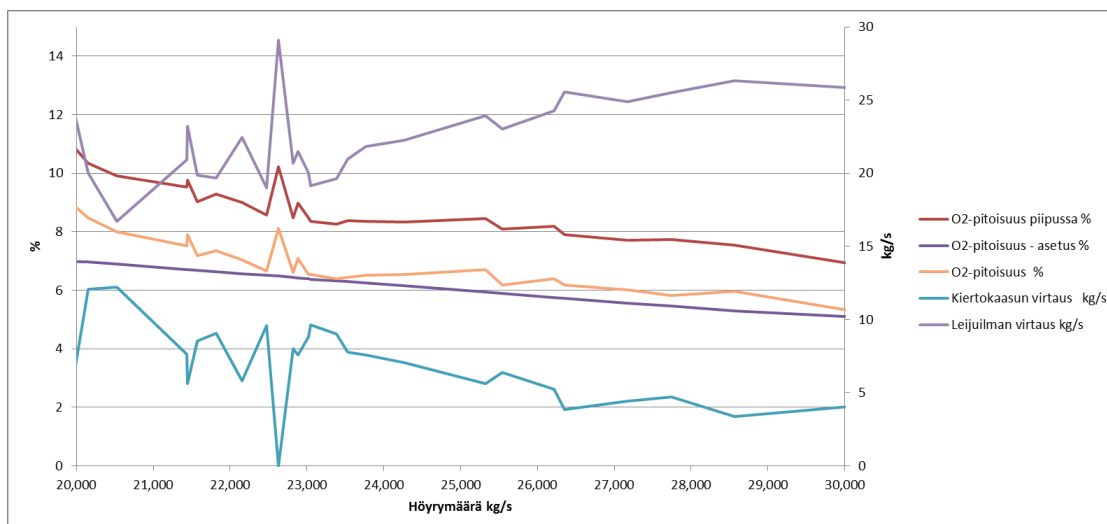
Polttoainejakaumalla on suuri vaikutus kattilassa syntyviin päästöihin. Turve saattaa sisältää yli kolminkertaisen määrään typpeä puupolttoaineisiin verrattuna mikä näkyy selvästi savukaasujen NO_x-pitoisuuksissa. Puupolttoainetta poltettaessa kattilan savukaasujen NO_x-pitoisuudet pysyvät mahdollisesti alle tulevien päästöraja-arvojen. Minimikuormalla ajettaessa korkeampi jäännöshappi kuitenkin nostaa 6 %:n jäännöshapelle laskettuja arvoja. Aikaisemmin mainittujen seikkojen, kuten polttoainesuhteiden muutosten näkyminen kattilassa pitkällä viiveellä ja polttoaineen laadussa olevien vaihteluiden vuoksi, turpeen osuuden tarkkaa määrää polttoaineseoksessa on näiden koeajojen perusteella vaikea määrittää. Myös turpeen tyyppipitoisuus voi vaihdella. Tämän vuoksi tarkkaa turpeen osuutta, jolla tulevat päästöraja-arvot voitaisiin saavuttaa, ei voida myöskään osoittaa. Koeajojen perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että yli 20 %:n turpeen osuudella päästöraja-arvot ylittyvät erittäin suurella todennäköisyydellä.

7.1 Kiertokaasun käytön muutos

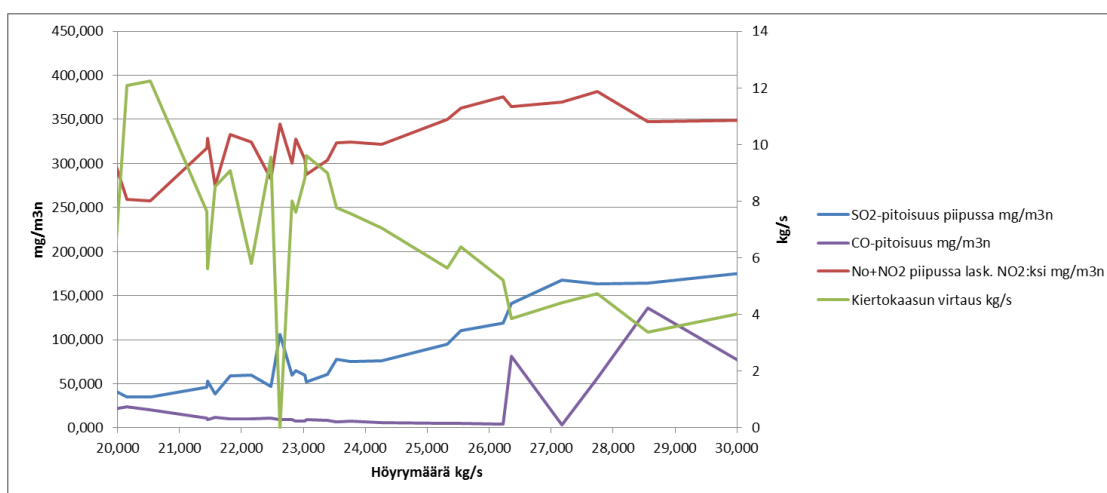
Tutkimuksen perusteella tehtiin muutosehdotus kiertokaasupuhaltimen toimintaan alle 30 kg:n/s kuormille. Suuremmilla kuormilla kiertokaasun käyttö toimii petilämpötilojen säätöön kuten aiemminkin. Kiertokaasupuhaltimen ohjausmuutos tulisi voimaan kattilan ilmasäädön alarajalla eli höyrykuorman laskiessa alle 30 kg:n/s. Kiertokaasupuhaltimen ohjausarvoja muutetaan siten, että kiertokaasupuhallin pysähtyy vasta kun petilämpötilojen keskiarvo alittaa 780 °C:n. Petilämpötilojen keskiarvo pyritään pitämään yli 780 °C, jolloin palamisolosuhteet ovat vielä hyvät ja mahdolliset äkilliset polttoaineen laadunvaihtelut tai purkausongelmat eivät pudota petilämpötiloja lukitusrajalle.

Kiertokaasupuhaltimen toimintaa ohjaavan petilämpötilojen mukaisen ohjauskäyrän asetus on kolme alle 890 °C:n petilämpötiloilla. Leijuilman määrän mukainen 28 kg/s yhteismäärän suojaus pidetään myös ennallaan. Petilämpötilan ohjausasetuksen kautta tuleva asetusarvo ohjaa kiertokaasupuhaltimen toimintaa ja kiertokaasun määrää. Petilämpötilan asetusarvoa ja kiertokaasupuhaltimen toimintaa säädetään kaskadiasetusarvolla, joka muuttuu höyrykuorman mukaisesti kattilan tehon funktiona. Leijuilmamäärän kasvun on tapahduttava yhtäaikaan kiertokaasupuhaltimen pienentäessä virtausta. Kiertokaasupuhaltimen pysähtyminen ei saa johtaa tilanteeseen, jossa leijuilman ja kiertokaasun yhteismäärä laskee alle leijupolton lukitusrajan 25 kg/s.

Kiertokaasun käytön muutoksen toimivuutta testattiin vielä koeajolla. Koeajossa automaatiojärjestelmästä muutettiin kiertokaasupuhaltimen ohjauksesta vain petilämpötilan alarajaa. Pysyvän ohjausmuutoksen toteuttamiseksi tarvitaan myös muita muutoksia automaatiojärjestelmään. Prosessinäytölle olisi myös hyvä lisätä kytkin josta operaattori voi valita kiertokaasupuhaltimen ohjauksen tarvittaessa pois päältä. Kuvassa 27 on esitetty kattilan happitasot kiertokaasupuhaltimen muutoksen koeajon aikana. Kuvassa 28 on esitetty savukaasun SO₂-, CO- ja NO_x-pitoisuudet koeajon aikana.



KUVA 27. Kattilan happitasot kiertokaasupuhaltimen toiminnan muutoksen jälkeen



KUVA 28. Savukaasun SO₂-,CO- ja NO_x-pitoisuudet kiertokaasupuhaltimen muutoksen jälkeen

Kiertokaasupuhaltimen muutosta testattaessa kokeiltiin myös kattilan tehon noston nopeutta. Tehon nosto 20 kg/s höyrykuormasta 37 kg/s höyrykuormaan kesti noin 15 minuuttia. Kattilan polttoaineen syöttö vastaa viiveellä tehon tarpeen nousuun. Tehon nostoa on vielä mahdollista virittää automaatiojärjestelmän asetuksia muuttamalla.

7.2 Muita huomioita

Koeajot olivat verrattain lyhyitä, joten pitkäkestoisesta useita päiviä kestävästä minimikuormalla ajosta ei ole kokemusta. Pitkään kestävästä minimikuormalla ajon vaikutuksia ja siitä seuraavia vaikutuksia tulee tulevaisuudessa vielä tarkkailla. Pitkään jatkuvan minimikuormalla ajon seurauksena petilämpötilat ja savukaasun lämpötila saattavat laskea. Kattilassa on valmiina

rikkipitoisuuden, kosteuden ja lämpötilan mittaukset. Näiden yhdistelmällä saataisiin myös arvot arvioidulle rikkihappokastepisteen lämpötilalle. Järjestelmä voisi antaa hälytyksen, jos rikkihappokastepisteen alittumisen vaara on mahdollinen. Kaskadisäätöön voitaisiin myös lisätä pieni kattilan tehon nosto, jos petilämpötilat ovat liian pitkän aikaa alarajalla ja lämpötilat alkavat laskemaan.

Kattilan minimikuormaa voitaisiin mahdollisesti saattaa alemmas myös jakamalla peti osiin tai syöttämällä polttoainetta petiin vain neljästä kohtaa kattilaa. Osapetiajo voisi tulla kysymykseen silloin, kun höyryntarpeen tiedetään pysyvän pidemmän aikaa alhaalla, jolloin ei tarvita nopeita kattilan tehon nostoja. K3-kattilan kohdalla tähän tarvittaisiin kuitenkin muutoksia polttoaineen syöttöön sekä mahdollisesti kattilan ilmamääriä rajoittavien suojausten muutoksia.

Äkillisen höyryn tarpeen nousun myötä höyryakku purkautuu ja kattilan tehon noston jälkeen saattaa höyrykuorma jäädä huojumaan joksikin aikaa. Höyryverkon äkillistä paineenvaihtelua ja sen kautta kattilan höyrytuotossa tapahtuvia muutoksia voitaisiin tasoittaa lisäämällä höyryakkukapasiteettiä. Energiatehokkuuden ja kattilan ohjauksen kannalta kannattaisi myös tarkastella johtosiipisäätöisten kiertokaasu- ja leijuilmapuhaltimien muuttamista taajuusmuuttajalla kierroslukusäätöisiksi. Kattilan polttoaineen laadun parantamiseksi on suunniteltu polttoaineen kuivausta. Polttoaineen kuivaus tuo varmasti parantuneen lämpöarvon lisäksi etuja myös kattilan käyttöön ja ohjaukseen.

8 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia leijupetikattila K3:n minimikuormaa ja mahdollisuuksia saattaa minimikuormaa alemmalle tasolle. Tarkoituksena oli myös tutkia kattilan ilmajakoa ja kiertokaasun käytön mahdollisuuksia ja vaikutuksia kattilan NO_x-päästöihin. K3-kattila toimii höyryverkkoa säätävänä kattilana. Tämän vuoksi kattilalla ajetaan yleensä osakuormilla ja kesäaikana usein minimikuormaa. Minimikuorman saattaminen alemmalle tasolle vähentää tilanteita, joissa höyryntuotto on suurempaa kuin kulutus, ja vältytään ajamasta höyryä apulauhduksiin. Minimikuorman laskeminen alemmalle tasolle tuo säästöjä erityisesti polttoaineen kulutuksessa. Minimikuorman laskeminen yhdellä kilolla vähentää polttoaineen tarvetta keskimääräisen lämpöarvon mukaisesti laskettuna noin 0,3 kg/s. Kuorman lasku 27 kg:sta/s 20 kg:aan/s vastaa polttoaineen määrässä noin 2 kg/s.

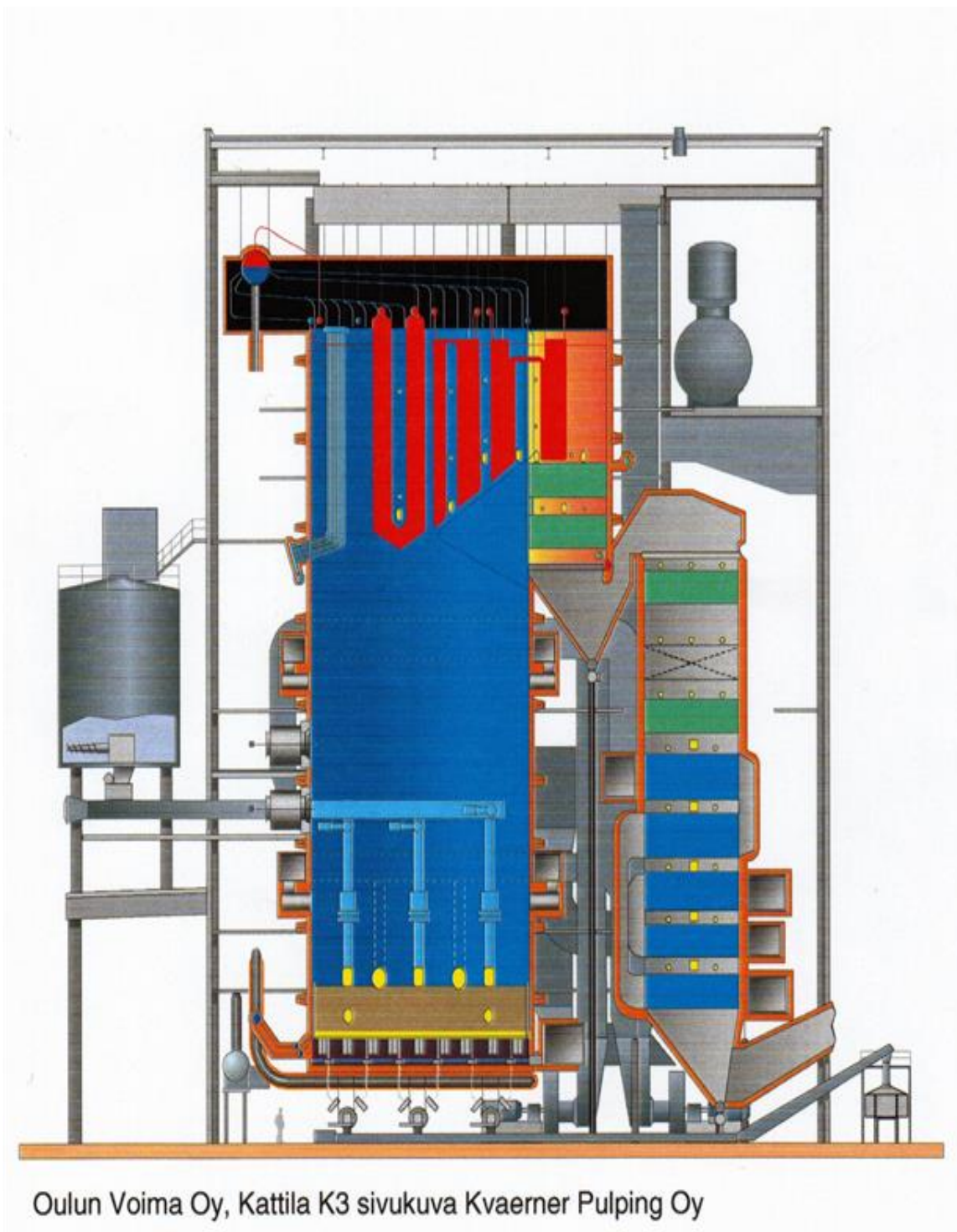
Kuorman laskiessa alle 30 kg:n/s kattilan ilmamäärät laskivat säätöalueen alarajalle. Kattilaan menevä yli-ilman määrä kasvoi kuorman laskiessa. Jäänöshapen osuus savukaasuissa oli 22 kg/s kuormalla yli 11 %. Kattilaan menevää leijuilman määrää laskettiin leijuilmakäyrän muutoksella 30,6 kg:sta/s 28 kg:aan/s. Kiertokaasun käytön todettiin laskevan petilämpötiloja ja vähentävän kattilaan menevää hapen määrää. Yli-ilmamäärän väheneminen laskee myös kattilassa syntyviä NO_x-päästöjä. Leijuilman osittaiseksi korvaamiseksi kiertokaasulla tehtiin muutosehdotus kiertokaasupuhaltimen toimintaan alle 30 kg/s höyrykuormille. Kiertokaasupuhallin toimisi matalilla höyrykuormilla 780 °C:n petilämpötiloihin saakka. Muutosta testattiin koeajolla. Koeajossa savukaasujen happipitoisuus oli 22 kg/s höyrykuormalla noin 9 %. Muutoksen voimaan saattamiseksi tarvitaan vielä automaatiojärjestelmän muutoksia.

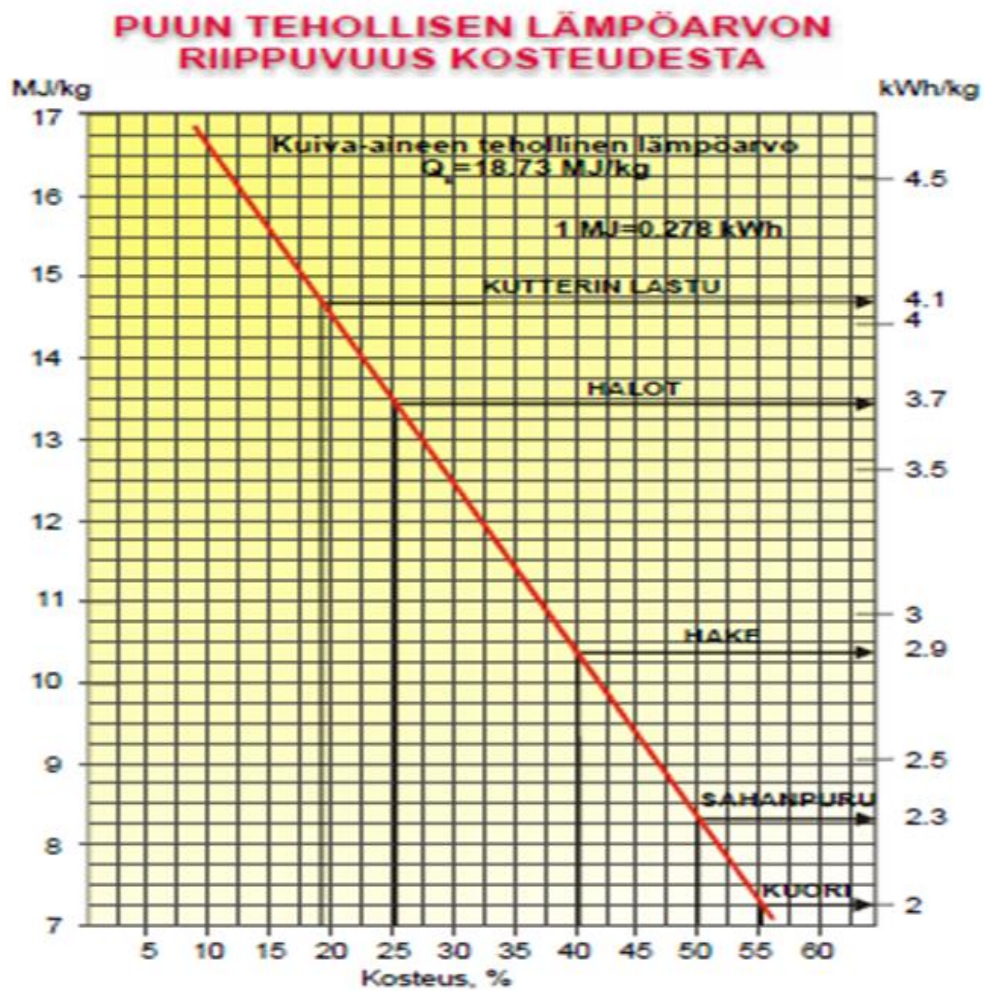
Kiertokaasun käyttö vähentää typen oksideja savukaasuissa, mutta mahdollisten uusien päästöraja-arvojen saavuttaminen pelkästään kiertokaasun käytöllä ei onnistu. Tulevien NO_x-päästöraja-arvojen saavuttaminen vaatii muutoksia kattilassa käytettävien polttoaineiden suhteen tai sekundäärisiä menetelmiä typen oksidien vähentämiseksi.

LÄHTEET

1. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.
2. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2013. Voimalaitostekniikka. Tampere: Suomen Yliopistopaino Oy.
3. Marttila, Seppo 2008. Termiset energialaitokset. Energiatekniikkasarja 5.
4. Energialähteet. 2015. Energiateollisuus ry. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet>. Hakupäivä 11.11.2015.
5. Bioenergia. 2015. Motiva. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia. Hakupäivä 30.11.2015.
6. Puun käyttö. 2015. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/puunkaytto/>. Hakupäivä 26.1.2016.
7. Stora Enso Oyj Oulun tehdas 27.11.2015. Sisäinen dokumentti Stora Enso Oyj.
8. Voimalaitosalue 11.4.2013. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oyj.
9. KnowEnergy-Demo. Saatavissa: http://www.knowenergy.net/suomi/knowpap_system/user_interfaces/prod_environment/0_monipolt_kattilat/ui.htm. Hakupäivä 19.10.2015.
10. Joronen, Tero – Kovács, Jenő – Majanne, Yrjö (toim.) 2007. Voimalaitosautomaatio. Suomen Automaatioseura ry, Helsinki: Copy-Set Oy.
11. Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko – Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari (toim.) 2002. Poltto ja palaminen, Jyväskylä: Gummerus.

12. Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. Saatavissa: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Hakupäivä 11.11.2015.
13. Jalovaara, Jukka – Aho, Juha – Hietämäki, Eljas – Hyytiä, Hille 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 649, Helsinki.
14. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW:n kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012. Ympäristöministeriö.
15. NOx emissions study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011. Metso. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/nox_emissions_study_theory_and_experiences_of_selected_fluidized_bed_boilers.pdf. Hakupäivä 19.10.2015.
16. Niemi, Eino – Rantee, Asko 1996. Kerrosleijukattila K3 Käyttöohjeet. Oulu: Kvaerner Pulping Oy.
17. Törmänen Timo, OVO-projekti 1997. K3 Lyhyet ajo-ohjeet.
18. Turve ja puu tukevat toisiaan energiakäytössä. 2015. Turveinfo. Saatavissa: <http://www.turveinfo.fi/kayttotavat/energiakaytto/turve-ja-puu-yhdessa>. Hakupäivä 29.1.2016.
19. 936/2014. Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140936>. Hakupäivä 29.1.2015.
20. Matilainen, Mikko 2001. Kerrosleijukattilan polttoaineensyötön ja ilmansäätöjen tutkiminen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Diplomityö.
21. Koivu, Joni 2014. Ureasuuttimien optimaalinen paikoitus K3-kattilaan. Oulun ammattikorkeakoulu, Opinnäytetyö.





KUVA 29. Puupolttoaineiden tehollisia lämpöarvoja (12, s. 150)